

Università degli Studi di Pavia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura DICAr
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Architettura, indirizzo in *Edile e del Territorio*

Tesi di Dottorato di Ricerca D.M. 08/02/2013 - Ciclo XXXII - Settembre 2019

Raffaella De Marco

Forme e Modelli

Il rilievo digitale per l'analisi dei sistemi strutturali
nell'edilizia storica



Settore Scientifico Disciplinare SSD ICAR-17 DISEGNO
Durata del dottorato - 3 anni

Università degli Studi di Pavia
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Architettura
Indirizzo in Edile e del Territorio
XXXII Ciclo - Settore disciplinare ICAR-17

Coordinatore - Prof. Ferdinando Auricchio
Vice-Coordinatore - Prof. Carlo Lovadina

Collegio del Dottorato al XXXII ciclo:

ANSELMI TAMBURINI Umberto	Professore Associato (CHIM/02)
ASPRONE Domenico	Professore Associato (ICAR/09)
BERTANZA Giorgio	Professore Ordinario (ICAR/03)
BERIZZI Carlo	Professore Associato (ICAR/14)
BONETTI Elena	Professore Associato (MAT/05)
BREZZI Franco	Professore Ordinario (MAT/08)
GRECO Alessandro	Professore Associato (ICAR/10)
LOVADINA Carlo	Professore Ordinario (MAT/08)
MAGRINI Anna	Professore Ordinario (ING-IND/11)
MORANDOTTI Marco	Professore Ordinario (ICAR/10)
MORGANTI Simone	Ricercatore (ICAR/08)
PARRINELLO Sandro	Professore Associato (ICAR/17)
PENNA Andrea	Professore Associato (ICAR/09)
PETACCIA Gabriella	Professore Associato (ICAR/02)
REALI Alessandro	Professore Ordinario (ICAR/08)
RICCIARDI Paola	Ricercatore (ING-IND/11)
SIBILLA Stefano	Professore Ordinario (ICAR/01)
VENINI Paolo	Professore Associato (ICAR/08)

<p><i>Dottoranda</i> Raffaella De Marco</p> <p>Firma.....</p>	<p><i>Dottorato in Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia</i></p> <p><i>Direttore Scuola di Alta Formazione Dottorale SAFD (fino al 2019) - Prof. Daniele Boffi</i> <i>Direttore Scuola di Alta Formazione Dottorale SAFD (dal 2019) - Prof. Giuseppe Savarè</i></p>
<p><i>Tutor</i> Prof. Sandro Parrinello</p> <p>Firma.....</p>	<p>Direttore del programma di dottorato in "Ingegneria Civile ed Architettura" XXXII ciclo Prof. Ferdinando Auricchio</p> <p>Data.....</p>

INDICE

<i>Premessa</i>	7		
PARTE I: STRUTTURA E FORMA			
1. La struttura in architettura: definizione, relazioni ed espressione	15		
1.1 Livelli di interpretazione e manipolazione per una definizione visuale dell'entità strutturale	17		
1.1.1 Struttura come Unità, per la disposizione di identità di connessione	20		
1.1.2 Struttura come Limite, continuità e forma al contorno	22		
1.1.3 Struttura come Sistema, espressione e padronanza della statica formale	24		
1.1.4 Riconfigurazioni di insieme per la sintesi percettiva	27		
1.2 Identità morfo-visive tipologiche relazionate all'apparato strutturale	28		
1.2.1 Struttura e tecnologia, tra funzione effimera e persistenza monumentale	30		
1.2.2 Monolitismo, ciclopismo e tettonica: l'articolazione degli archetipi strutturali	32		
1.2.3 Dimensionamento ed assemblamento: declinazioni strutturali nella tecnica moderna	34		
1.2.4 Relazioni costitutive nella struttura della città: apparato, unità e agglomerato	36		
1.3 Fenomenica strutturale e formulazione signica nell'esperienza contemporanea del patrimonio costruito	38		
2. Principi ed approcci grafico-formali nella rappresentazione strutturale	51		
2.1 Espressione figurativa della meccanica strutturale: principi di revisione grafica	52		
2.1.1 Figure strutturali: la tecnica della linea supportata dalla meccanica allegorica	52		
2.1.2 Geometrie strutturali: regolarità ed assoluto nel delineamento dello scheletro resistente	54		
2.1.3 Proporzioni strutturali: composizione tra misura e statica nel disegno delle fabbriche cinquecentesche	56		
2.1.4 Modulo strutturale: dettaglio tecnico ed espressione cinematica nei grandi trattati scientifici	58		
2.1.5 Scheletri strutturali: la sintesi delle complessità nel delineamento dei profili resistenti.	64		
2.1.6 Matrice strutturale: dal catalogo compositivo alla scelta dell'astrazione	70		
		2.2 Verso una riabilitazione grafica: possibilità cognitive e digitali della dialettica morfologica strutturale	76
		3. La Forma assegnata: un approccio di analisi tra segno e mimesis	85
		3.1 Teorie visuali e disvelamento per la percezione del 'substrato' fenomenico	87
		3.2 La superficie morfologica quale esito formale della statica strutturale	90
		3.3 Manipolazioni di astrazione della forma per la configurazione della superficie resistente	93
		3.3.1 L'assetto delle variabili, tra iconicità e segno	94
		3.3.2 Il conseguimento della 'forma semplice'	96
		3.4 Sviluppi e frontiere di mimetica ed astrazione, per una declinazione formale del disegno	98
		3.4.1 Strutturare la forma tra mimesis e skhema	98
		3.4.2 L'adattamento del pattern ed il geometry processing	101
		4. Qualità infografica della forma per la rappresentazione strutturale	109
		4.1 Il significato dell'imperfezione formale nella nomografia dell'immagine statica	110
		4.2 Sviluppi dell'informazione grafica strutturale dalla manipolazione del pattern visuale	112
		4.2.1 Il componente paramentale	112
		4.2.2 L'unità resistente	114
		4.2.3 Il complesso storico	116
		4.2.4 L'aggregato urbano	118
		4.2.5 Tipologie e scale formali del dissesto deformativo	120
		4.3 Livelli di conoscenza e linee di indirizzo per l'approccio cognitivo all'immagine strutturale	121
		4.3.1 La discretizzazione dell'informazione morfologica dalle indagini non invasive	122
		4.3.2 Indicatori e convenzioni di normalizzazione nella grafica del rilievo strutturale	123
		4.3.3 Disposizione e richieste conoscitive in materia strutturale nella pratica normativa	125
		4.4 Strutture reali e modelli rappresentativi: la direzione del disegno	127

PARTE II: FORMA E MODELLO

5. Rilievo, rappresentazione e prodotti digitali applicati alla documentazione strutturale 137

- 5.1 Il passaggio dalla 'struttura reale' alla 'struttura digitale' 139
 - 5.1.1 La regolamentazione europea e la normalizzazione degli obiettivi di prevenzione 140
 - 5.1.2 La migrazione dell'analisi strutturale verso la computazione 'formale' digitale 142
 - 5.1.3 La trasposizione della 'forma digitale' per la rappresentazione della 'memoria statica'. 142

5.2 Metodologie di rilevamento integrato per lo sviluppo di database 3D affidabili sulle strutture 144

- 5.3 Obiettivi di conseguimento e qualità morfologica del dato digitale 148
 - 5.3.1 La densità superficiale 149
 - 5.3.2 La copertura dei dataset ed il dettaglio al contomo 152
 - 5.3.3 La referenziazione spaziale 154
 - 5.3.4 Filtraggio e controllo dei dati spaziali 157
 - 5.3.5 Verso il fast-survey 158

5.4 Procedure pregresse di lettura referenziata applicate al dato spaziale 159

- 5.4.1 Localizzazione e tolleranze deformative 159
- 5.4.2 Calibrazione ed orientamento geometrico di unità statiche morfologiche 162
- 5.4.3. Problematiche ed esigenze per il conseguimento della forma discreta 164

5.5 La ricerca di continuità geometrica ed il passaggio al modello 165

6. La modellazione tridimensionale per la trasposizione digitale della forma strutturale 173

6.1 Modellazione mesh: affidabilità di triangolazione ed inapplicabilità del modello perfetto. 174

6.2 Il caso studio sperimentale in ambiente controllato: monitoraggio e diagnostica su un prototipo strutturale del centro storico di Basilea (Svizzera) 176

- 6.2.1. Il contesto sismico e i caratteri strutturali morfologici del patrimonio edilizio di Basilea 177
- 6.2.2 La predisposizione costruttiva del prototipo strutturale per la validità della risposta meccanica 179
- 6.2.3. La campagna di rilevamento digitale: caratteristiche e processi di acquisizione 180
- 6.2.4. La finalizzazione del database morfologico 185
- 6.2.5. Letture deviazionali delle point clouds dalla referenziazione delle fasi statiche 188
- 6.2.6. Il controllo multi-strumentale comparato e la certificazione della sequenza statica 190

6.3 La modellazione Reality-based ottimizzata per la diagnostica strutturale: criticità ed esigenze di certificazione a supporto della strategia metodologica 196

- 6.3.1. Ottimizzazione, triangolazione e rigenerazione per il conseguimento della mesh 199
- 6.3.2. Fattori di discontinuità e procedure di correzione, verso la qualità 'watertight' 204
- 6.3.3. Certificazione dei modelli e conseguimento dell'immagine diagnostica 205

PARTE III: MODELLO E STRUTTURA

7. Replicabilità e declinazione del protocollo ottimizzato su casi studio tipologici di configurazione strutturali complesse 213

7.1 Il componente costruttivo. Monitoraggio del sistema strutturale voltato nello Scalone Lorenese, presso il complesso degli Uffizi (Firenze, Italia) 215

- 7.1.1. Le criticità osservate e la richiesta conoscitiva 217
- 7.1.2. L'azione di documentazione 2018-2019 219
- 7.1.3. Il contributo della modellazione all'esigenza diagnostica dei componenti costruttivi 226

7.2 L'unità resistente. Modellazione e analisi di emergenza nel contesto architettonico terremotato di Campli (Teramo, Italia) 235

- 7.2.1. Il quadro di indagine in sito e la richiesta conoscitiva 236
- 7.2.2. L'azione di documentazione: fast e slow survey a confronto 238
- 7.2.3. La modellazione come metodo di certificazione ed affinamento di valutazione meccanica per l'esigenza diagnostica dell'unità resistente 244

7.3 Il complesso architettonico. La documentazione dell'instabilità strutturale nelle rovine del sito di Pokcha (Upper Kama, Russia) 249

- 7.3.1. Il quadro di indagine in sito e la richiesta conoscitiva 253
- 7.3.2. L'azione di documentazione: l'integrazione di dati spaziali per la forma completa 254
- 7.3.3. La modellazione come opportunità di mappatura dei meccanismi di instabilità per gli apparati unitari 261

7.3 L'aggregato urbano: un sistema informativo per la valutazione strutturale estesa al tessuto stratificato (Betlemme, Palestina) 265

- 7.4.1. Il quadro di indagine in sito e la richiesta conoscitiva 267
- 7.4.2. L'azione di documentazione estensiva sul tessuto urbano 272
- 7.4.3. La modellazione come strumento di controllo per la classificazione delle instabilità sull'aggregato urbano 278

Conclusioni 289

Bibliografia

Crediti

Abstract



Premessa

“Oggi non contiamo sulla nostra conoscenza del costruire, [...] ma sulla risposta dei modelli meccanici con cui schematizziamo la struttura. E dove mancano i modelli meccanici e gli algoritmi corrispondenti, come appunto nella tecnica muraria, il nostro approccio è inerme.”¹

La predisposizione di pratiche di tutela al patrimonio architettonico, sia nell'ambito di interventi di pura conservazione che nel caso di progetti di riuso e riabilitazione funzionale, pone in evidenza tra i molteplici livelli di analisi dell'impianto edilizio (sviluppati con interdisciplinarietà trasversale tra progetto compositivo, sistema tecnologico-funzionale e pianificazione urbanistica-territoriale) quello del comportamento strutturale dei fabbricati, inteso nella capacità di risposta della componente architettonica resistente a sollecitazioni di carattere meccanico, valutabili dalla scala muraria al manufatto edilizio nel sistema del tessuto urbano. L'analisi strutturale, con un percorso di evoluzione storica che ne ha influenzato assunti ed applicazioni pratiche in relazione all'eterno connubio delle ragioni di Arte e Scienza², rappresenta oggi un campo di ricerca complesso assegnato ad operatori prevalentemente attinenti i settori ingegneristici. Inoltre, essa è orientata, ai fini della sicurezza congiunta di edificio ed utenti, verso risultati di natura quantitativa numerica derivanti da sperimentazioni di sollecitazione meccanica e simulazione dinamica, già predisposti per corrispondere alle soglie di valutazione delle normative. Tali operazioni sono solite produrre elaborati codificati, di carattere preferenzialmente numerico e schematico che, pur definendo il riscontro di grandezze statiche e cinematiche univoche, richiedono algoritmi e competenze specifiche istituendo difficoltà settoriali nella comunicazione globale ed integrata dei dati rilevati.

Proprio il rapporto tra Realtà ed Astrazione è alla base di una trattazione odierna concettualmente sbilanciata

sull'*idealizzazione formale*³ degli apparati strutturali: la difficoltà di trasposizione grafica di fenomeni e grandezze per loro natura o dimensione non sempre visibili, quali distribuzioni tensionali e deformazioni plastiche, su sistemi morfologicamente complessi e non omogenei ha indotto ad una reticenza di approfondimento di tale tema attraverso le metodologie grafiche, destinandolo prevalentemente al settore ingegneristico-matematico per le procedure di geometrizzazione richieste dalla formulazione algoritmica. Le strutture ingegneristiche, così forzate a processi di semplificazione schematici, quasi signfici, esprimono nel confronto con la controparte reale architettonica tutte le incoerenze derivanti dalla modellazione sintetica adottata in via computazionale. Sono prodotti apparati scheletrici, “scarni” della complessa ma reale imperfezione costruttiva e storica, ed impoveriti nella propria identità morfologica di dettaglio, che per prima ne è invece parametro di espressione fenomenica per comportamenti ed effetti meccanici⁴.

Lo studio della struttura in quanto *Forma* costituisce così la premessa della ricerca qui esposta: la “visibile” morfologia architettonica diviene una chiave di lettura del comportamento statico edilizio, espressa attraverso segni di lesione, deformazione e spostamento quali sintomi di stadi di sollecitazione e tensione. Proprio in funzione di tali parametri formali si persegue la scelta di documentare i comportamenti strutturali dei manufatti architettonici attraverso proprietà e variazioni delle superfici degli apparati murari, osservate, comprese e trasmesse con metodi e strumenti attinenti alla disciplina della Rappresentazione,

finalizzati nella loro funzione tecnico-comunicativa a definire una corrispondente Immagine che sia espressione del significato statico dell'opera.

La ricerca proposta, su tali basi, vuole recuperare il ruolo della grafica nell'ambito strutturale, concentrandosi sulle possibilità offerte dalle odierne metodologie di acquisizione, ricostruzione e sintesi dell'immagine virtuale nella percezione e rappresentazione della forma architettonica. In particolare, attraverso l'applicazione di tecniche di rilevamento digitale per la definizione di modelli 3D affidabili, si tenta di individuare protocolli funzionali alla documentazione dei comportamenti statici con procedure di indagine non invasiva, svincolate dall'allestimento di specifici laboratori di ingegneria sperimentale e capaci di mobilitare speditive azioni congiunte di monitoraggio in sito per contesti di emergenza.

L'esperienza storica delle problematiche di danno e cedimento interessanti l'architettura civile ed i tessuti urbani⁵ focalizza l'attenzione sulla necessità di un coinvolgimento accademico e professionale multidisciplinare nell'indagine strutturale, per la definizione di archivi integrati capaci di fornire una conoscenza completa e globale dell'oggetto architettonico ed individuare, tra le tante variabili, le cause di sollecitazione specifiche della criticità formale. Tali considerazioni portano ad evidenziare come gli studi specialistici coinvolti necessitano di un'iniziativa di sintesi unitaria, richiedendo alla disciplina della Rappresentazione l'importante compito di governare la complessità del reale per fornire strumenti di controllo su cui fondare l'intero apparato di studio.

In che termini può il Disegno ricostituirsi come entità formale, linguaggio, capace di raccogliere e comunicare dati inerenti il sistema strutturale architettonico, declinati nelle molteplici variazioni formali e tecniche? E quale contributo può comportare la sua applicazione attraverso modelli virtuali, numerici e parametrici, nella duplice funzionalità di archivi metrici qualitativi e database grafici quantitativi?

Attraverso differenti contesti di indagine e sperimentazione, la ricerca si conforma ad indagare il sistema strutturale nell'architettura storica nello sforzo di verificare codici e linguaggi grafici per la definizione di soluzioni al problema documentativo, di sintesi e computativo di modelli comportamentali meccanici, aderenti e congruenti alle casistiche presentate dall'ampio panorama dell'edilizia storica occidentale.

I casi studio affrontati ricalcano una varietà di forme strutturali murarie riscontrabili nel bacino europeo, indagate alla duplice scala: dalla fabbrica architettonica, focalizzandosi sui paramenti costruttivi e sulla documentazione del loro comportamento statico e cinematico, per poi espandere il processo alle interrelazioni strutturali sviluppabili tra unità ed aggregati all'interno delle diverse conformazioni assunte dai complessi storici e tessuti urbani. In tal modo, le metodologie proposte esprimono e convalidano la loro applicabilità nello studio di configurazioni strutturali, in laterizio, pietra, lignee e miste, adottate per apparati, monumenti e comparti tipologici nei centri storici di città della Svizzera, Italia, Russia e Medio Oriente.



La scelta dei casi studio, all'interno di progetti di ricerca più ampi sviluppati dalla collaborazione tra Laboratori di ricerca universitari ed enti coinvolti nazionali ed esteri⁵, è legata alle opportunità di partecipazione presentatesi durante il percorso di dottorato (2016-2019), che hanno permesso un approccio multidisciplinare congiunto ai singoli progetti, validato nel doppio orientamento accademico e professionale dalla collaborazione con i partner di progetto. L'interdisciplinarietà adottata nello sviluppo di metodi e processi integrati ha permesso un approccio consapevole nei confronti delle problematiche architettoniche del patrimonio costruito storico, con il riferimento costante delle richieste del settore professionale e di squadre di intervento nell'ambito della conoscenza e strutturazione di informazioni necessarie alla conservazione e gestione programmata dei siti.

La tesi è sviluppata attraverso un percorso che dall'introduzione all'oggetto di ricerca, esplicitato nelle ragioni teoriche e metodologiche che nel tempo hanno legittimato la definizione e l'evoluzione del disegno per lo studio dei sistemi strutturali, pone i presupposti alla conseguente rassegna di motivazioni e risultati ottenuti dall'applicazione degli strumenti grafici per la sintesi ed espressione di meccanismi costruttivi, comportamenti fisici e funzionali. Grandezze e variabili di natura vettoriale sono sostenute dal progressivo affermarsi di processi di astrazione grafica per la figurazione e comunicazione di leggi statiche e formulazioni empiriche, dalle sperimentazioni su manufatti edilizi reali e concreti.

I codici e linguaggi grafici applicabili alla conoscenza strutturale, nella volontà di sintetizzare il problema comunicativo della statica delle fabbriche storiche nella sua valenza formale, rendono necessario condurre la ricerca a partire dalle ragioni di astrazione signica e schematica fino alla valenza mimetica dell'immagine, raggiungendo la configurazione di parametri e descrittori per comprendere il valore e ruolo della forma strutturale e la sua scomposizione in componenti, unità e livelli informativi. Tali operazioni evidenziano intrinsecamente la distinzione della ricerca tra rilevamento e rappresentazione, il primo critico-strumentale, la seconda con il compito di strutturare informazioni sugli elementi resistenti, sulle loro proprietà e relazioni all'interno della struttura architettonica, e per questo necessitante di un'organizzazione su criteri logici ed algoritmi grafici specifici che consentano, con opportune sequenze interpretative, la decodifica del comportamento fenomenico.

Ne emerge come l'affermarsi dell'era digitale e dei suoi prodotti, espressi in codici computazionali e memorie *byte* indipendentemente dalla loro natura di formato immagine o numerico, possa fornire una base tecnica su cui sviluppare processi di re-integrazione tra i due livelli di analisi, formale e di calcolo, relativi alla componente strutturale in architettura ed alla sua definizione sia geometrico-figurale che fisico-computazionale. L'obiettivo è di indagare il contributo apportabile dal disegno e dalla modellazione virtuale come veicoli grafici di comunicazione del messaggio referenziale dell'informazione strutturale, nei

loro contenuti morfologici e nei corrispondenti impliciti e derivanti dati analitico/matematici, sviluppando approcci univoci, immediati e ad ampio raggio comunicativo tra dato fisico-numerico e disegno architettonico.

La chiave di interpretazione è ricondotta all'esplicitazione del connubio di Forma e Modello, intesi come entità di sintesi percettiva ed elaborati comunicativi, capaci di raccogliere ed interpretare dati inerenti il sistema strutturale quale componente fondante della fabbrica architettonica, declinato dalle molteplici variazioni formali e tecniche all'esplicitazione delle relazioni significanti di conoscenza geometrica e computazionale del manufatto. In un approccio che tenta di proiettarsi oltre la settorialità delle discipline architettoniche, la ricerca riparte dal disegno e delle sue ragioni di comunicazione tecnica per la comprensione degli schemi comportamentali dell'architettura, in cui *“la forma è la possibilità della struttura.”*⁶

Note

1 Cit. Giuffrè A. (1994). Una proposta di restauro per la Colonna di Marco Aurelio. *Palladio*, nuova serie, anno VII, n. 14, luglio-dicembre 1994, p.1-17.

2 Connubio storico evolutosi nel tempo, con le richieste di interdisciplinarietà delle professioni specializzanti di Ingegnere e Architetto, ma ancora non sufficientemente superato, rimarcando una quasi ostinata divisione interprofessionale tra un Sapere Teorico, ingenuamente mantenuto al livello di previsione ideale astratta e protetto dal confronto con l'imperfetta realtà, e un Sapere Pratico, eccessivamente a contatto con l'esperienza concreta del contesto edilizio da ritenersi estraneo a necessità computazionali.

3 La ricerca esposta non approfondisce l'ambito della valutazione di parametri relativi alle qualità meccaniche della Scienza dei Materiali, consapevole di quanto la loro definizione in ambito dell'edilizia storica sia di difficile misurazione ed aleatoria certezza. L'intenzione delle sperimentazioni presentate nella seguente tesi, approfondite nel seguito, è quella di suggerire una via parallela per la valutazione comportamentale delle strutture storiche basata su una variante fisica dei componenti resistenti di accertabile misurazione e trasposizione per l'analisi: la forma.

4 Lo sviluppo di modelli strutturali *truss* "beam&column" (modelli tensionali "trave-pilastro") esemplifica tale assunto, attraverso una schematizzazione iconica dell'apparato strutturale in componenti dimensionali semplificati a variabili gradi di libertà e vincoli di articolazione. In tal modo, i maschi murari si trasmutano in aste longitudinali monolitiche nell'interpretazione di "bielle" statiche, perdendo la complessità morfologica e comportamentale rappresentata dalla loro imperfezione costruttiva e data dalla giustapposizione di varietà di blocchi resistenti e loro soluzioni di allettamento.

5 Le attività di ricerca, dalle quali derivano gli approfondimenti condotti durante il triennio di dottorato 2016-2019, rientrano in progetti di ricerca nazionali ed internazionali sviluppati dal Laboratorio di Ricerca e Didattica DAda Lab. dell'Università degli Studi di Pavia e dal Laboratorio congiunto Interateneo LS3D Landscape Survey & Design dell'Università di Pavia e Università di Firenze. I progetti di ricerca hanno previsto la collaborazione di docenti, ricercatori, collaboratori, dottorandi e studenti di entrambe le università, sviluppando azioni congiunte tra ricerca dipartimentale e didattica universitaria condotta all'interno di corsi, seminari e *summer schools* della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia. A tali attività, la sottoscritta ha partecipato in qualità di collaboratrice, coordinatrice o tutor, così come indicato in dettaglio nella sezione dei crediti.

6 Cfr. Wittgenstein L. (2016). *Tractatus Logico-Philosophicus*. [S.l.]: Chiron Academic Press.

Immagini delle pagine precedenti

Pagina 6: macerie del centro storico di Amatrice, dopo il sisma del 2016.

Pagina 9: Fernando Botero, "Earthquake in Popayán", 2000.

PARTE I
STRUTTURA E FORMA



CAPITOLO 1

La Struttura in architettura: definizione, relazioni ed espressione

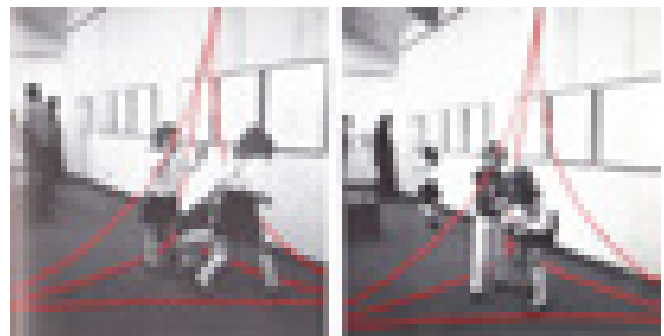
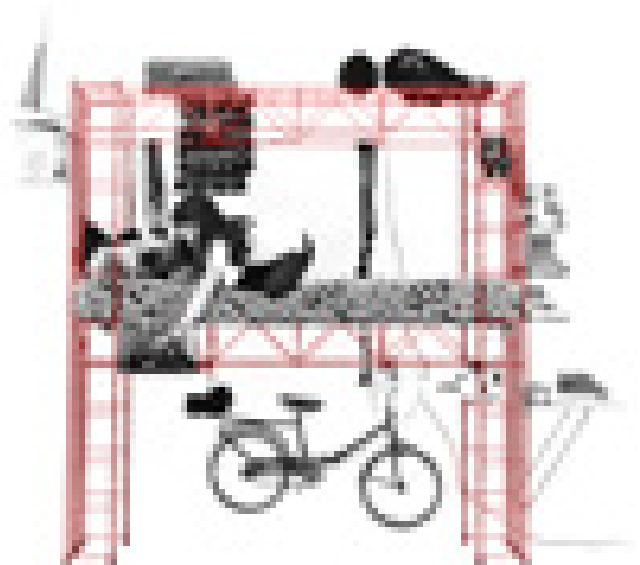
“Per farla breve, vedere, come rappresentare, è un verbo transitivo che richiede un oggetto.”¹

Parlare di ‘struttura’, nello specifico termine, comporta valutare la trattazione di un oggetto della ricerca legato ad un esteso campo tematico di discipline, al quale l’uso contemporaneo del termine è differentemente riferito nel suo valore originario. Le scienze umane e sociali hanno raccolto la declinazione della parola a partire dal suo legame con l’architettura, concentrandola progressivamente in campi di maggiore dinamismo teorico, come la linguistica, la sociologia e l’arte. La definizione di ‘struttura’ si è delinata tra le figurazioni concettuali di più conoscenze espresse in termini di teoria e pratica dei componenti materiali o di valore e dei loro modi di connessione o relazione, interpretando differentemente i significati di ‘sistema’, ‘forma’, ‘organizzazione’ e ‘modello’².

Tale corrispondenza concentra l’adozione del termine ‘struttura’ in relazione allo studio di apparati di carattere materico e fisico, indirizzandone una tripla declinazione del termine di valenza logica-estetica-comportamentale³ in architettura e ingegneria. Ne risulta che la sua trattazione come ‘forma’, concreta, invece che come ‘schema’, significativa, riferita alle opere costruite si attesta semioticamente solo in maniera secondaria⁴, riconosciuta in modo specifico limitatamente alle arti visuali ed alla composizione nonostante la paternità architettonica del carattere semantico⁵.

Struttura e architettura individuano una relazione che, per quanto complessa da definire nella discussa corrispondenza o gerarchia tra le due componenti⁶, da sempre caratterizza la pratica del costruire, lasciando che a tali variabili sia destinato un ruolo d’azione reciproca, armonica o conflittuale, generando alternamente coesioni o incoerenze plastiche⁷.

A sinistra: Maurits Cornelis Escher, “La Galleria di Stampe”, 1956. Manipolazione della struttura dell’immagine sulla gerarchia visuale.

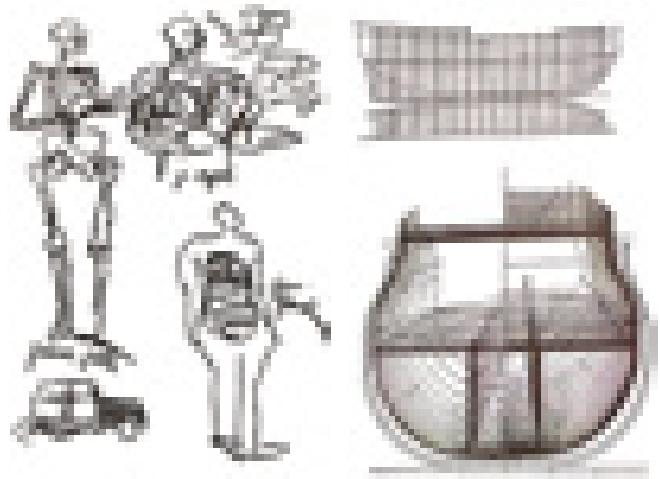


L’opera artistica di Munari evidenzia, non solo metaforicamente, le valenze possibili per l’entità ‘struttura’: essa è forma in equilibrio, organizzazione logica di elementi, e così delimitazione di spazio, fisicamente percepito sia come proprio che come proiettato. Al contempo, la struttura stessa è base di impostazione di apparati, supplementi, geometrie e modularità, nel contesto delle quali hanno luogo gli eventi della società. Non per ultimo, essa è espressione visuale. Bruno Munari, (1.1) “Abitacolo”, 1971; (1.2) “Flexy”, 1968.

“Mutuata direttamente dal lessico architettonico, la parola struttura ha visto allargarsi sempre più, nella cultura moderna, il campo delle sue applicazioni: dal senso costruttivo del termine”⁸, legato alla geometria materica del suo sistema e degli elementi costituenti, a definire “l’idea di un modello astratto e generale, in cui le parti fossero disposte secondo rapporti reciproci, e che non escludesse l’esistenza di strutture concrete e particolari”⁹. Tale dicotomia concettuale, dalla figurazione comportamentale ‘virtuale’ alla controparte materica di modello ‘reale’, indirizza un’intrinseca definizione dell’oggetto ‘struttura’, intesa al contempo come fisica e visibile, e come fenomenica e tensionale; soddisfacendo in modo esteso, seppur non approfondito, il panorama delle scienze architettoniche, fisiche e matematiche.

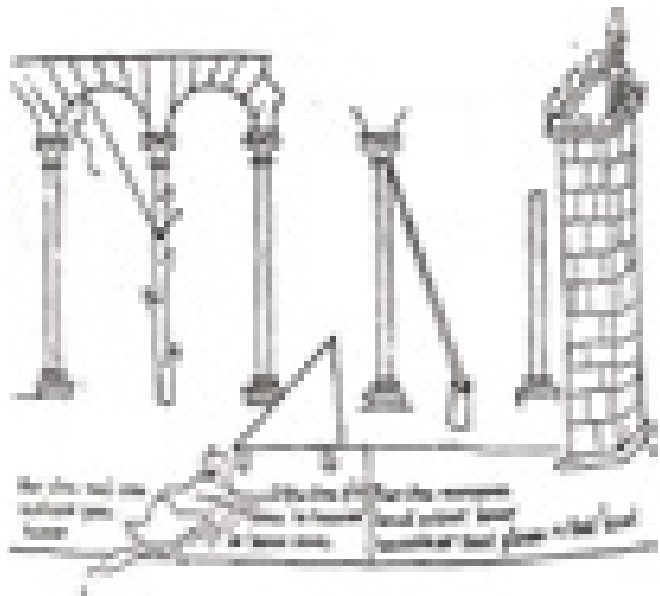
Con ‘struttura’, si identifica così un sistema organizzativo, sia formale che finalistico, di elementi relazionati tra loro, atti ad assolvere una primaria funzione resistente nella fisicità materica dell’opera architettonica. Chiave di interpretazione ed indirizzo di tale fenomenologia statica è la stessa ricerca di una riconoscibilità della ‘struttura’ a partire dall’inviluppo della fabbrica costruita, definibile sulla garanzia di parametri di invariabilità del sistema-base¹⁰ che si conservano nonostante la mutevolezza formale consentita dalla tecnologia edilizia.

Un carattere, quello costruttivo, che il termine, per quanto non solo dipendente dalla genesi di ‘costruzione’, continua a condividere nei metodi di analisi ed espressione, a partire dalla stessa radice etimologica, tanto che la struttura risulta spesso confusa o, altrimenti, interamente inclusa nell’apparato costruttivo dell’opera. Tale disagio è comprensibile se inteso in relazione al generale approccio di studio all’oggetto attraverso i campi di arte e scienza delle costruzioni, dove metodo e risultato tendono a confondersi e ad assimilare forma e composizione a predominanti valutazioni di carattere tecnico e meccanico. In termini di livelli costitutivi, quali base morfologica e trama organizzativa, le più sottili trattazioni di ‘struttura’ come corpo organizzato, formalizzazione di elementi e modello di conformità¹¹ prendono vita. Si anticipa così una natura del termine come interpretazione formale per la comprensione meccanica, sia mediante la nozione di ‘modello’¹² che, di conseguenza, mediante la ricerca di un maggior rigore, geometrico e logico, sulla manipolazione delle sue differenti realtà di ‘forma’¹³.



Sopra, a sinistra: (1.3) Le Corbusier ‘I fondamentali sistemi strutturali del corpo umano’, 1929. A destra: (1.4) disegno esecutivo di uno scafo di nave, secolo XVIII.

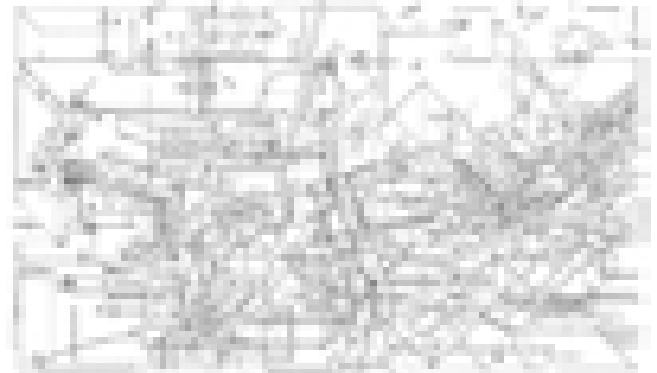
‘Sostentamento’, ‘metabolismo’ e ‘movimento’ sono definiti come caratteri di modellazione per la più tangibile struttura fisica di contatto, e per omomorfismo concettuale si trovano riapplicati anche all’architettura ed alle opere costruttive. L’organismo di analisi è pensato oltre il visibile, compreso e scomposto in componenti fondamentali per la sussistenza del suo schema. Tali elementi di composizione della struttura, per quanto diversificati per contesto, tecnologia ed utilità, non possono prescindere da alcuni tratti fondamentali: la continuità del dominio, la riconoscibilità dei suoi apparati ed elementi, la comprensione della loro relazione reciproca..
Sotto: (1.5) Villard De Honnecourt ‘Elementi di cantiere’ (XII-XIII sec).



1.1 Livelli di interpretazione e manipolazione per una definizione visuale dell'entità strutturale

La duplice intesa di 'struttura' architettonica tra forma e meccanica, come principale interpretazione per la sua percezione e trasposizione nell'analisi scientifica, richiama un insieme di valenze logica-estetica-comportamentale. Le conseguenti classi di interpretazione introducono così un primo livello di approfondimento al tema¹⁴, secondo caratteri e definizioni di comprensione visuale.

Sistemi e criteri di descrizione, sia qualitativi che parametrici, sono ampliabili per ciascuna di tali valenze, conducendo a settori di approfondimento e linguaggi di espressione che, seppur universalmente riconosciuti, conducono in realtà a dialoghi dispersivi nel momento della loro interazione. Dalle categorie estetiche di aggregazione e ripartizione delle componenti strutturali¹⁵, agli accordi dimensionali fra parti definiti dalla regola dell'arte¹⁶, fino agli assetti costruttivi e di coordinamento spaziale del sistema resistente¹⁷, la compresenza di metodi geometrici e formulazioni empiriche



Sinistra: (1.6) Fedor Dostoevskij, *Appunti e disegni di per "I fratelli Karamazov"*, 1879.

Sopra: (1.7) Daniel Libeskind, *"Micromegas Project"*, 1979.

Valenze strutturali in termini di organizzazione, schematizzazione e gerarchizzazione dell'informazione e del pensiero dietro al processo ideativo. L'interazione tra componenti e sistema trova espressione spontanea attraverso la consapevole gestione di forme e segni nello spazio, guidando la comprensione dell'intero insieme a partire dalla somma e reciprocità delle singole parti.

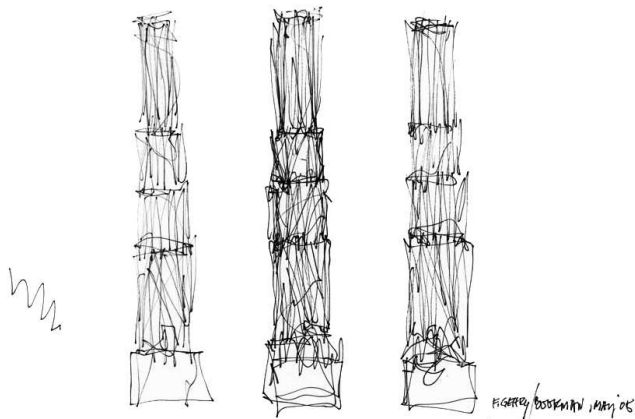
Così, nella creazione letteraria come nel progetto costruttivo, per quanto distopico, sono i caratteri di aggregazione, gerarchia e ripartizione a coordinare un insieme di segni/caratteri e a conferirgli senso. A tale struttura è assegnato l'intento comunicativo dell'autore, e sempre la struttura diviene obiettivo di identificazione da parte del fruitore per la comprensione ed analisi del contesto.

rischia di discriminare una divisione interna all'atto conoscitivo della struttura, con una separazione metodologica e cognitiva del quadro reale in concetti visualmente immateriali ma classificabili per linguaggio informativo ed analitico.

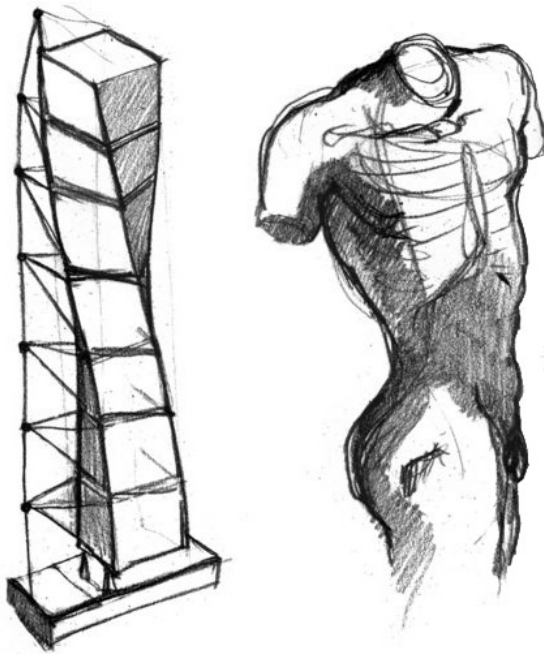
Il concetto di 'struttura' rappresenta in tal modo una nozione feconda, per tutte le interpretazioni disciplinari che la includono, e richiama la 'forma' quale termine di collegamento per unificare in maniera espressiva teorie distanti, pur con una corretta distinzione tra modello trasposto e oggetto concreto, tra rapporti latenti e rapporti reali¹⁸.

Tale complessità di definizione linguistica¹⁹ evidenzia la multidisciplinarietà della ricerca applicata al tema e l'esigenza di un lessico concettuale capace di raccogliere e comunicare dati inerenti il sistema strutturale pur declinati nelle molteplici variazioni formali e tecniche,





Escultura ③ torze deoidal



Dall'alto: (1.8) Frank Gehry, "Beekam tower", New York, struttura concettuale, 2006; (1.9) Santiago Calatrava, "Turning Torso Tower", Malmo, struttura statica, 1999; (1.10) Anselm Kiefer, "I Sette Palazzi Celesti", installazione permanente, Pirelli HangarBicocca Milano, materia della struttura simbolica, 2004.

L'archetipo della torre evidenzia la complicità di significati mantenuti nel soggetto della 'struttura' costruttivamente intesa: il limite concettuale che ne è genesi formale, lo scarico tensionale di corpo in equilibrio, la matericità dei moduli costitutivi nella connessione di insieme.

tra le quali nei settori di architettura ed ingegneria. È così auspicata, per gli studi specialistici coinvolti, una sintesi unitaria di linguaggio cognitivo, che sembra identificare i suoi valori di classificazione nell'esperienza della disciplina di espressione grafica²⁰. Il vocabolario visuale, nella sua duplice natura di risposta percettiva e mezzo comunicativo, è posto come mezzo privilegiato di sintesi per riconoscere, all'interno dei molteplici e strutturati livelli di interpretazione, delle chiavi di comprensione e classificazione per l'immagine della 'struttura', particolarmente attinenti alla natura simbolica e sintetica della sua comunicazione attuale.



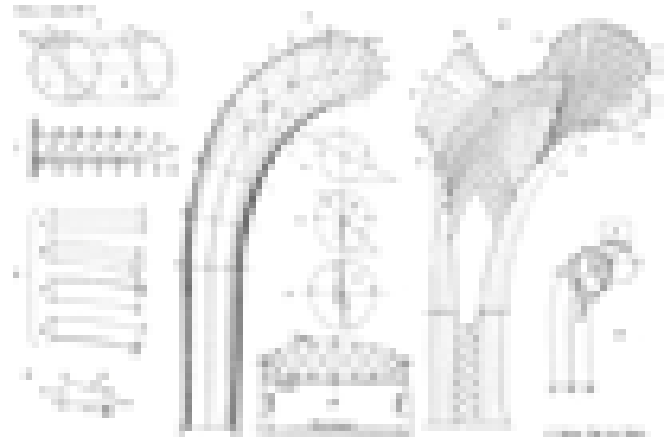
È proprio attraverso l'espressione della realtà fisica in termini di entità visualmente percepibili che l'informazione strutturale è chiarificata e, resistendo alle estese e complesse modalità di manipolazione della sua immagine-modello²¹, riesce a designare una rosa di rapporti costanti di "insieme, parti di insieme, rapporti di queste parti fra loro nella configurazione dell'insieme stesso"²².

In tali termini, l'oggetto strutturale necessita di essere analizzato tenendo in considerazione la compresenza delle componenti stesse, spesso disomogenee in materia e geometria, e la loro distinzione di identità costruttiva e finalistica, permettendo di definire univocamente 'unità' fondamentali che indirizzino l'approccio di studio in termini di 'connessione'.

La struttura è poi intesa come 'limite' spaziale, definito dall'intradosso degli elementi costruttivi all'involucro esterno complessivo, in relazione critica con la 'pelle' edilizia. Un limite soggetto a notevoli trasformazioni, dalla disposizione di scheletri strutturali coincidenti con la scatola muraria stessa fino a ridursi a componente dell'intero sistema, inglobato negli apparati dell'organismo edilizio e di critica percezione visiva. Ne consegue che ogni configurazione si basi sulla relazione reciproca tra la morfologia degli elementi che definiscono la struttura ed il loro involuppo, la superficie liminare della struttura stessa.

Così, il limite come 'forma' del componente strutturale espone una varietà di espansioni e contrazioni morfologiche riconducibili alla varietà comportamentale sofferta dall'elemento, che attraverso la sua forma è manipolato da forze fenomeniche. Il riferimento alla funzione *statica* come variabile di interpretazione delle strutture storiche, infine, codifica un livello di conoscenza combinato ai particolari schemi resistenti. Un ordine del concetto di

'firmitas' che consegue la finalizzazione di un 'sistema' delle corrispondenze tra fenomeni statici ed oggetti strutturali, nelle loro unità e limiti definiti. In tal caso, le inaspettate connessioni tra generi figurativi e tipologici diversi (come il telaio, l'arco, le strutture sospese) e le forme progettuali adottate individuano variabili morfo-grafiche in grado di interpretare, se non agire, su quei generi figurativi stessi, individuando attraverso una formulazione empirica le categorie formali di appartenenza.

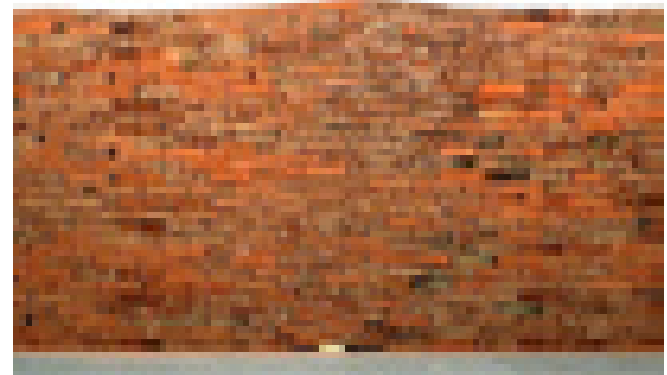


Sopra: (1.11) Julius Wolff, diagramma di confronto per forma tra strutture statiche: la gru Faibairn e la testa femorale ossea, 1892.

"Every change in the form and function of the bones, or of their function alone, is followed by certain definite changes in their internal architecture, and equally definite secondary alterations of their external conformation, in accordance with mathematical laws." (J. Wolff)

A destra: (1.12) Jorge Méndez Blake, "El Castillo", installazione artistica contemporanea, 2007.

Operando in rapporto all'atto costruttivo, Méndez dona una dimensione fisica nello spazio all'azione di disturbo tensionale esercitata su una struttura muraria, in tal caso metaforicamente interpretata da un libro. Nella solidità dell'opera strutturale, al contempo simbolicamente esaltata come forma conclusa, pattern costruttivo di tessitura, unità materica, l'onda di alterazione generata da un singolo elemento di disturbo si ripercuote ugualmente su tutti questi livelli di espressione della struttura. La forma, come tensione della materia, influenza la forma, ancora a sua volta come struttura in tensione.



1.1.1. STRUTTURA come UNITÀ, per la disposizione di identità e schemi di connessione

“Un progetto buono è una struttura, un insieme al quale non può essere aggiunto, tolto o sostituito nulla senza causare la perdita dell'unità.”²³

La definizione di *struttura* come costituzione e distribuzione di elementi in rapporto di correlazione e d'interdipendenza funzionale tra loro conduce a conformazioni multiple, su componenti e tecnologie, riunite nell'obiettivo primario di definire un 'complesso organico', come “entità funzionalmente unitaria risultante dalle relazioni reciproche dei suoi elementi costitutivi”²⁴. L'attenzione si rivolge così prevalentemente all'aspetto di 'legante' che la struttura assume tra gli elementi dell'opera architettonica, racchiudendo nel suo dominio tutta l'entità di insieme, ovvero “il complesso o la parte stessa risultanti dall'insieme degli elementi componenti”²⁵. Si arriva in tal senso ad una declinazione più specifica, di statica delle costruzioni ampiamente condivisa nell'ambito dell'architettura, di 'ossatura' o 'scheletro portante’²⁶.

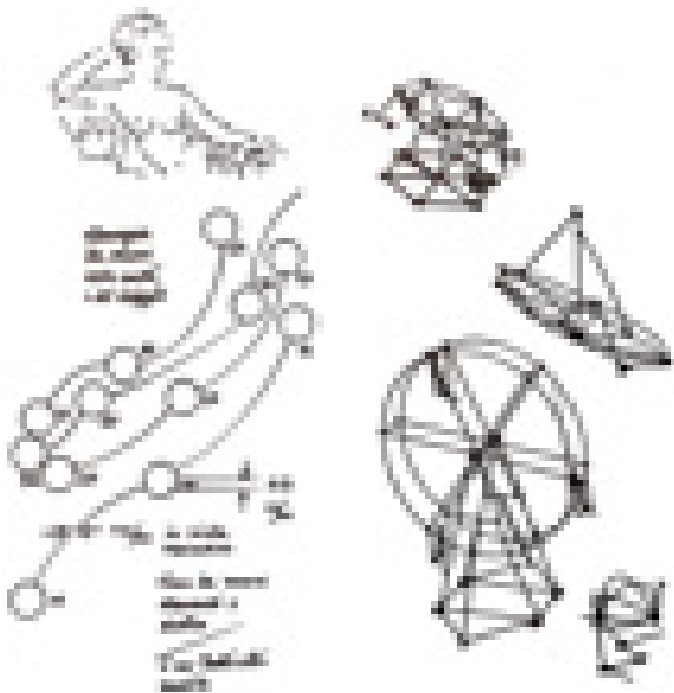
L'approccio alla struttura come unità è inoltre influenzato in maniera diretta dalla scala di indagine dell'apparato, il quale da un punto di vista geometrico-visuale può essere scomposto in singolarità fondamentali riconoscibili, in termini sia formali che tecnologici, e schematizzabili nei reciproci rapporti di forma e funzione per risalire all'origine progettuale dell'opera.

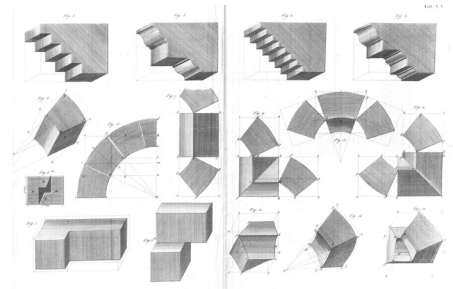
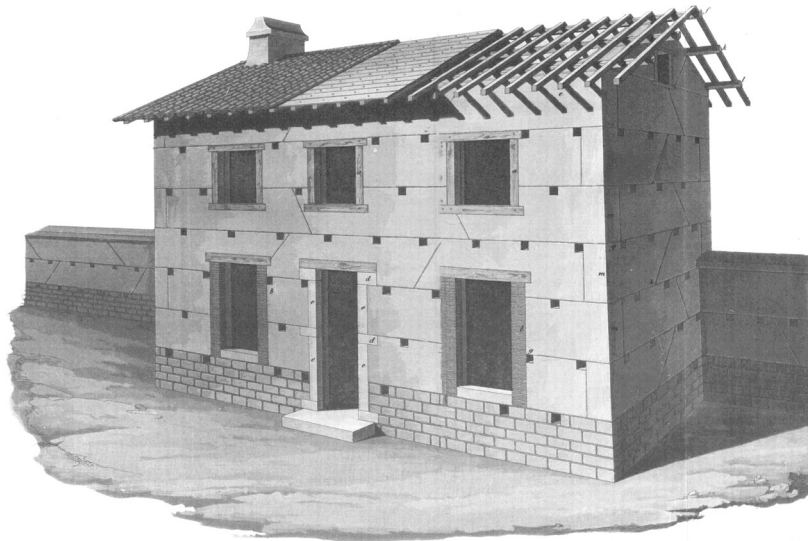
L'analisi di una geometria di insieme, quale punto di partenza nell'approccio alla struttura storica, non può quindi prescindere dal riconoscimento di 'cellule costruttive' di base in rapporto di contiguità tra loro attraverso la disposizione di 'soluzioni di connessione'. La percezione conoscitiva che ne deriva si sviluppa così dalla sola combinazione di elementi ad un tutto formato da fenomeni solidali, tali che ciascuno dipende dagli altri e può essere quello che è solo nella e per la sua relazione con essi, conducendo ad un oggetto di indagine che va oltre l'assemblaggio di elementi verso una “struttura compatta e, nei limiti del possibile, integra e unitaria”²⁷.

È proprio nella definizione della scala dimensionale di tali cellule e dei corrispondenti meccanismi di connessione che risiede il livello di identificazione e scomposizione del sistema, e da esso sono declinate le corrispondenti variabili morfologiche e critiche di indagine e modellazione. Ne deriva una rappresentazione dell'unità strutturale che è elaborata secondo i parametri formali di una avanzata 'regola costitutiva'²⁸, quale caratteristica del processo che ne regola la comprensione, e di 'disposizione', per identificarne la collocazione precisa ed i rapporti geometrici che in virtù di tale caratteristica spaziale possono essere ricostruiti.

La categorizzazione risultante declina la struttura in quanto “sistema di relazioni latente nell'oggetto”, come rapporto visivo e logico di unione delle parti in una totalità, dove il cambiamento di un elemento, dalla tessitura al blocco, genera un riflesso a catena su tutti gli altri in una “unitas multiplex”²⁹ di ampio respiro. Il sistema, la totalità, prevale sulle singole componenti, che si adeguano in modo dinamico a configurazioni spaziali possibili illimitate.

Riflessioni di funzionalità delle strutture come schemi di 'connessione'. Da sinistra: (1.13) Pino Tovaglia, variazione grafica della scultura di Canova: Paolina Bonaparte, e traccia dello schema della Venere di Botticelli; (1.14) Bruno Munari, “Construct-o-straws”, gioco inglese di costruzioni di cannucce di bibita e piccoli giunti di plastica.



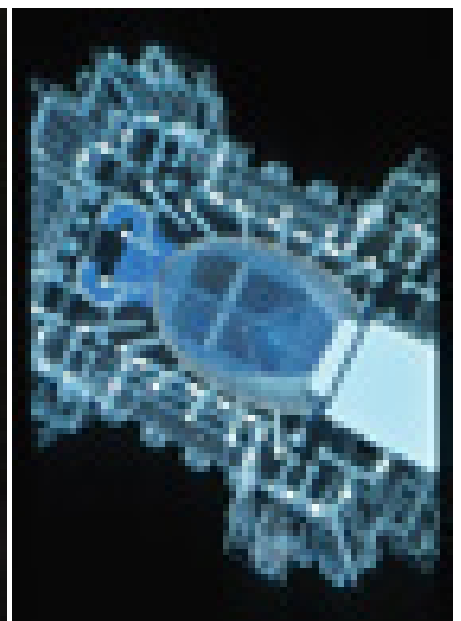
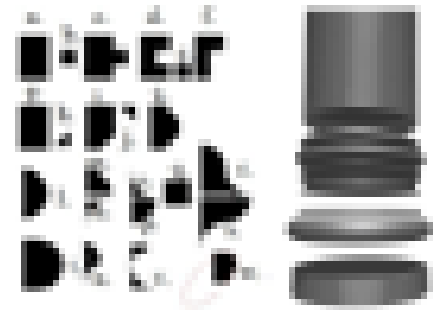


Suddivisione, relazione e rapporto tra elementi modulati alla base della struttura.

Articolazione della scomponibilità costitutiva, dal disegno tecnico alla modellazione: sopra (1.18) J. B. Rondelet, abaco costruttivo di elementi da *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802. Sotto: (1.19) Maurice Murphy, "BIM Shape Grammar", genesi della modellazione tridimensionale, 2012.

La struttura architettonica come scenario di relazioni spaziali tra elementi principali e componenti di connessione, risultanti nella forma percepita e rappresentata. La comunicazione della regola costruttiva, così come il valore tecnologico degli apparati, è affidata alla modulazione di dettaglio dell'immagine. Nella riflessione grafica, il rapporto tra rappresentazione bidimensionale e modellazione spaziale enfatizza l'"unitas multiplex" di relazioni latenti nella fabbrica.

Sopra: (1.15) Jean-Baptiste Rondelet, "Schema di istruzioni per il montaggio di una casa in muri formacei", dal *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802. Sotto: (1.16) (1.17) Tadao Ando, "Nakanoshima Project II, Urban Egg/Space Strata", Osaka, 1998.



1.1.2. STRUTTURA come LIMITE, continuità e forma al contorno

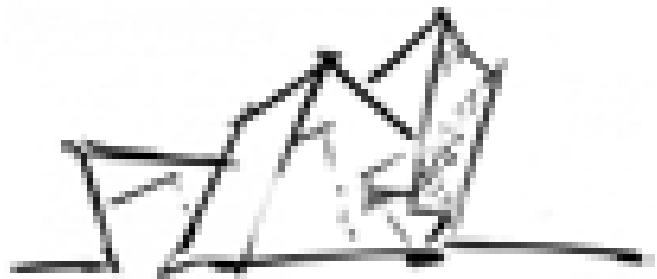
*“Structure is a network of connectivity. An argument has structure, so has a building. From abstraction to concrete realisation, structure joins discrete ideas or elements into a coherent entity. Structure is skeleton or skin, points and lines or fold contour”.*³⁰

Affiancando l'aspetto unitario dell'entità strutturale, la più immediata esperienza visiva porta ad identificare la struttura come entità visuale interagente nella percezione del segno, e per questo interpretabile in corpi, punti, connessioni, linee, e delimitazione, contorno. È nell'attribuzione di una forma che *“la struttura si rende visibile”*³¹, ed attraverso variabili di stratificazione degli apparati è l'architettura stessa ad essere imitazione della struttura esprimendola nel rivestimento possibile di forma e finalità³². Così, in un appurato processo di ricerca ed interpretazione di *“ciò che si cela dietro a rivestimenti e decorazioni”*³³, riscoprendo i contorni resistenti, rimane valida l'analisi di una forma principale, intesa come organica integrità resistente, limitata al contorno, all'interno della quale è riconoscibile una gerarchia di subordinazione degli elementi singoli a generare un *unicum*³⁴.

Parlando di ossature degli edifici quali componenti della struttura, *“conchiusa nella solidità della sua membratura”*³⁵, è facile riscontrarne una lettura che, alla classificazione e suddivisione in componenti tecnico-funzionali, preferisce sostituire livelli di conoscenza critica dell'opera per un'immediatezza percettiva della forma³⁶, orientata sulla macro-scala di conoscenza degli involucri strutturali poi realmente subordinati in blocchi e strati.

La definizione della struttura come dominio del segno, per punti, linee e contorni, è meglio declinata secondo i mezzi espressivi e comunicativi di natura grafica, e pone già una stretta relazione con il concetto di 'immagine' della struttura, e del corrispondente effetto di contrasto simultaneo o successivo tra l'oggetto strutturale e le entità ad esso vicine o al contorno³⁷, incluso lo spazio stesso.

La percezione visuale ed il processo concettuale-immaginativo che sono alla base della sua interpretazione, in veste di segno grafico, finalizzano un indirizzo di analisi nel quale tale forma è per la struttura al tempo stesso rappresentazione di mimesi, interpretazione e sintesi.



L'esaltazione della struttura in quanto 'forma' applica l'entità della linea come generatrice del suo stesso dominio. L'individuazione del contorno spaziale, regolante il suo sviluppo, implica la diretta considerazione delle modalità e caratteristiche di espressione assegnate alla materia che ne viene delimitata. I volumi generati evidenziano la matericità della solidità strutturale, percettivamente pulita dal dettaglio ma spesso alterata dalla sintesi dell'involuppo.

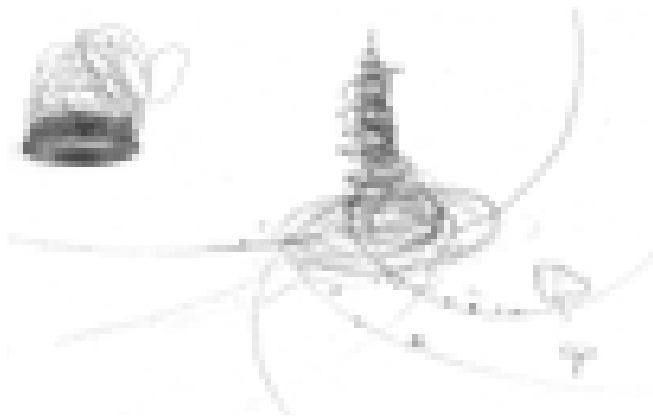
Sopra: (1.20) Daniel Libeskind, “The Villa”, struttura concettuale, 2009.
Sotto: Pont Neuf, Parigi, (1.21) installazione artistica di Christo e Jeanne-Claude, 1985; (1.22) opera originale, costruita nel 1578.





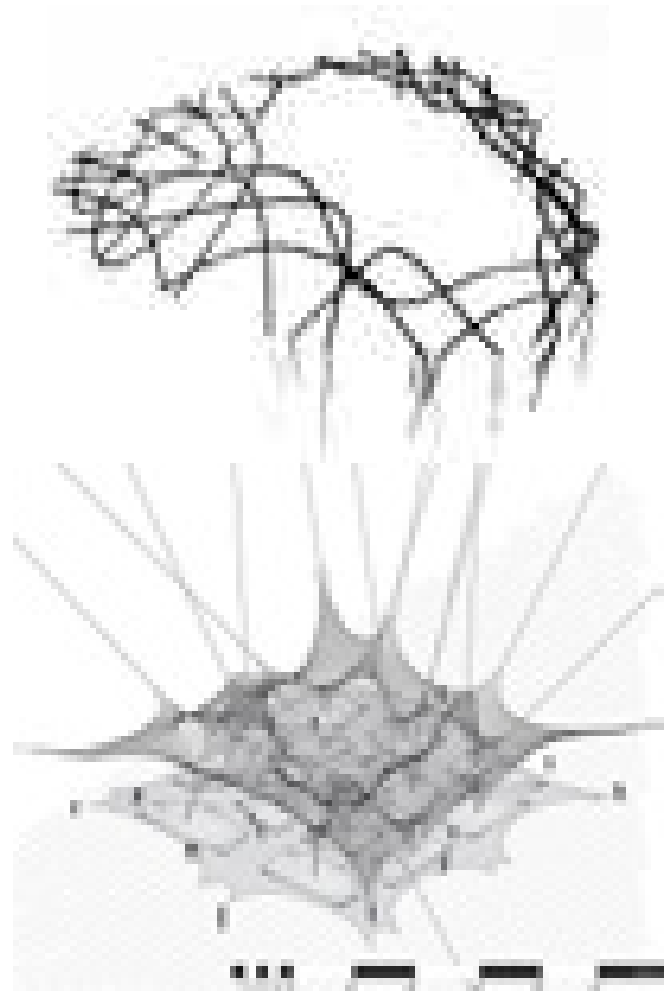
La continuità della linea è applicata per rappresentare una continuità di delimitazione dello spazio, coincidente con la sua struttura primaria. Frammentata o continua, essa individua al tempo stesso sia spazi conclusi che profili portanti, sintetizzando la natura statica del reale.

Sopra: (1.23) Zaha Hadid, "Rosenthal Center for Contemporary Art", struttura concettuale, Cincinnati, 2003. Sotto: (1.24) Anish Kapoor e Cecil Balmond, "Arcelormittal Orbit", Londra, 2012.

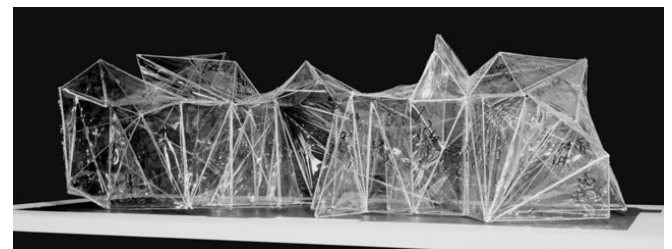


L'esplicitazione del carattere morfologico contestualizza il tema di analisi con un'innata declinazione grafica dell'oggetto strutturale, dove la corrispondenza tra elementi, forme ed immagini è adottata come immediata risposta figurativa alla rappresentazione della membrana strutturale e della sua natura di limite visibile del sistema, spingendosi dalla mimesi fino alla ricostruzione di uno scheletro sinteticamente astratto.

Il limite formale diventa così un sistema signico, e, quale oggetto di indagine per una più estesa analisi strutturale, consacra l'identità non di una sola parte ma dell'intera costruzione, del rapporto tra le parti, della codifica della sua forma esteriore e dell'armonia delle sue misure e geometrie di insieme³⁸.



Evoluzione della complessità signica formale nell'espressione della struttura spaziale attraverso la linea: prima sinteticamente estratta nello schema statico, poi espansa interpolando il telaio in una maglia di tensioni, infine conclusa dall'involuppo di connessione tra spazio e sistema. Sopra: (1.25) Ove Arup, "Actar Arquitectura - Telecommunications Tower on the Turó de la Rovira, diagramma strutturale, Barcellona, 2001; (1.26) Riyad Jouka, "HYBrid BIOStructures", 2012; (1.27) Archigram, "Living City", 1963.



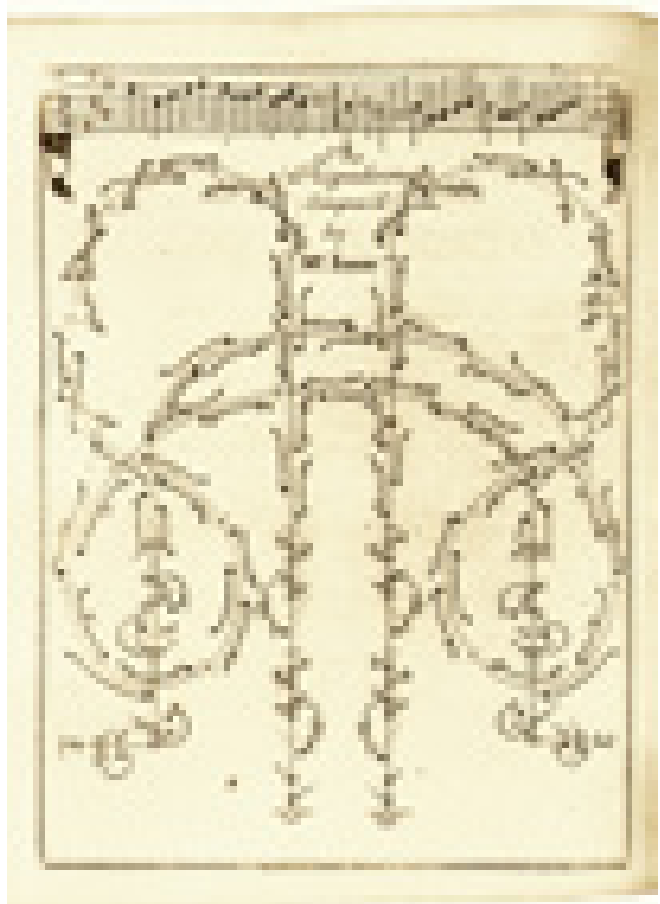
1.1.3. STRUTTURA come SISTEMA, espressione e padronanza della statica formale

“L’invenzione strutturale non può che essere il frutto di un’armoniosa fusione di personale intuizione inventiva e di impersonale, realistica, inviolabile scienza statica.”³⁹

Come parte integrante dell’opera architettonica e, conseguentemente, risultato di un processo costruttivo, la struttura è una creazione antropica sia in termini di idea, progetto, che di realizzazione, composizione tecnica, ma al contrario di più libere espressioni dell’ingegno umano è inevitabile che la componente meccanica rivesta un ruolo significativo. In tal senso, essa riconosce, più di altri apparati, le limitazioni di libertà formali e unitarie all’interno del vincolo di non-contraddizione alle leggi statiche che inquadrano l’equilibrio dell’universo⁴⁰. L’atto costruttivo, che ne presiede la nascita e ne continua a caratterizzare la documentazione, rimanda per questo alla piena padronanza degli sviluppi tensionali e alla *“conoscenza di come questi principi trovino espressione compiuta nell’ampia rosa delle forme strutturali”*⁴¹.

È possibile chiarire una prevalente, stretta e proficua integrazione tra le componenti di ‘morfologia materiale’ e ‘funzione portante’, dove le varianti costruttive generate dalla differente disposizione di blocchi e relativi strati di coesione definiscono soluzioni meccaniche multiple dell’apparato⁴². La corrispondente possibilità di manipolare una classificazione semantica risulta quindi di estrema variabilità, cercando di non identificare e gerarchizzare gli apparati strutturali in un solo modo univoco. Questo in primo luogo è assunto per la difficoltà di riconoscimento della suddivisione di unità formali e sistema totale, e poi per la non fissità di parametri visuali di riferimento, primo fra tutti la componente di deformazione. Il riferimento a primitive, *instance*, oggetti e classi solitamente applicato nell’analisi dei sistemi architettonici⁴³ ha difficoltà ad essere applicato al tema strutturale per la sua dinamica espressione di componenti e vincoli, che supera continuamente i criteri della classificazione e della semantica costruttiva.

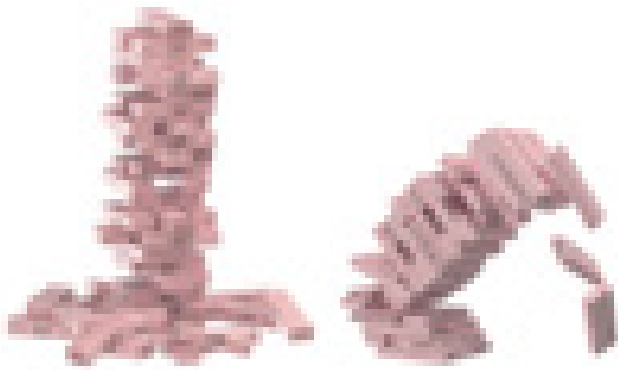
La nozione di struttura può dunque definirsi attraverso un ‘sistema vincolato’, nel rapporto di cambiamento tra un elemento e gli altri dell’unità racchiusi nel contorno, ed al tempo stesso come un ‘sistema latente’⁴⁴, un ‘modello’ del mondo virtuale che ne consenta la previsione



L’opera grafica, materialmente espressiva, applicata per la comunicazione della performance, immaterialmente percepibile nella sua natura di tensioni e rapporti comportamentali.

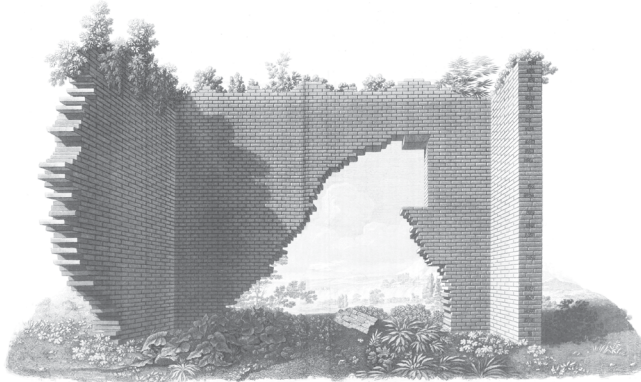
Sopra: (1.28) Raoul Ager Feuillet, “Notazione per una danza di società”, Parigi, 1701. I pattern applicati (immagine) ricalcano le partiture della danza (fenomeno) simulandone la corrispondenza fisica.

fenomenica e che renda intellegibili i fatti osservati. Agendo in una declinazione indipendente dallo specifico materiale costruttivo, o della particolare matrice tecnologica, la configurazione spaziale del componente strutturale individua un modello di sollecitazione tra tensione e materia. La relazione al contorno è in tal modo sviluppata sui suoi vincoli di estremità, dagli schemi più elementari di sostegno ad appoggio, asta incernierata, mensola incastrata, alle loro combinazioni. Le variazioni formali di tali moduli collegano nel quadro una corrispondente causa di modifica,



Il classico gioco da tavolo "Jenga" (dalla lingua swahili: "costruisci!") concretizza la comprensione delle dinamiche di stabilità delle strutture composte in un sistema didatticamente semplice. La relazione reciproca tra i componenti è alla base del fenomeno del loro reciproco equilibrio, e le soluzioni di continuità possono essere molteplici garantendo il flusso delle tensioni nonostante la manipolazione della forma continua.

*Sopra: (1.29) Jenga, squilibrio della configurazione statica; sotto (1.30) Jean-Baptiste Rondelet, variazione formale che conserva la continuità delle tensioni, dal *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802.*



L'integrazione dell'informazione meccanica all'immagine strutturale, sperimentata con il supporto di apparati simbolici.

Sopra (1.31) Paul Klee, "Schizzo", 1930, come dimostrazione delle funzioni meccaniche e degli organi della struttura di un mulino ad aria: le tensioni fenomeniche e le risposte meccaniche del sistema sono schematizzate per frecce in ordine ciclico. Sotto (1.32) schema tensionale di telaio ad arco, 2015: le sollecitazioni e resistenze dei nodi di connessione esprimono l'intensità quantitativa sotto forma di campi a cuspidi.

e riconfermano così il reciproco rapporto comportamentale latente in relazioni che costituiscono scatole murarie, telai o aggregati, con un passaggio di scala fino all'inclusione di vincoli al contorno in articolazioni interne, con un graduale ma costante ampliamento del limite di sistema. Si tratta di una variazione formale che risente, in una sintesi parametrica, anche delle possibilità di alterazione dovute all'azione di deformazione composta tra parti. In tal caso, la compresenza di quadri di compressione, flessione e torsione configura una forma attiva, variabile, non assunta ma conferita.

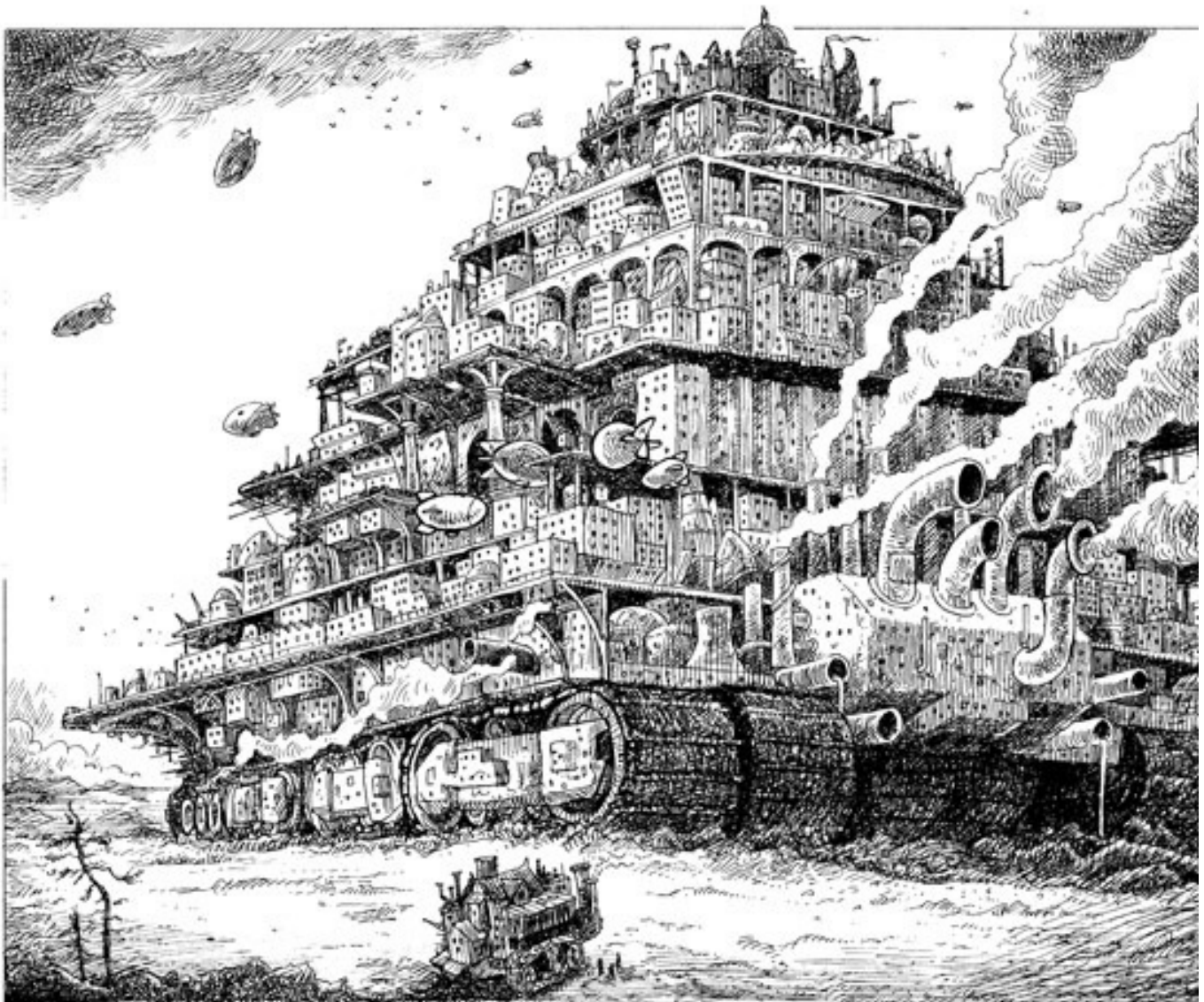


(1.33) Philip Reeves, "London"

Concept sketch per "Mortal Engines" ("Macchine Mortali"), 2001.

Nella visione distopica di città mobili, "predatrici", l'architettura delle grandi capitali urbane assume una configurazione meccanica, con una continua mutazione della forma costruita per componenti assorbiti/espulsi dalle città "divorate", e per funzioni dinamiche.

Non esiste altra matrice fissa, manipolata eppur preservata, che la Struttura.



1.1.4. Riconfigurazioni di insieme per la sintesi percettiva

La sintesi di tale trattazione introduce così la centralità del rapporto statica/tecnica/disegno, quali discipline univocamente chiamate nell'interpretazione dell'apparato strutturale, necessitando però di un ordine consequenziale affinché sia conferito un valore non solo selettivo ma anche sistematico e metodologico alla sua analisi.

La lettura delle meccaniche delle strutture nell'architettura del passato, quale azione consapevole avviata dall'arte del costruire la disciplina della scienza delle costruzioni, riconosce senza dubbio un rapporto di origine nel disegno e nella rappresentazione per generare il processo di comunicazione dell'esperienza fenomenica e ricondurla, in forma più o meno schematica, ad enunciati teorici statici⁴⁶.

La soluzione tecnica che ne deriva, quale riapplicazione di tali enunciati alla realtà concreta ed alle sue pratiche costruttive, riconferma di nuovo il passaggio attraverso la rappresentazione come metodo di ordine e declinazione del contenuto analitico su forme materiali e loro composizione.

Ne risulta una concezione di struttura come sistema-base implicante una consapevolezza fenomenica, che consenta di aggregare e convogliare una pluralità di componenti frutto di un processo cognitivo-comunicativo in continua successione. Le modalità di tali componenti riguardano poi specifiche relazioni sviluppate nell'ambito dello spazio architettonico, che delimita a sua volta la velocità di competenze chiamate a confronto. Il contorno morfologico di ciascun elemento o del sistema dell'insieme di elementi, inteso come organo costruttivo, qualifica una configurazione che, a diversi livelli di interpretazione e variabili di manipolazione empirica agenti in uno spazio virtuale, richiama entità visibili, quali unità, limite e sistema. Tali entità o modelli visuali sono fondamentali per definire l'aspetto di un complesso gioco di rapporti tra forze naturali, ideali ed espressive di una determinata struttura architettonica reale⁴⁷.

Nel supportare un panorama estremamente vasto di modelli ed entità visuali, la complessità dell'unità e del suo limite di connessioni e forma è contagiata da atti di sintesi tali da ridurre la varietà morfologica e connettiva a schemi parziali, seppur corretti, di astrazione signica⁴⁸. L'adozione di ipotesi configurative garantisce l'attribuzione di morfologie semplificate comunque in grado di isolare matematicamente il visibile concentrando l'attenzione sul fenomeno meccanico, il quale non ne risulta comunque



(1.34) James Bogardus, Progetto di stabilimento (1856).

Decostruendo la complessità della fabbrica architettonica, gli apparati costitutivi lasciano il posto allo scheletro della struttura resistente, che da sola continua a soddisfare le esigenze percettive e conoscitive del sistema primario "anche dopo che la maggior parte della sua ossatura di ferro fosse stata tolta... o distrutta con violenza..." (J. Bogardus).

mai conosciuto con certezza⁴⁹. Un indirizzo di azione che richiama, in ogni suo atto, la necessità di un mezzo grafico quale *medium* di comunicazione.

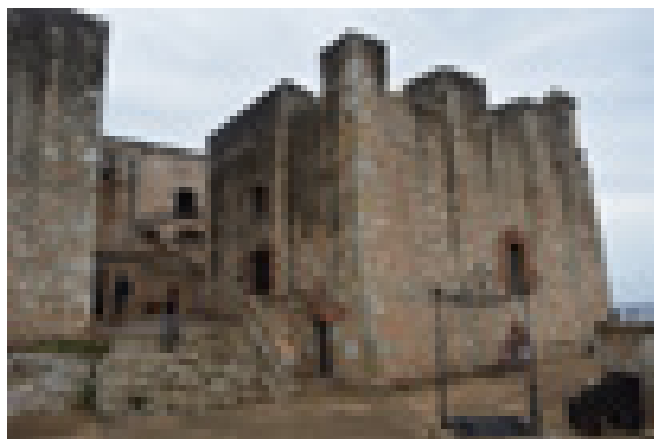
*"Qualsiasi costruzione è una struttura e ha una propria struttura"*⁵⁰, tale da non poter scindere il principio formale, totale come parziale, tanto dall'unità connettiva quanto dalla struttura statica, *"nella quale è fisso il concetto di organizzazione degli elementi di equilibrio statico del sistema."*⁵¹ In tal senso, *"la struttura è superiore anche al carattere fisico dei suoi componenti"*⁵², e ne sfrutta organizzazione e forma nella configurazione di prestazioni e sviluppi tensoriali.

Ne risulta il ruolo del disegno, quale fattore interno al processo conoscitivo, per creare quell'immediato approccio metodologico a *"rendere visibile"* le declinazioni comportamentali legate all'apparato strutturale, *"piuttosto che rendere il visibile"*⁵³. Un'accezione organicistica che si evolve nell'ambito nei prodotti della rappresentazione, chiamati a poter esplicitare un contenuto informativo sempre più vario e multidimensionale, consentendo alla teoria dei modelli di designare con 'struttura' un sistema ben specificato di rapporti, o di leggi, descrittivi il funzionamento del fenomeno rappresentato da un modello.

1.2 IDENTITÀ MORFO-VISIVE TIPOLOGICHE RELAZIONATE ALL'APPARATO STRUTTURALE.

La difficoltà di una categorizzazione architettonica dedicata per l'apparato strutturale, rispetto all'ampia disciplina di studio, si è congiunta nel tempo a corrispondenti criticità nella percezione visuale della stessa entità 'struttura', e nella difficile distinzione dalla complessiva opera architettonica in termini tanto formali quanto statico-comportamentali. In particolare, la confusa corrispondenza tra 'struttura' ed 'architettura', all'esterno dell'approccio progettuale, hanno crescentemente orientato la sua connotazione analitica verso una generale caratterizzazione fisico-formale. Lo studio degli equilibri dei volumi architettonici si è indirizzato verso la modellazione di una 'forma' già implicitamente 'meccanica' ma non espressiva della sua singolarità comportamentale statica e cinematica, che predispone invece i suoi elementi ed unità secondo interpretazioni formali declinandoli all'interno delle specifiche tecnologiche adottate.

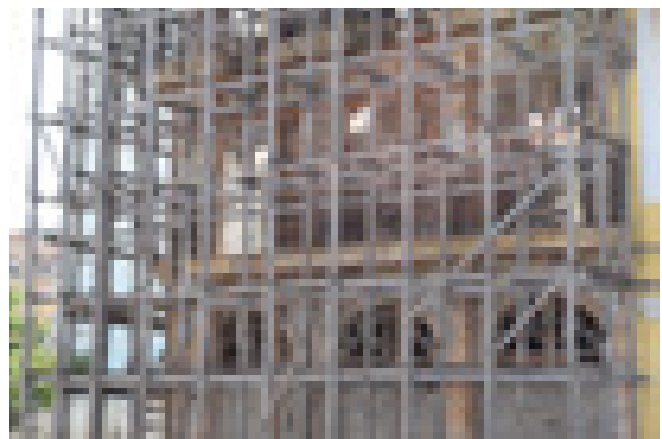
Se i principi di resistenza e supporto statico delle strutture architettoniche erano già chiari agli albori dell'arte costruttiva, con la modellazione formale degli ambienti antropici tanto per asportazione (grotte⁵⁴, caverne ctonie, ipogei) quanto per addizione (dolmen, tholos, strutture lignee, telai e paramenti murari), altrettanto evidente è stato il loro rapporto materico-tecnologico caratterizzante.



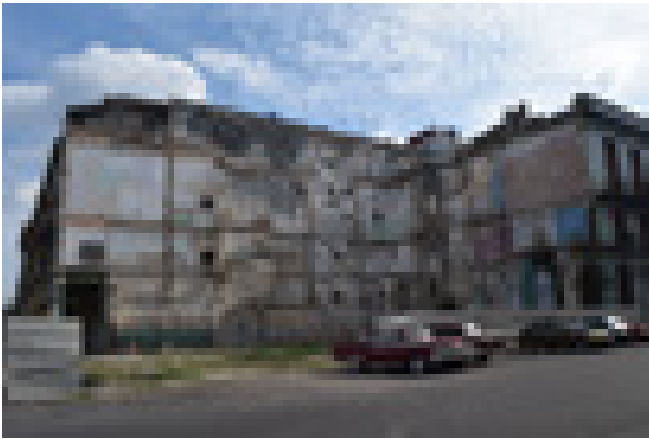
(1.35) Fortezza del Morro San Pedro de la Roca, Santiago de Cuba, 2017. L'involucro muraria comprova un'espressione visuale della struttura associata alla solidità di trasmissione dei carichi ed alla stabilità meccanica.

La scelta delle principali configurazioni strutturali sulle quali si sono evoluti i sistemi costruttivi⁵⁵, ha fatto proprio un principio formale che è indice e 'contenitore' di una consapevolezza critica sugli aspetti comportamentali globali dell'opera architettonica, espressi in segni di risposta della struttura stessa a variabili tecnologiche e compositive quanto costruttive e materiche. Ne deriva così una doppia accezione di 'struttura' quale 'corpo', unità specifica resistente declinata in materiali e componenti, e come 'contenitore' di informazioni di storia statica dell'opera stessa, mezzo espressivo comportamentale dell'organismo edificato nelle sue caratteristiche, vicende e trasformazioni avvenute nel tempo.

Attraverso la classificazione di unità formali tipologiche applicate sui sistemi costruttivi, e dalla loro comune corrispondenza a tensioni e risposte comportamentali di natura meccanica, sono stati avanzati i maggiori tentativi di sistematizzazione delle strutture storiche, per garantire l'analisi e la conoscenza delle risposte statiche ed evolutive delle fabbriche architettoniche⁵⁶. L'opera di codifica ed uniformazione dei sistemi strutturali si è così orientata nel tempo verso una classificazione a doppio parametro, formale e materiale, lasciando che tali campi di descrizione potessero definire un criterio di identificazione visuale delle



(1.36) Cantiere di complesso storico, Havana Vieja, Cuba, 2017. L'isolamento di frammenti strutturali dall'unità del sistema richiama la costruzione di integrazioni effimere, meccanicamente e formalmente relazionate.



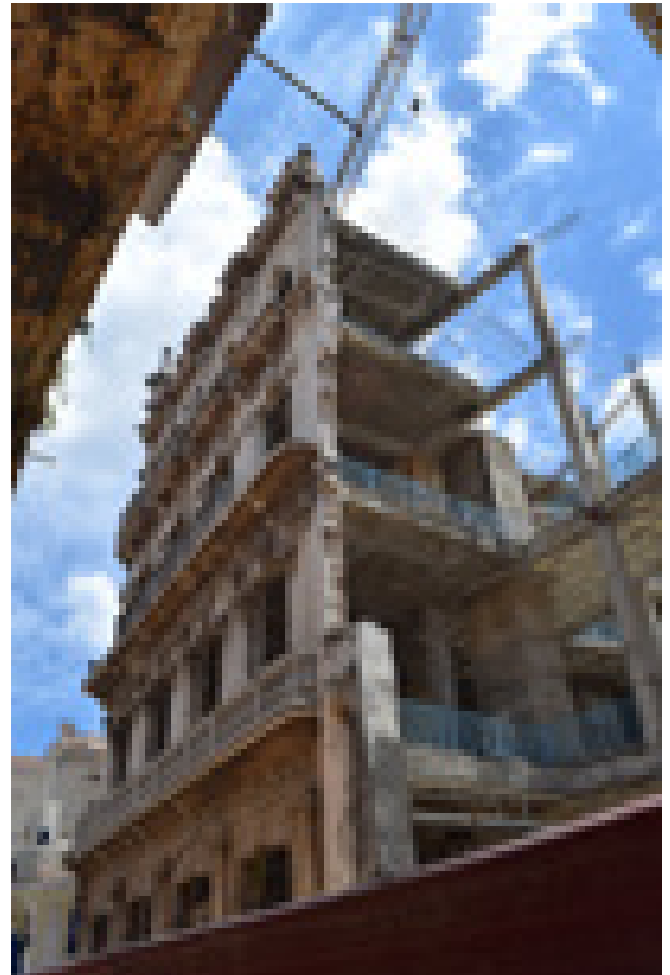
L'intervento episodico sul carattere costruttivo dell'architettura storica pone a contatto esigenze estetiche ed organizzative con la conformazione dei sistemi strutturali edilizi. Se da un lato è la stessa richiesta di immagine ad avviare la pianificazione di modifiche e revisioni degli schemi di modulazione resistente degli spazi, dall'altro è proprio il loro intervento a causare ridistribuzioni e manipolazioni di forma e statica di impatto sulla stessa immagine della struttura architettonica.

(1.37), (1.38) Comparti storici del tessuto urbano dell'Havana Vieja, 2017.

tipologie strutturali applicate, e la loro conseguente diagnosi in merito alle esperienze tensionali statico-dinamiche.

A fronte della metodicità di tale approccio, è innegabile che, a partire dai sistemi strutturali storici più tradizionali, il ritmo della successione di forme e tecniche nella pratica costruttiva si sia alterato, accelerato e intricato, in particolare con l'avvento dell'industrialismo nel processo architettonico, sviluppando elementi e materiali standardizzati in termini sia morfologici che di caratterizzazione meccanica. Al tempo stesso, la produzione di idee, stimoli, opere e manifesti si è unita all'ambizione artistica degli indirizzi progettuali, superando continuamente la ricerca di nuove configurazioni, morfologiche e tecnologiche della struttura stessa. A tal seguito, la legittimazione della 'forma' continua ad essere operata nel rapporto alle leggi statiche, tecnologiche ed economiche, ma con una valutazione più ampia ed integrata tra i diversi apparati del progetto architettonico, "*superando vecchi schemi nozionistici e confrontando tutte le componenti statiche, tecniche ed estetiche che definiscono e caratterizzano la struttura dell'opera.*"⁵⁷

Quale approccio di revisione della molteplicità di sistemi e configurazioni sviluppati tra patrimonio storico e scenari architettonici, la classificazione delle identità



strutturali è riapplicata in un quadro di valutazione basato su parametri espressivi di carattere formale, unitario e statico, richiamando le variabili di manipolazione visuale precedentemente introdotte. Tale sistema supporta così un metodo di revisione del patrimonio in analisi ed il suo inserimento in un quadro di conoscenza visuale "*non frammentata né episodica*"⁵⁸, analizzata sulla base di un processo morfologico in cui essa possa inserirsi con la sua logica funzionale all'interno di un più complesso quadro di insieme su stili, sistemi e materiali.

La tecnica dell'architettura è così leggibile, nelle sue molteplici varianti, anche come una storia di interazione ed emancipazione tra forma e struttura, e "*throughout history, we see how architecture either presents or hides structure*"⁵⁹.

1.2.1. Struttura e tecnologia, tra funzione effimera e persistenza monumentale.

L'evoluzione della forma strutturale segna una particolare svolta in corrispondenza del passaggio tra la sua concezione 'effimera', temporanea, ed il progetto di scheletri edificati a più estesa durata, culminanti nella persistenza storica dei 'monumenti'.

La prima configurazione di costruzione antropica è rappresentata all'interno della "coscienza dell'effimero"⁶⁰, dalla tenda e dagli insediamenti temporanei all'evoluzione dell'abitare sedentario, generando unità complesse e connessioni tipologiche legate alla modularità e lavorazione di componenti tecniche, prevalentemente lignee. Con modalità diverse legate alle molteplici tradizioni e forme più o meno convenzionali, l'effimero ha permesso, in tempi ridotti, di allestire spazi strutturati, delimitare ambienti e sperimentare forme e temi, senza il fardello della durabilità. L'assunto a priori dell'atto di sostituibilità e ristrutturazione del sistema resistente ha condotto a rapidi e continui mutamenti progettuali elaborati all'interno delle dinamiche statiche, centrando l'obiettivo dell' 'unità' e ponendo le variabili di 'forma' e 'sistema' ad un secondario livello di manipolazione della 'struttura'.

La tradizione della tenda e degli insediamenti temporanei ispira le prime configurazioni strutturali, concentrate su schemi discreti di elementi lignei ad aste e vincoli per la modulazione dello spazio. La volontà di chiusura dell'involucro edilizio, oltre alla crescente complessità di organizzazione dello spazio interno, porta ad una densificazione degli elementi con funzione portante, verso una struttura continua che offre anche maggiori possibilità di dettaglio, tessutario ed ornamentale.

(1.39) Tenda beduina in el-Bariyha, Palestina, 2015.

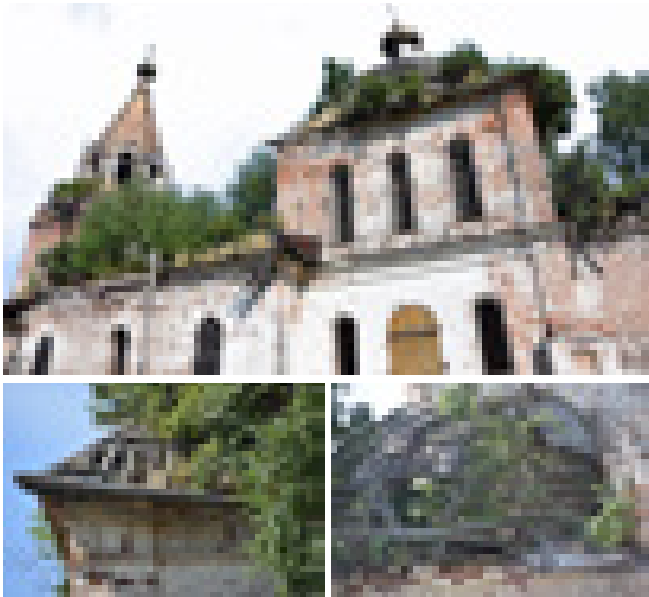
(1.40), (1.41), (1.42) dacia tradizionale a Cherdyn, Russia, 2018.

Le primordiali strutture effimere, pur concependo già una necessaria attenzione formale e tensionale nella giustapposizione di elementi costruttivi ed unità, studiati nella realizzazione dell'intero macrosistema resistente, lasciano ancora grande spazio alla natura morfologica delle singole componenti strutturali, alle loro variabili plastiche di deformazione e deterioramento, ed alla considerazione di molteplici configurazioni formali e statiche in ugual modo funzionali all'opera.

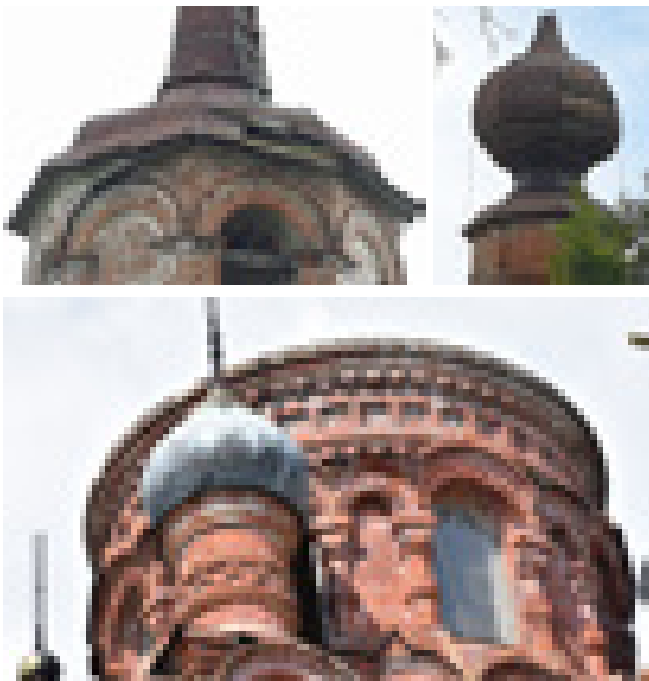
L'apparato effimero, non stabile ma montabile e smontabile, è così preannunciato ad una ripetuta trasfigurazione e decostruzione formale, che al tempo stesso è indice del possibile processo di trasformazione per l'aggiornamento tecnologico ed il rinnovo delle componenti unitarie influenzando, in modo variabile ma assoluto per classe tipologica, il quadro statico dell'insieme.

Nello scenario di una persistenza formale delle strutture antropiche, pensate per conferire un'immagine immutabilmente traslabile nella storia, l'idea di forma e materia elaborate e percepite dall'uomo sembra quindi favorire e ampliare la dicotomia tra i concetti stessi di 'effimero' e 'monumentale'⁶¹. Il primo è inteso quale struttura elaborativa e dinamica, al tempo stesso reale e virtuale, in una dimensione tanto materica quanto impalpabile della





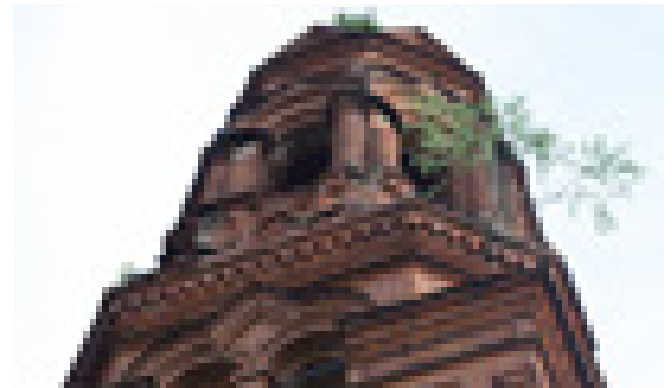
L'obiettivo di durabilità del sistema vede la progressiva sostituzione verso la resistenza meccanica garantita dalle configurazioni murarie, continue ed a tessitura compatta. L'uso di strutture effimere è lasciato per funzionalità a sistemi secondari indipendenti, come coperture ed ornamenti, di frequente rinameggiamento e sostituzione. Strutture murarie ed apparati effimeri nel patrimonio russo dell'Upper Kama: Bondjug (1.43) (1.44)(1.45), Pyskor (1.46)(1.47), Taman (1.48), Pokcha (1.49).



cultura costruttiva, che si esprime maggiormente attraverso una costellazione di segni che modellano, a molteplici livelli, lo spazio-tempo della storia, come 'singolarità' sostituibili che rigenerano la forma strutturale in versioni staticamente auto-equilibrate. Il secondo, invece, viene corrispettivamente elaborato quale consolidamento fisico-materiale di una serie di unità, valori e parametri concreti che proprio nella concretezza della loro realtà vanno ad affrontare i caratteri formali e tensionali propri del sistema strutturale, in una visione ampliata "all'eternità di un sogno di pietra"⁶². Il monumento si configura come "parte di una struttura" cognitivamente e costruttivamente mantenuta e, in tal modo, esso "ricrea l'architettura originaria, reale o immaginata, attraverso una logica strutturale"⁶³ di perdurata valenza statica-formale-connettiva.

Emerge quindi come il tema sia ricondotto alla 'forma' nel 'tempo' come condizione espressiva dell'idea strutturale alla base, e diviene necessario parlare di *trasformazione* quale passaggio della forma strutturale dallo stato effimero a quello monumentale, non intesa come un percorso verso una configurazione finale, ma pensata come un sistema in continua mutazione, dove è distinguibile un *processo* di declinazione delle variabili infografiche legate alla descrizione dell'oggetto strutturale⁶⁴.

"Una forma a breve durata scambia quindi informazioni di natura percettiva con forme a lunga durata e viceversa"⁶⁵. Tale dialogo si contraddistingue con un confronto dialettico tra le due identità strutturali, intese come una lenta e una veloce, dove le due velocità sono contestuali alla spiegazione delle variabili di manipolazione morfologica che le descrivono e che ne coordinano quindi la forma esteriore, rendendola visivamente intellegibile e comprensibile alla rappresentazione.

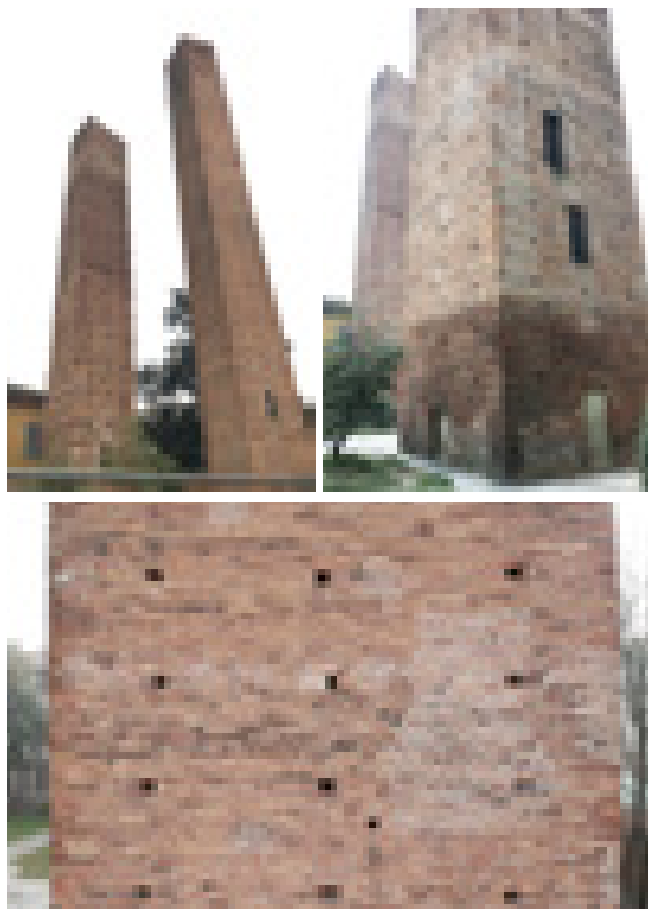


1.2.2. Monolitismo, ciclopismo e tettonica: l'articolazione degli archetipi strutturali.

Le proprietà di 'singolarità' e 'pluralità' del sistema strutturale, implicitamente derivanti dalla giustapposizione delle componenti costituenti, impostano un segno decisivo nella definizione delle identità strutturali nell'architettura storica, in termini sia tecnici che formali. A partire da un ideale di struttura unitaria, monolitica, lo sviluppo di molteplici trame di articolazione e connessione ha convogliato la tecnica strutturale verso articolate ma funzionali 'forme costruite'⁶⁶.

I raggruppamenti monolitici hanno assunto e stabilito caratteri morfo-statici alla base di vari moduli strutturali: la tessitura, l'appoggio, l'aggregazione dei blocchi, definiti sul principio della forma massiccia. Una concezione di struttura che sfrutta la durezza e la massa per definire un'unità, complessiva delle specifiche tessiture, dove la presenza del limite individua l'identità del sistema come *unicum*. È una derivazione diretta dalla tradizione 'megalitica', dove la materia strutturale viene gradualmente sottoposta a processi di trasformazione, intervento ed adattamento che ne generano una finale scissione per componenti unitari, come blocchi meccanicamente omogenei, influenzanti la solidità e permanenza dell'opera.

La gamma delle derivate soluzioni strutturali e la possibilità di scelta dei materiali hanno definito nel tempo un vasto sistema



Principi di orditura muraria, dalla regola di tessitura alla definizione del comportamento omogeneo per soluzione di continuità.

(1.50) (1.51) Villa Adriana, Le Biblioteche, Tivoli: la compattezza del blocco resistente nella persistenza delle rovine. (1.52) (1.53) (1.54) Torri medievali, Pavia: porzioni di intervento all'interno del blocco continuo.

di classi tecniche, nel quale la pratica architettonica si è inserita a identificare stili e modalità di orditura dei componenti. Lo sviluppo di molteplici sistemi di composizione strutturale sfrutta così le proprietà meccaniche dei corpi costitutivi, e nell'estrema varietà di soluzioni declina i risultanti tipi di struttura ad un numero limitato di famiglie, le 'tipologie tessuarie', pur mantenendo all'interno di ciascuna lo spazio per la variazione e l'interpretazione della soluzione costruttiva, della forma architettonica e del complessivo sistema statico. L'idea di scheletro resistente unitario, che basa sul monolitismo formale la propria forza, è richiamata con l'obiettivo di evitare punti di debolezza nel sistema, impendendo a localizzati fulcri di discontinuità di sviluppare una crisi estesa all'intero apparato. In realtà, è proprio nella costituzione per elementi parziali e composti, espressione del superamento del limite in un complesso ma continuo quadro di connessioni e relazioni statiche, che la fissità dei giunti è rinunciata a guadagno



L'articolazione dei componenti di tessitura instaura il comportamento statico unitario, identificando il corrispondente sistema di rapporti e distribuzioni di tensione. L'unità formale è corrisposta ad un'unità comportamentale, che suddivide la fabbrica in blocchi rigidi di omogenea resistenza. (1.55) (1.56) (1.57) unità resistenti all'interno dei complessi dell'800 a Usolye, Russia, 2018; (1.58) (1.59) blocchi murari e sistemi ad arco nella Fortezza di Santa Barbara, Alicante, Spagna, 2017.

di un'elasticità di adattamento e reciproco assestamento del sistema tettonico, dal quale deriva la reale capacità di equilibrio formale e tensionale dell'intera struttura.

Nel contraddittorio rapporto tra il limite monolitico ed il sistema scomponibile si contrappone così la dimensione analitica, e la struttura diviene indagabile solo attraverso una preliminare valutazione della corrispondenza e del reciproco coordinamento dei diversi sottosistemi di componenti.⁶⁷

L'archetipo strutturale della lettura 'formalistica', di disvelamento dell'essenza della costruzione attraverso la sua forma, si attua così in due modelli costruttivi fondamentali, e per certi versi oppositivi: l' 'unità ciclopica', caratterizzata per massa e continuità materica, e l' 'articolazione tettonica', composta e connessa. Il sistema megalitico anticipa la tecnica matura della stereotomia, procedendo alla formazione della struttura per 'masse' e per 'volumi' in continuità materica lungo assi e per sommatoria



di strati composti da elementi costituenti e connettivi, più o meno regolati, ma sempre assemblati per individuare una maglia strutturale aperta ed espandibile, senza limite.

Nel rapporto con le risorse materiche, la sostanza lapidea, inizialmente usata nella sua sola unità monolitica, è introdotta progressivamente nei sistemi composti in sostituzione del legno, dedicato alle articolazioni strutturali, e viene sagomata, disposta e organizzata in modo tale da reinterpretare la forma dell'intelaiatura primitiva geometrica. "Le pietre, di qualsiasi genere e forma, disposte l'una accanto all'altra, l'una sopra l'altra, nei vari modi aggregativi esprimono sin dalle origini l'esistenza di una mente creativa ed ordinatrice, e al pari dell'arte della tessitura, l'arte muraria attiva una sintassi combinatoria e compositiva"⁶⁸, espressa nel catalogo di stili informi, bugnati, incastonati, regolarizzati, che nella loro specificità formale condizionano la variabile comportamentale di sollecitazione interna ed equilibrio dell'intero sistema.

Così l'aspetto statico della struttura, che permane fondamentalmente inalterato dai manufatti litici a quelli laterizi, si è venuto sempre più precisando dal sistema elementare dell'opera ciclopica, mantenendo una garanzia di stabilità nei rapporti delle forze che i vari blocchi sovrapposti esercitano reciprocamente per legge di gravità. È soprattutto la forza volumetrica della composizione dello scheletro resistente, l'opera muraria 'per blocchi', a rappresentare l'orientamento dell'architettura strutturale, a cui si associa, subito, una ricerca monumentale di intorni di masse e paramenti verso la definizione di nuclei architettonici resistenti⁶⁹.

1.2.3. Dimensionamento ed assemblamento: declinazioni strutturali nella tecnica moderna.

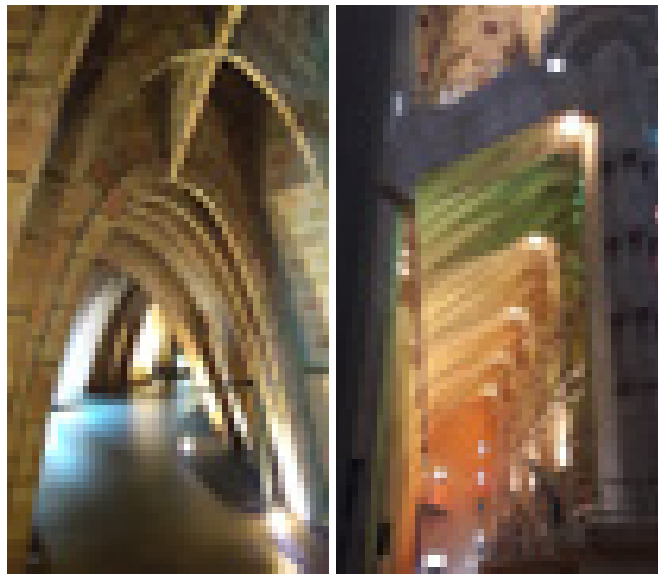
Il passaggio attraverso l'era industriale segna un coerente cambiamento nella concezione pratica della struttura architettonica, leggibile mediante nuove soluzioni di articolazione morfologica dei componenti che, pur rimanendo condizionate alle leggi d'ordine statico, si sviluppano e affermano in quanto derivati tipologici delle nuove tecnologie dei materiali edili⁷⁰. La variegata natura delle nuove risorse introdotte, dal ferro al calcestruzzo, persegue nei suoi risultati il fine primo della funzione utilitaria, la resistenza del sistema materiale, con modi più tecnicistici che architettonici ma giungendo comunque ad un esito tecnico di composizione ed elaborazione costitutiva identificabile in un quadro di costante ricerca sulla morfologia dell'unità strutturale.⁷¹

La struttura, in una rinnovata configurazione condensata oltre la somma dei singoli apporti delle connessioni del sistema, si scinde cognitivamente nei caratteri paralleli di 'idea', invenzione di forme, e di 'tecnica', quale traduzione dell'idea formale in concretezza statica e edificatoria, determinando modificazioni operative dei componenti che spesso trascendono gli aspetti della pura funzionalità.

L'unità estetica dell'opera è ricercata e finalizzata attraverso la manipolazione di unità e connessioni univocamente individuate all'interno del limite formale, totalizzando la padronanza del fattore di 'plasticità' spaziale. "Alle costruzioni 'morte', massicce e operanti per gravità, si oppongono quelle "vive", di membrature metalliche formalmente vibranti, come un sistema nervoso in perenne tensione"⁷². Il modulo profilato si aggiunge nella pratica strutturale quale cellula elementare del sistema tettonico, standardizzando un contorno materico che sintetizza nella sua qualità formale tutte le ragioni di resistenza del quadro statico, sia locale, alla scala tensionale del singolo componente, che macro-strutturale, per l'articolazione equilibrata dell'intero sistema. La morfologia strutturale 'profilata' si esprime così all'interno di rigenerate identità di sistema, dove le tipologie statiche elementari, dal comportamento ormai assunto, sono riprese e potenziate nello sviluppo di strutture sospese, griglie strutturali moltiplicate e compenstrate, membrature e gusci capaci di delimitare spazi ampliati, dove la percezione immediata del contorno individuale degli elementi componenti è persa in virtù di un'unità complessiva singolarmente limitata.

La gamma di applicazioni strutturali, ampliate dalla pratica dei nuovi profili resistenti, si concentra attorno all'assunto morfo-statico di strutture a sviluppo lineare, progettate per assi direzionali che seguano il flusso delle tensioni interne. Telai, sostegni esili, volte reticolari, per la concentrazione e l'incanalamento di tensioni spaziali, rappresentano così un primo fondamentale traguardo per un sistema portante dagli attributi tecnicistici, predisposto a cogliere le valenze interpretative della forma strutturale attraverso la logica di un espressivo uso dei moduli razionali e la padronanza dello strumento matematico per il disegno analitico dei profili resistenti. In questo senso, l'uso di profilati standardizzati, dal contorno modulare fisso e immutato, esalta il carattere formale della struttura pre-composta, nel monolitismo della sua unità quanto nella varietà e ricchezza di conformazione degli elementi di articolazione.

Il carattere morfo-strutturale si aggiorna nella forma di moduli resistenti dalla pre-dimensionata funzione statica,



L'industrializzazione di materiali e processi costruttivi introduce nuove possibilità di conformazione delle strutture, potenziandone le proprietà statiche degli elementi per mezzo di armature interne e profilati di scheletro. Le precedenti unità resistenti si ampliano ad inedite espressioni di forma e tensione, generando sistemi articolati.

Antoni Gaudì (1.60) Casa Milà "La Pedrera", 1900, resistenza estrema del laterizio armato negli ambienti voltati di sottotetto; (1.61) Sagrada Família, Barcellona, 1892-2016, campate a nervature complesse.



(1.62) Santiago Calatrava, stazione Stadelhofen, Zurigo, 1990.
La forma plastica, permessa dal cemento armato, compone le nervature come involucri dello scheletro resistente, consentendo alla struttura di convogliare la tensione statica in elementi di appoggio dimensionati.

dove cerniere ed articolazioni legano e coordinano sistemi di aste, travi, reticolati ed altre ossature metalliche o gettate in cemento, accompagnate da blocchi di fusione e collegamenti rigidi di bullonature, chiodature ed incastri sagomati, considerati non solo ai fini del collegamento fra parti, ma in funzione di una più ampia capacità di conformazione e di adattamento alle diverse sollecitazioni statico-dinamiche. Nel livello di unità organica di tali moduli, le forme naturali continuano a condurre e stimolare la sperimentazione mimetica, con sequenze ripetitive e coordinate di composizione d'insieme: l'impianto formale è sublimato nella continuità al contorno della struttura, pur sviluppando una varietà di espressione nei suoi stessi componenti, alternatamente sottili, massici, resistenti per forma, tensionalmente coatti.⁷³

*“Da una parte il cristallizzarsi della forma, la sua idea manieristica come entità autonoma e storica, dall'altra l'isolamento orgoglioso della materia, accessibile soltanto in merito ad una precisa conoscenza razionalista”*⁷⁴. Avanzano progressivamente le forme di “avanguardia” rispetto a quelle tradizionali, o al contempo viene esaltato il carattere consolidato di equilibrio statico e unitario di quest'ultime rispetto alle prime, puntualizzando i sintomi di una sperimentazione che raggiunge spesso, consapevolmente o non, una novità di espressione. Così i tipi strutturali già affermati si raggruppano sostanzialmente



(1.63) Massimiliano Fuksas, “La Nuvola”, Roma, 2016.
L'archetipo dell'intreccio strutturale della tenda ritorna formulato in profili e connessioni di acciaio, con una maglia ad alta concentrazione di tensioni che discretizza l'involuppo resistente in forma di pattern.

intorno alle sollecitazioni più elementari ed intuibili, e da tale identificazione ne sono reinterpretati in nuove varianti snodate: colonne, muri, archi e volte, fissati in termini di unità e sollecitazione, sono manipolati, armati e rimodellati nell'aspetto morfologico, scaricando le tensioni statiche e dinamiche per traiettorie di contorno dolci ed armoniose, e di tenuta alla deformazione⁷⁵.

L'avanguardia industriale conduce così non solo alla definizione di una ‘forma di struttura’, ma anche ad una ‘struttura di forma’, fino alla ‘struttura nella forma’ con il progetto sistematico e connettivo di interventi di consolidamento ed armatura delle strutture storiche esistenti. Nella plasticità dei profilati modulari, lavorati ed elaborati a seguire gli stili formali e le arti applicate delle diverse epoche novecentesche, si afferma il concetto di una variante statica sul sistema che non procede più di pari passo con la definizione della forma strutturale nel suo limite visibile. L'influenza statica viene convogliata in un livello di sola interazione comportamentale, ‘virtuale’, lasciando libero sfogo e declinazione alle unità di connessione ed al contorno formale, ricalcando o meno i canali del sistema tensionale. La rinnovata tecnica delle costruzioni reinterpreta ed approfondisce le forme legate alle leggi della natura, determinando un aggiornato catalogo di profili ed articolazioni.

1.2.4. Relazioni costitutive nella struttura della città: apparato, unità e agglomerato.

La rivisitazione della conformazione dei centri storici urbani⁷⁶, alla luce degli assunti esposti sulle modalità di interazione ed evoluzione della tecnica architettonica strutturale sulla sua componente percettiva visuale, conclude la scala di revisione sulle identità di manipolazione applicate all'entità 'struttura'.

Nella congiunzione tra 'forma' e 'società', l'incontro tra sistemi edilizi ed apparati funzionali esplicita la genesi dell'intera struttura urbana, rivelando le ragioni della sua manipolazione ed alterazione a partire dalla linearità dell'insediamento rurale.⁷⁷ La struttura della città declina la maggior parte della sua ragione formale all'irreggimentazione delle funzioni umane nello spazio urbano, e sviluppa unità e sistemi superando i progressivi limiti di stratificazione nell'adattamento alla forma dinamica dell'ordine sociale⁷⁸. Il rapporto tra città e struttura, impostato sulla decifrazione delle relazioni instaurate tra edifici, intorni e manufatti, in termini sia spaziali che tecnico-costitutivi, perviene così ad un'analisi del tessuto edificato standardizzabile sull'identificazione di macro-schemi di gerarchia costruttiva: l'apparato locale, l'unità edilizia, l'aggregato urbano⁷⁹.

La conformazione attuale dei centri storici configura quindi strutturalmente una 'forma derivata', risultato del contatto nel tempo di dinamiche cellule tipologiche urbane, interagenti



secondo tre principali modalità: la trasformazione tipologica, l'interazione tecnico-costruttiva, la riorganizzazione per unità. E per ciascuna di esse, l'approccio identitario della struttura è riaffermato attraverso la modellazione variabile di unità, limiti e sistemi, sempre presenti e declinati nella crescita del mistilineo apparato portante. Affiancando i fattori sociopolitici, è così individuabile un'espressione architettonica strutturale dei centri storici urbani dove nella "costruzione della città in parallelo all'evoluzione delle tecniche costruttive si illustrano i criteri meccanici che nella storia si sono succeduti fino a costituire l'attuale corpo teorico dell'analisi strutturale delle costruzioni."⁸⁰

A partire dall'unità abitativa, è definito un metodo di corrispondenza tra caratteristiche intrinseche formali, funzionali, distributive, statiche, giungendo ad un modello implicito di connessioni morfo-tecniche richiamate sulla modalità del perimetro elementare della 'scatola muraria'. L'elaborazione della cellula principale con l'annessione di ambienti, l'inserimento di preesistenze e singolarità



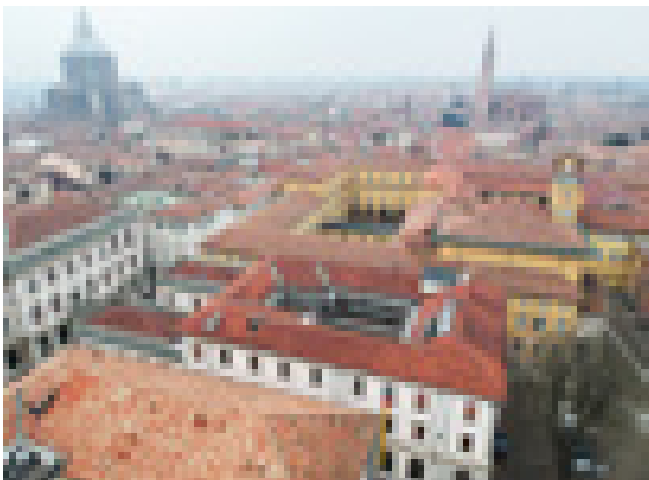
La conformazione del villaggio sviluppa rare situazioni di interazione formale e meccanica tra unità, concepite come eventi costruttivi indipendenti. (1.68) Villaggio rurale di Taman, Russia, 2018.



Al contrario, con lo stratificarsi della città storica il rapporto contiguo tra edifici ed unità accresciute nel tempo sviluppa interazioni statiche tra le strutture dei blocchi urbani. (1.69) Gravina di Puglia, 2018.

architettoniche, definisce un primo stadio trasformativo dove la potenziale presenza di punti di debolezza è fattore parametrico della qualità statica, influenzata da angoli non ammortati, fronti di solo tamponamento, apparati slegati dalla cellula di origine⁸¹.

Mentre la struttura tipologica si mantiene di base costante, l'alterazione statica è introdotta dalle particolarità connettive di aggregazione precipua, influenzata da dettagli costruttivi e sistemi di assemblaggio strutturale, in un catalogo e lessico applicativo che individua all'interno del tessuto stratificato il contorno di schemi tecnici ideali (arco, architrave, timpano e volte) quali modelli astratti localizzanti porzioni tessuarie di comprovata efficacia meccanica⁸². L'atto interpretativo della realtà strutturale urbana si condensa così nella capacità di analisi di tali compresenze strutturali, valutate nella specifica aggregazione di sistema attraverso il parametro formale, indice di identificazione di connessioni, vincoli, sconessioni, giunti, giustapposizioni e sovrapposizioni delle singole unità. La loro articolazione, con prolungamenti, rotazioni, intersezioni, slittamenti, disassamenti, rastremazioni, lega la decifrazione combinata di unità-forma-sistema determinando la localizzazione di singolari zone di debolezza del sistema statico e di percorsi di trasmissione degli sforzi nella cortina edificata.⁸³ La lettura degli elementi di connessione tra le unità e i sistemi strutturali, in continuità o discontinuità di contorno staticamente relazionata, con diaframmi, o non relazionata, con il supporti di ponti⁸⁴, definisce la gerarchia strutturale



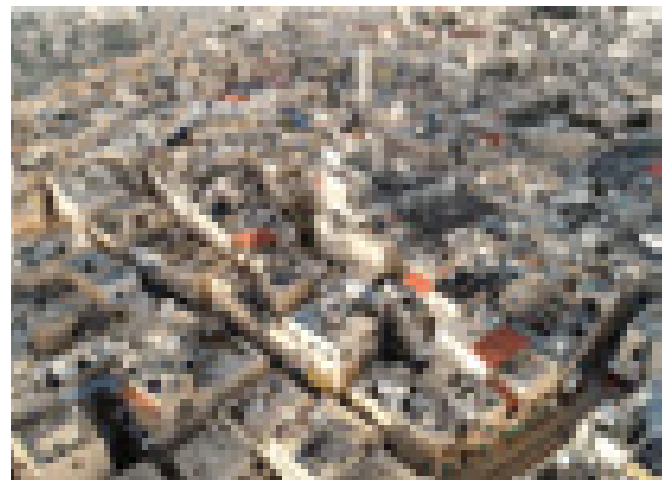
La modalità di accrescimento delle strutture urbane è indice dei meccanismi di risposta tra unità e forma statica, meglio identificabili in caso di pianificazione regolare. (1.70) Centro storico di Pavia, Italia, 2019.



Relazioni formali e rapporti costruttivi all'interno della struttura della città storica. (1.64) Stratificazioni murarie, (1.65) saturazioni, (1.66) innesti e (1.67) diaframmi, all'interno del centro storico di Betlemme, Palestina, 2018.

della città, sviluppando una distinzione fondamentale tra *elementi sopportati* ed *elementi di supporto*⁸⁵.

Ne emerge la definizione di macrostruttura urbana come 'aggregato', quale associazione di fabbriche interconnesse come unità, con limite di continuità, che possano interagire tra loro come sistema sotto un'azione dinamica⁸⁶, dove meccanismi di reciproca influenza sono innescati e propagati a partire dalle eventuali connessioni stabilite nelle articolazioni strutturali. L'evoluzione del tessuto urbano è così esplicita, applicando moduli statici e unità connettive, nella sua opera di graduale intasamento degli spazi liberi, riconducendo cellule e scatole strutturali non sempre originariamente concluse nelle specifiche azioni di accrescimento, intasamento e chiusura, attuando il processo di moltiplicatore urbano⁸⁷.



Lo sviluppo per aggregati irregolari conduce ad una lettura complessa tra blocchi indipendenti e soluzioni di continuità, istituite per diaframmi e saturazioni. (1.71) Centro storico di Betlemme, 2019.

1.3 FENOMENICA STRUTTURALE E FORMULAZIONE SIGNICA NELL'ESPERIENZA CONTEMPORANEA DEL PATRIMONIO COSTRUITO.

“We have grown up in a world of rigid containers, with scarce movements and deflections, while the natural universe is based upon flexibility and mutations.”⁸⁸

Fino al secolo scorso i concetti di fenomenica strutturale incorporati nella pratica costruttiva sono stati identificati in una dimensione particolarmente ridotta. La concezione dell'immutabilità e dell'immobilità della 'forma' architettonica, alla pari dell'idea, ha contribuito a definire la causa prima dell'incapacità, da parte della coscienza scientifica, di sviluppare un'adeguata teoria di congiunzione tra fenomeno fisico e variazione formale. In tal modo, lo studio delle strutture architettoniche si è cristallizzato su una rigorosa formulazione di base geometrica, attestante nella 'forma ideale' la matrice di contenimento e conservazione di unità e sistema resistente.

Le declinazioni visuali del problema grafico-strutturale sono state contenute con un mero discorso di proporzioni e rapporti comparativi, a loro volta concentrati in maniera spesso predominante sulla pratica conoscitiva della lavorabilità e resistenza del medium materico. I presupposti ad un corretto approccio cognitivo del sistema strutturale attraverso la regolamentazione della sua rappresentazione sono stati dirottati verso un'eccessiva fiducia nella regola geometrica, *“a testimoniare, nei costruttori, una sensibilità organica verso le strutture piuttosto che la consapevolezza di obiettive leggi meccaniche”⁸⁹*. Nel fine della scienza di individuare un sistema classificato di immagini di corrispondenza e previsione di tali realtà⁹⁰, la trasposizione fenomenica è stata assunta attraverso la discretizzazione di 'strutture ideali', perfezionate fino al limite di simbolizzazione di unità ed articolazioni, con cataloghi di disegni atti a sintetizzare ed universalizzare la complessità formale delle tipologie statiche e connettive in classi regolamentate di astrazione signica.

Il patrimonio costruito è stato completamente coinvolto, nel corso dei secoli, da fenomeni di movimento e deformazione con elaborazioni dinamiche di 'singolarità'



Il dinamismo di intervento a cui sono soggetti gli apparati strutturali storici impone una valutazione sempre più contestuale dei loro episodi di storia tensionale. Demolizioni, integrazioni e suture finiscono per frammentare con sempre più frequenza l'unità formale del sistema meccanico originariamente concepito. La rappresentazione che ne deriva rischia così un'eccessiva decostruzione per apparati, perdendo sia l'unità di insieme che la ricchezza di dettaglio per l'analisi. (1.72) Robert Delaunay, "La Torre Rossa", 1912. Tentativo di rappresentare la struttura per scomposizione visuale di elementi in ambiente piano.

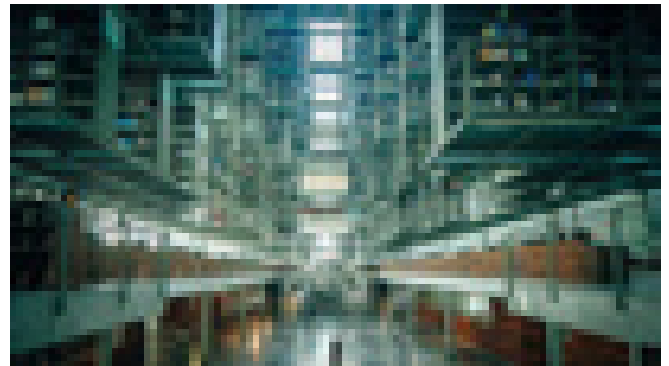
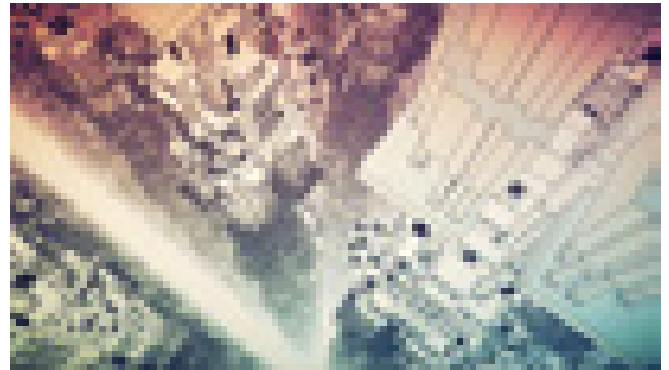
Con la contestualizzazione nell'ambiente virtuale, i sistemi strutturali dell'architettura riescono ad assumere forme dove le implicazioni fisiche di senso logico degli elementi sono sempre più affidate a soluzioni di programmazione. Se forma e unità sono mantenute il più possibile vicine alla loro controparte realistica, le leggi della statica tendono invece ad essere bypassate nella loro apparenza fenomenica. Strutture impossibili sembrano manipolare la meccanica dei corpi, slegandola dal rapporto di inter-dipendenza con forma e unità, e trasformandola da carattere visuale a meta dato numerico, legato alle sole leggi della computazione. Le strutture virtuali rappresentate così dominano (invece che essere dominate) le leggi della fisica.

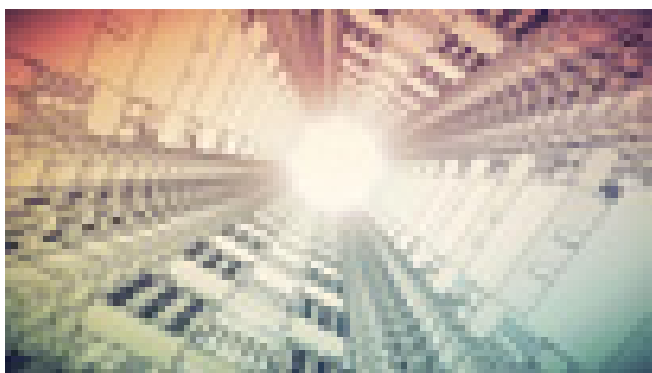
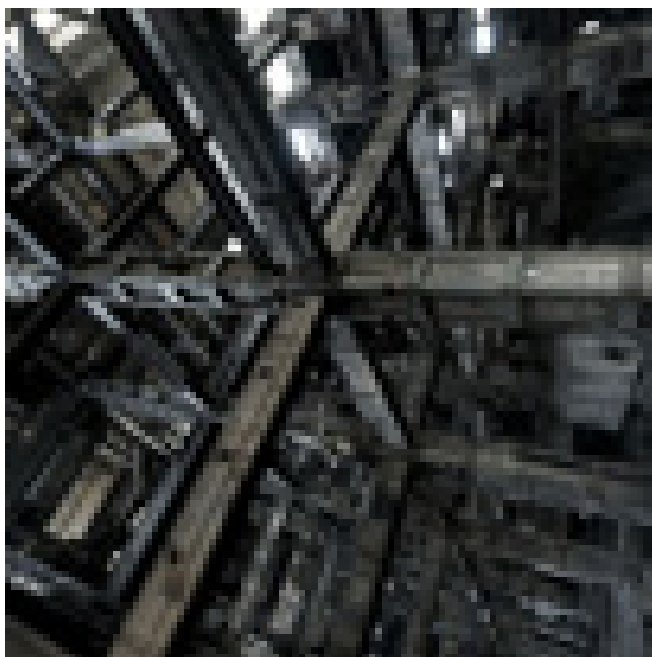
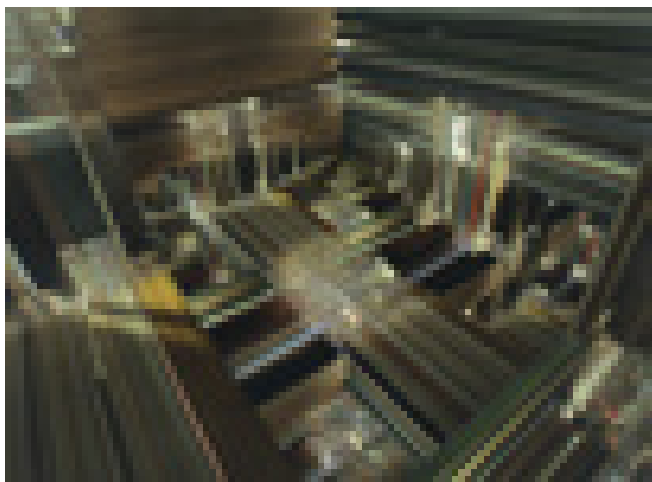
Dall'alto: (1.73) *Manifold Garden*, videogioco, 2019; (1.74) *Biblioteca Vasconcelos*, progetto 2016, Mexico City; *impossible built structures in* (1.75) *Marvel's Doctor Strange*, film, 2016; (1.76) *Inception*, film, 2010.

riconducibili ad un 'apparato omeostatico'⁹¹, auto-regolatosi nel tempo sulla specifica configurazione spaziale del sistema. Di queste deformazioni ne risulta una memoria attiva e concretamente dialettica esercitata dai fenomeni sollecitativi sull'opera architettonica, lasciando al suo scheletro portante il compito di enunciare *in unicum* i segni e le conseguenze visive di tale esperienza.

Lo sviluppo di alterazioni nel regime di equilibrio, con graduali variazioni tensionali fino alla compromissione di soluzioni di continuità, dissesti e deformazioni, derivanti da fenomeni di differenziata articolazione sulla misura morfologica-dimensionale del costruito⁹², hanno manifestato la difficoltà di gestione e studio delle specificità di connessione in contrapposizione all'adozione di un metodo scientifico, in termini di ripetibilità e universalità. In tal modo, lo studio delle azioni meccaniche è stato convogliato in classi di vincoli ed indicatori storici⁹³, formulando ipotesi parametriche supportate da grafici e condizioni numeriche, e spingendo la forma verso la contrazione di informazioni di sistemi astratti di racconto dell'unità e del sistema.

Nel contesto statico, l'azione protagonista della 'forza vettoriale' ha visto la linea retta affermarsi come espressione grafica del concetto resistente, riassumendo nella sua iconicità la colonna, il supporto isolato, quale materializzazione, suggestione mentale più immediata ed immagine più prossima di una diretta espressione fenomenica⁹⁴. Analogamente, al principio di 'forza contro forza' è stata associata l'icona tecnica del paramento, il supporto continuo, in quanto espressione morfologica più elementare dell'esigenza di convogliamento di un flusso statico continuo di resistenze, assolvente in contemporanea funzioni di chiusura, sostenimento e contenimento⁹⁵.





La pratica di modellazione numerica del sistema strutturale, estesa dal complesso architettonico al tessuto storico per porzioni di edificio, ha ricalcato tali assunti espandendoli allo studio tridimensionale. Sono stati derivati meccanismi locali sulle basi della documentazione di quadri signici di tensione plastica, opportunamente sistematizzati in segni, e sono stati sviluppati manuali universali sul comportamento delle tipologie di comparto⁹⁶. L'efficacia di tale metodo conoscitivo, ed il suo diffondersi presso le realtà scientifiche, ha così consolidato la disciplina delle costruzioni su approcci visuali espressi per supporti grafici di carattere concettuale, immagini convenzionali dove l'assenza di specifica declinazione formale ha instaurato un rapporto biunivoco fisso tra significante (disegno) e significato (meccanica)⁹⁷, privando il primo del dettaglio di contestualizzazione sulla 'singolarità' strutturale.

La revisione delle pratiche grafiche relazionate al disegno strutturale ed al suo sviluppo nella storia è affrontata quale ulteriore premessa ad un aggiornamento della lettura della fenomenica strutturale che richiami la preliminare 'conoscenza formale' del sistema. In tal modo, l'orientamento dell'indagine sperimentale si concentra sulla capacità del disegno di legare identità unitaria e statica, mantenendo la necessità di un' 'efficacia rappresentativa' ma richiamando al contempo un' esigenza di 'realismo rappresentativo'.⁹⁸

L'indipendenza dalle leggi statiche abilita le forme architettoniche verso una dinamicità tale da perdere la definizione concreta dei limiti dello spazio. Nel momento in cui la 'struttura virtuale' torna a dover dialogare con i caratteri costruttivi dell'organismo tecnologico, le possibilità di dominio della 'struttura reale' sono reclamate. Per ristabilire la corrispondenza tra spazio e sistema, forma e limite delle unità strutturali sono richiamati, e la rappresentazione torna a concentrarsi sull'obiettivo di definirne la realtà, sia materica che fenomenica.

Dall'alto: (1.77) Interstellar, film, struttura multidimensionale, 2014; (1.78) ambiente a tecnologia costruttiva di Zion in Matrix, film, 2003; (1.79) Manifold Garden, struttura ricomposta, videogioco, 2019.

(1.80) Studio Espai MGR

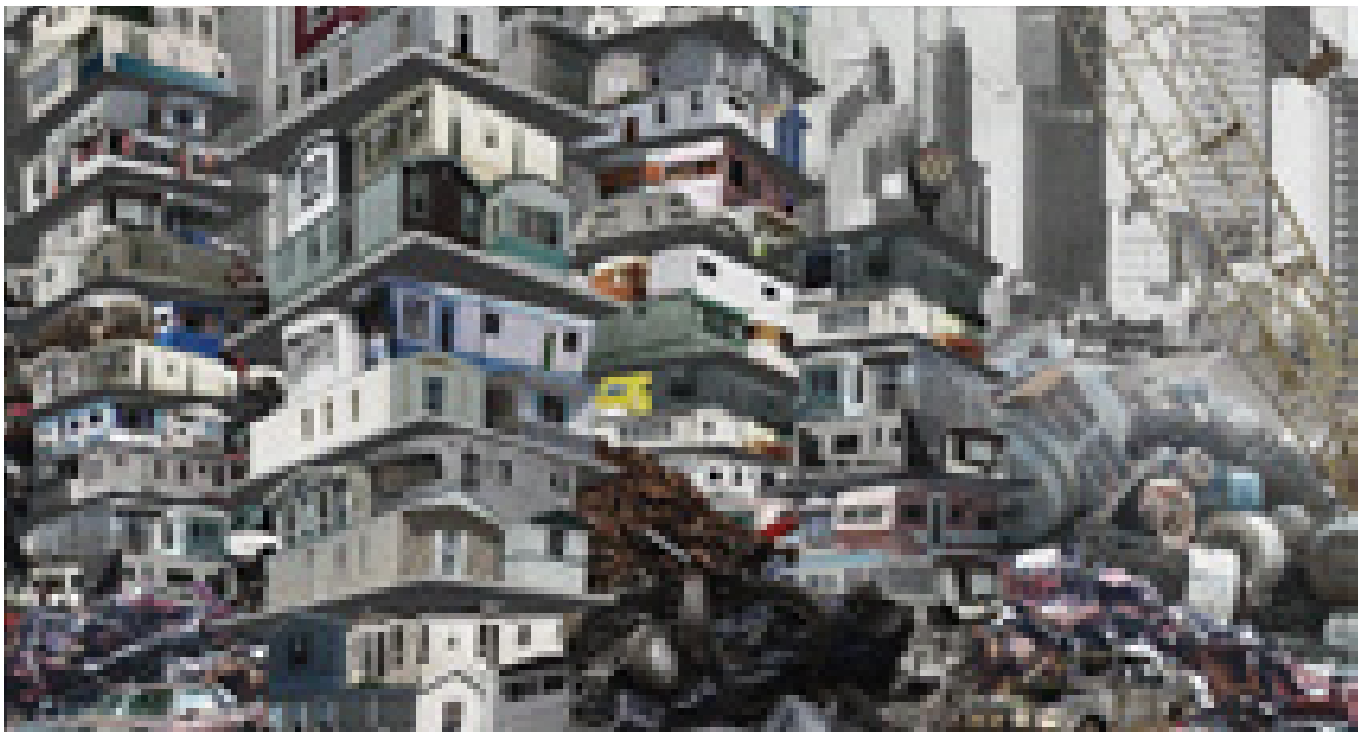
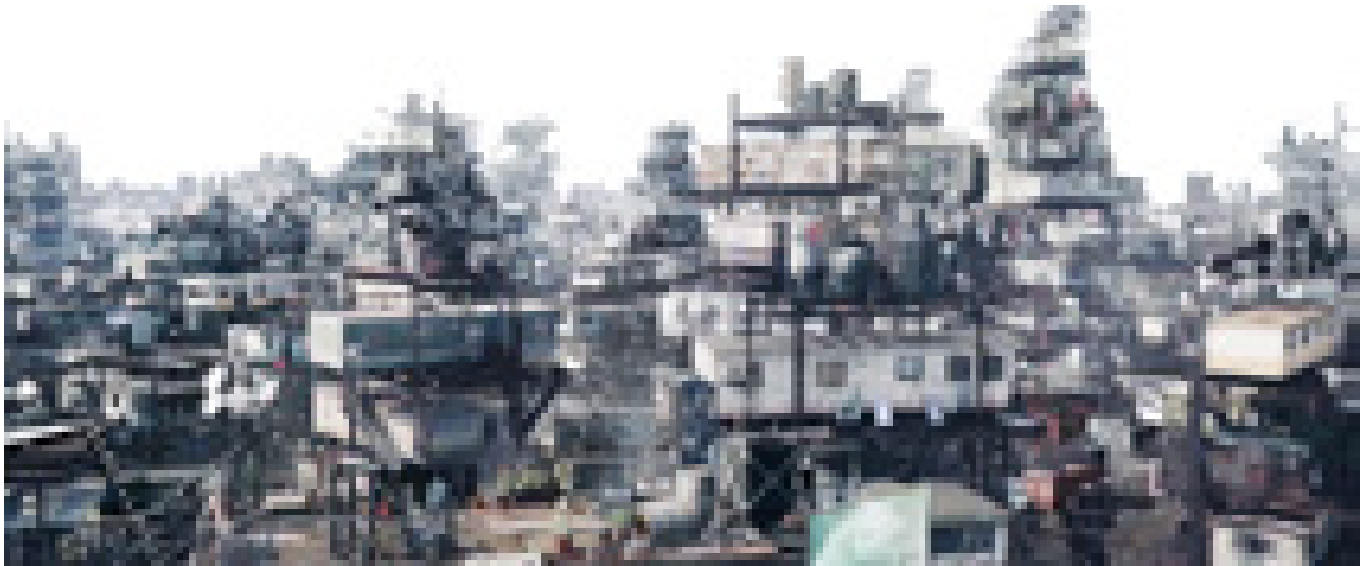
Manipolazione fotografica per un ospedale in disuso a Valencia, 2012.

Reale e Virtuale convivono nel tentativo di sviluppare una profonda e logica analisi dell'opera architettonica. La scomposizione è eseguita per apparati, il cui carattere funzionale è supportato nella rappresentazione dalla combinata immagine di unità, limite e sistema.

L'organismo edilizio è smembrato alla ricerca della gerarchia dominante sul sistema, raggiunta nel livello primario della Struttura.



(1.81) Strutture urbane distopiche nel mondo di "Ready Player One", film 2018: sopra scena di animazione, sotto concept art. Tale scenario, scelto in contrapposizione allo spazio virtuale OASIS, richiama la tangibilità fisica dei componenti strutturali materici che compongono apparati di supporto alle unità urbane. Se le connessioni tra elementi, fedelmente ricercate e riprodotte nella caratteristica formale, conferiscono una "possibilità" alla composizione delle unità spaziali, l'aspetto statico è tuttavia volontariamente assente dal contesto in funzione della natura stessa della scena, digitalmente simulata per l'animazione filmica. La manipolazione possibile nella dimensione virtuale altera così le possibilità formali delle strutture, che pur pretendendo di costituire copie del "reale" (in contrapposizione all'"irreale" virtualità volontariamente dichiarata) sono in realtà finzioni visuali di configurazioni equilibrio senza una corrispondenza statica che ne convalidi la realizzabilità.



NOTE

1 Cit. Gombrich E. (1985), *"L'immagine e l'occhio. Altri studi sulla psicologia della rappresentazione pittorica."* Torino: Giulio Einaudi Editore, p. 200.

2 L'estesa trattazione sulla pluralità di significati e contenuti legati al termine struttura è oggetto di ricerca in un contesto più umanistico legato al settore filologico. A titolo di esempio, si richiamano le linee di discussione raffrontate da una tavola rotonda sul tema della "problematica strutturalista". Lo scambio di punti vista concorda sull'esistenza di varie prospettive di ricerca, tra le quali quella architettonica, incentrate sul concetto di 'struttura'. Da questo si può legittimamente dedurre come la tematica affronti una molteplicità di aspetti base della scienza contemporanea, più ampiamente affrontati in termini specifici in Bastide R. (1974). *"Usi e significati del termine struttura"*. Milano: Bompiani.

3 La 'struttura' come 'logica' si relaziona al campo dell'architettura in termini di connessione visuale, e può essere intesa come modalità di rapporto tra lo spazio logico e la sua percezione da parte dell'utente. Le componenti eterogenee della complessità architettonica intrecciano rapporti associati a funzioni specifiche, ciascuna caratterizzante un ruolo e una collocazione tali da trovare corpo più nelle relazioni stesse che nelle singole parti. *"Le caratteristiche esteriori dello spazio visibile sembrano sottendere un'architettura nascosta di legami e componenti, che si materializzano in forma di immagini, testi, icone grafiche e da tutte le forme di indici e mappe. [...] Il risultato della traduzione dello spazio logico ci offre uno spazio che, nella sua frammentazione, condensa non solo codici e linguaggi diversi, ma anche un continuo rinvio, nel rapporto causa effetto, tra il particolare e la complessità della rete."* Cit. Bianconi F. (2005) *"Segni digitali. Sull'interpretazione e il significato della tecnologia digitale per la conservazione dei beni culturali"*. Perugia: Morlacchi Editore, p. 43.

In riferimento all'estetica, il concetto di 'struttura' è chiamato a rappresentare un'unità di parametri espressivi percepibili dal soggetto per la formulazione di un giudizio di adeguatezza. Si intende così un apporto di valori comunicabili, in forma qualitativa quanto quantitativa, tali da permettere ad un soggetto di potervici rapportare. In particolare, sono definite proprietà strutturali intese quali proprietà che *"chiunque sia dotato di occhi, orecchio e intelligenza normali"* può rilevare. Cfr. D'Angelo P. (2011), *"Estetica"*. Roma: Laterza, pp. 177-206.

Infine, il termine 'struttura' è riferito in ambito 'comportamentale' a indicare metodi e principi costruttivi tali da identificare la conformazione del pensiero cognitivo legato all'immagine architettonica. La 'durata' dello spazio intesa come 'non discorsiva' istituisce una connotazione integrante e naturale della materia, e quindi della fisica, considerabile anche in veste di parametro esterno di ordine. In tal senso, l'istituzione di intervalli qualitativi della configurazione di una possibile architettura collide in tracce evolutive sulla materia che,

per quanto reversibili, lasciano un segno irreversibile di modificazione permanente sul sistema. Così *"la materia procede automaticamente ed autonomamente per livelli successivi di complessità e perché lungo tale processo costruisca, come uno stadio connaturato e conseguente, la coscienza di sé"*. Cfr. Leoni F. (2001) *"L'architettura della simultaneità nello spazio antiprospectico"*. Roma: Meltemi Editore, p. 66.

4 Cfr. Bastide R., *op. cit.*, p. 45.

5 Struttura, dal latino *structura*, astratto di *struere* 'costruire' (sec. XV), è intesa complessivamente come configurazione di un insieme in rapporto ai concetti di 'distribuzione' e 'organizzazione'. La funzione di sostegno e collegamento è specifica della sua declinazione al campo delle costruzioni. Tra le specifiche definizioni, L. B. Alberti identifica la struttura con la generica costruzione materiale, affermando (*De re aedificatoria*, lib. III) che *"il modo di eseguire una costruzione consiste tutto nel ricavare da diversi materiali, disposti in un certo ordine e congiunti ad arte, una struttura compatta, integra e unitaria nei limiti del possibile"*, per cui bisogna *"ricercare nella struttura quali siano le parti fondamentali, quale sia l'ordinamento di queste e quali le linee essenziali di cui si compongono"*.

6 Riflettendo su un'ottimizzazione già di carattere formale, la frequente intesa di 'struttura' e 'architettura' come coincidenti indirizza la distinzione tra le coinvolte 'variabili di progetto' e 'variabili di stato'. Le prime intese come agenti sulla forma e sulle dimensioni della struttura, fissate a priori dai requisiti progettuali; le seconde sviluppate temporalmente in termini comportamentali delle stesse. Cfr. AA.VV. *"Matematica e Architettura. Metodi analitici, metodi geometrici e rappresentazione in Architettura."* Firenze: Alinea Editrice, p. 119. Se la prima considerazione può portare a deliberare sulla corrispondenza, e la seconda sulla distinzione, tra 'struttura' e 'architettura', la presente trattazione provvederà nei capitoli successivi a riflettere sui principi di manipolazione ed espressione della forma in termini non solo progettuali, ma anche di influenza comportamentale delle tensioni di natura meccanica. A tale seguito, la distinzione sarà rimarcata.

7 In termini "plastici", ogni contesto di struttura architettonica individua una base relazionale dove *"ogni modificazione rimane impressa e trasforma in modo permanente la materia esistente conservandone i caratteri, dove anche i traumi della storia vengono riassorbiti"*, identificando forme di edifici, ambienti ed apparati ottenute per successive, continue trasformazioni nel corso del tempo, a partire da una materia originale dotata di una propria duttilità. Non solo la struttura costruita è plastica, lo è anche l'approccio di percezione ed analisi che necessariamente deve esserle adottato. Il disegno di architettura stesso, quando non nasce dalla pura intuizione, si poggia su un atto di documentazione procedendo per fasi formative e trasformazioni fino all'esito finale: è, in tal senso, un'operazione plastica, tanto quanto l'oggetto che si trova a documentare. Cit. Strappa G. (2014). *"L'architettura come processo. Il mondo plastico in divenire."* Milano: Franco Angeli Edizioni, pp. 9-19.

8 Cit. Beguinot C., "Introduzione", in De Sivo B., Cardarelli U. (1965). *"La struttura in edilizia e in urbanistica"*. Napoli: Istituto di Architettura e Urbanistica.

9 Ibid.

10 "[...] si ammette preliminarmente che la struttura poggia su l'organizzazione e la finalità degli elementi che formano un insieme caratterizzato e interrelato, cioè un sistema, mentre la costruzione è atto e risultato di un processo strutturale, allora si riconosce che la struttura, esistente già nel pensiero progettuale e nel linguaggio esplicativo di esso, si materializza attraverso la costruzione [...]. Il risultato è un quid connotato da una geometria [...] e da una fisicità [...], proprietà inscindibili di quella data struttura, la quale non varia quando resti inalterato il sistema-base di tutti gli elementi o entità del quid. Quand'anche cambiassero le misure, potrebbe non cambiare l'espressione formale della costruzione, [...] finché non se ne alteri l'equilibrio statico si da richiedere un diverso assetto di parti resistenti [...]; pur nella sostituzione di elementi [...] potrebbe mantenersi invariata l'organizzazione compositiva d'insieme, finché non si aggiungano, per collaborare staticamente, altri elementi che modificano il sistema-base della costruzione." Cit. Tagliaventi G. (1996) *"Morfologia strutturale dell'architettura. Forma, materia, spazio, caratteri, tecnologia"*. Roma: Gangemi, pp. 11-12.

Per una trattazione più estesa, si rimanda anche a cfr. Heyman J., Rugarli P. (2014). *"Lo scheletro di pietra. Ingegneria strutturale dell'architettura in muratura"*. Roma: EPC Editore.

11 "Si sarebbe così tentati di pensare che il termine 'struttura' acquisti il suo valore solo in discipline vive, e scolorisca invece, a vantaggio di termini come forma o modello, in quelle che si trovano in fase di immobilismo o di accademismo." Cit. Francastel P. (1974) *"Nota sull'impiego del termine struttura in storia dell'arte"* in Bastide R., *op. cit.*, p. 45.

12 Il concetto di 'modello' espresso in termini di rappresentazione architettonica con carattere strutturale richiama un assunto di simulazione virtuale delle conoscenze documentali acquisite tali da dettagliare un modello non solo informativo, ma prima di tutto visuale di supporto al processo di analisi. Tale prodotto assicura, attraverso il dettaglio raggiunto, il bisogno di fisicità e tridimensionalità dei sistemi di rappresentazione, definendo una funzione non solo formale ma tecnica e costruttiva delle relazioni di rapporto tensionale ed assemblaggio delle componenti della fabbrica, anticipando l'espressione di una realtà meccanica celata nella qualità dell'aspetto formale. Per una trattazione più estesa su considerazioni elaborate nell'esperienza di casi studio, cfr. Mandelli M., Velo U. (2010) *"Il modello in architettura. Cultura scientifica e rappresentazione"*. Materia e geometria 18/2010, Firenze: Alinea Editrice.

13 L'espressione di 'forma' in termini di rappresentazione, quale insieme di tratti morfologici trasposti dalla realtà esperibile, difficilmente riesce a coniugarsi con un metodo di corrispondenza oggettiva tra l'oggetto e il suo disegno, ma risente invece di atti di manipolazione volti a adeguarlo, in termini sia geometrici che logici, per installarlo dal piano reale a quello virtuale di analisi. Il difficile

controllo di tali trasformazioni è sperimentato in funzione della variabilità di contesti e obiettivi di studio, anche solo considerando l'ambito delle costruzioni e dell'architettura, ed esercita un effetto anche nel campo del disegno strutturale. Per una trattazione più estesa dei processi cognitivi di base nella manipolazione dell'oggetto per la sua rappresentazione, cfr. Anceschi G. (1992) *"L'oggetto della raffigurazione"*. Milano: ETAS libri.

14 La combinazione logica-estetica-comportamentale di analisi per gli apparati strutturali architettonici definisce solo una tripla macro-classificazione di più specifici e contestuali settori di approfondimento della conoscenza. Nel percorso logico di comprensione della struttura finalizzato a consapevolizzarne l'intervento e il restauro, è possibile sviluppare un articolato compendio di livelli di conoscenza per il suo rilievo critico, ciascuno dei quali si riferisce a sua volta ad un catalogo di descrittori di approfondimento che guidano la disciplina della rappresentazione della sua declinazione descrittiva in termini di adeguatezza al tema in esame: livello architettonico, morfologico, tipologico, figurativo, geometrico, proporzionale, metrico, costruttivo-storico, di danno, fessurativo, di degrado. Cfr. Bini M., Bertocci S. (2017). "Il rilievo per il restauro dei tessuti storici in contesti colpiti da eventi sismici", Editoriale. *DisegnareCON*, vol. 10, (18), pp. 0.1-0.4.

15 L'attributo estetico in termini strutturali è inteso come 'distribuzione', sulla ripartizione e scansione di componenti e connessioni in una data unità, 'disposizione', sulla maniera di aggregazione delle parti per il conseguimento di un dato limite dell'insieme, e 'ritmo', nella proporzione di tali aspetti a conseguire una frequenza non solo statica ma formale nell'unità compositiva. Riproposti da *distributio, dispositio e eurhythmia*, tali categorie derivano dalla teoria vitruviana assieme alle più propriamente estetiche *ordinatio, decorum e symmetria*. Cfr. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 269.

16 La teoria di una relazione essenzialmente equilibrata di misure nella struttura architettonica, come accordi dimensionali regolati tra le parti e finalizzati ad un risultato sia staticamente che formalmente armonico, ha affrontato numerose interpretazioni nel corso della storia, spesso confondendosi con un assunto di 'proporzione' implicante invece una fissità e costanza di tali rapporti, altrimenti variabili in funzione di scale armoniche funzionali. Ulteriore alterazione è data dal rapporto progettuale tra l'ossatura strutturale interna e l'involucro di organizzazione spaziale esterna dell'opera. Il riconoscimento di una regola dell'arte, derivata dall'osservazione diretta di tali termini, istituisce proprio in merito alle regole costruttive obiettivamente definite la possibilità di un confronto di coerenza tra diverse strutture. Si evidenzia il rapporto tra la dicotomia della 'teoria della costruzione' e 'costruzione della teoria', relazionando al contempo opere concrete e sistemi astratti. Per una trattazione più completa, cfr. Di Pasquale S. (1996) *"L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza"*. Venezia, Ed. Marsilio.

17 La logica di conformazione strutturale instaura un articolato rapporto tra la tipologia architettonica, il sistema statico, il carattere formale e la componente temporale. Così un suo approccio di studio e documentazione andrebbe sempre svolto con

un "metodo comparativo fra sistemi costruttivi differenti quanto nell'ambito di ciascun sistema omogeneo, tenendo in debito conto, ove se ne ravvisi la convenienza, sia la 'polivalenza funzionale' sia la 'flessibilità spaziale', la quale può essere 'interna', nel senso di adattabilità a una vasta casistica -programmata o no- di organizzazione geometrica dei volumi interni, oppure 'esterna', nel senso di trasformabilità formale e dimensionale per aggregazione, ingrandimento, riduzione, modificazione in generale." Cfr. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 289.

18 L'interpretazione dell'immagine in termini strutturali è orientata sempre più oltre la semplice percezione, ad intendere la derivazione di un modello che si sostituisce alla realtà in un dualismo concettuale alternato tra la semplificazione formale e la maggiore complessità meccanica dell'oggetto di indagine. Tale criticità è ricondotta alla comparazione tra i rapporti reali, concretamente osservabili nella dimensione formale e spaziale dei componenti resistenti, ed i rapporti latenti, legati alla conoscenza del componente modellato per simularne il comportamento fenomenico. Quest'ultimo, in particolare, risente di un'influenza contestuale maggiore, in considerazione di come "fasi diverse del flusso costruttivo si appoggiano a rappresentazioni diverse e quindi a modelli fortemente disparati, con incompatibilità latenti di connessione intermedia". Garagnani S. (2008). "Rappresentazione vs. modellazione: sintesi della percezione d'architettura nell'era digitale." *Disegnare CON* 1, 1/2008, pp. 1-5.

19 Si intende la complessa variabilità legata al lessico descrittivo del sistema 'struttura', declinato nell'ambito architettonico in più aspetti disciplinari inerenti la matematica, la fisica, il disegno ed i mezzi di espressione grafica quali canali sia attivi che latenti di comunicazione per la sua conoscenza sia formale che meccanica.

20 È evidente come sia l'approccio percettivo che quello grafico-semiologico al sistema 'struttura' comportino un contributo essenziale al campo della sua conoscenza per l'analisi, che non può risolversi né in un compendio di geometria descrittiva né in una sintesi di comunicazione visiva. La ricomposizione e la lettura unitaria delle diverse tematiche sviluppate, dalla forma alla meccanica, definisce invece il vero passo di elaborazione critica verso la definizione di modelli grafici, e racchiude il senso più profondo di declinazione della disciplina del disegno. Cfr. Cardone V. (2008). "Modelli grafici dell'architettura e del territorio". Salerno: CUES, p. 12.

21 Il tema della 'manipolazione' delle variabili visuali e, conseguentemente, grafiche derivanti dalla percezione è rapportato alla rappresentazione in un approccio di normalizzazione dei livelli di iconicità aspirabili da parte dell'immagine. Si richiama, in tal senso, il lavoro di A. Moles sulla sistematizzazione dei gradi di iconicità, poi ripreso ed attualizzato da Anceschi nell'identificazione della sua influenza nell'approccio alle diverse tipologie di oggetto della raffigurazione. Cfr. Anceschi G., *op. cit.*

22 Cit. Bernot L. (1955) "Contribution a l'etude internationale des Structures Sociale". *Bulletin International des Sciences Sociales*, VII, 4, 1955, pp. 643-651.

23 Cit. Quaroni L. (1979). "Progettare un edificio: otto lezioni di architettura". Milano: Mazzotta, "Lezione seconda".

24 Dalla definizione di 'struttura' riportata nel catalogo Treccani. Rif. Web: <http://www.treccani.it/vocabolario/struttura/> [Ultimo accesso on-line: 19/09/2019]

25 Ibid.

26 L'analogia si riferisce all'opera architettonica in chiara veste di organismo vivente, inevitabilmente coinvolto in fenomeni ed influenze agenti sul suo supporto materico, il quale è così soggetto a mutazioni e riallineamenti che, alla pari di uno scheletro animale, includono la capacità di evolversi ed adattarsi alle nuove richieste organiche per supportare la sopravvivenza dell'insieme. "Una struttura storica lega "organicamente", in un solo gesto costruttivo, il ruolo statico del materiale, la distribuzione, la sua espressione leggibile attraverso l'involucro resistente. [...] L'organismo costruito possiede, infatti, una propria struttura organizzata che si rigenera nel tempo. Non solo le forme, ma l'uso stesso degli edifici e dei tessuti, il loro consumo, richiedono un continuo aggiornamento, dalla prima costruzione alla loro piena maturità. Un organismo che non si rinnova è destinato a dissolversi." In tal senso, "non c'è alcun bisogno, in architettura, di simulare meccanismi di crescita, imitare con nuovi programmi informatici la formazione degli organismi. I processi, le storie della formazione degli organismi edilizi, sono iscritti con solare evidenza nella realtà costruita, ne fanno parte." Cit. Strappa G., *op. cit.*, p. 10.

27 Cit. Alberti, L. B. (1966). "L'architettura." Milano: Ed. Il Polifilo, Ed. originale Alberti L. "De Re Aedificatoria", Firenze, 1485.

28 La classificazione delle specifiche tecniche e formali nell'opera strutturale affronta il tema della 'misura' applicandolo come parametro di 'commensurabilità', per una omogeneità qualitativa di corrispondenza e armonia delle parti con il sistema, adeguatamente espressa nel concetto di modulo quale unità di scomposizione. Nell'obiettivo di "misurare la forma", quest'ultima si instaura come parametro qualitativo di base del vocabolario costruttivo, avanzandone un'istituzione dalle prevalenti regole di comunicazione grafica. Cfr. Ugo V. (1994). "Fondamenti della rappresentazione architettonica". Bologna: Società Editrice Esculapio, p.29

29 Il pensiero di Lévi-Strauss estende la correlazione tra le parti e la totalità della 'struttura' in senso architettonico oltre i limiti di ordine meccanico e geometrico, verso il sistema dinamico di relazioni e campi di forza che la possono interessare. Un senso teorico che influenza così trasversalmente i campi di interesse del termine, dalla linguistica alla fisica, evidenziando l'assunto di ordine proprio e priorità del sistema suoi componenti, singolarmente ravvisabili solo in funzione della totalità alla quale appartengono, l'"unitas multiplex". Si assiste così ad un fondamento scientifico di ampia portata, che sostituisce il metodo di indagine dell'"atomismo" con lo 'strutturalismo'. Per approfondire la trattazione, cfr. Lévi-Strauss C. (1968). "Antropologia strutturale". Milano: Il Saggiatore.

30 Cit. Balmond C. (2003). "Structure" in Gausa M., Guallart V., Muller W. (2003). "The Methapolis dictionary of advanced

architecture". Barcelona: Actar, p. 575.

31 Cit. Klee P. (1959). *"Teoria della forma e della figurazione, vol. I"*. Milano: Feltrinelli. Ed. orig. Klee P. (1956). "Das Bildernische Denken".

32 *"La struttura si veste di una forma, s'interpreta mediante la forma, e questa si esplicita in costruzione mediante la materia e la tecnica. Si può convenire che, mentre la struttura della forma è variabile, la forma della struttura è invariabile, ma non va confusa l'una coll'altra e tanto meno l'una e l'altra vanno confuse coll'architettura, pur essendone i fattori connotativi."* Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 14.

33 Cit. Alberti, L. B. (1966), *op.cit.*

34 La gerarchizzazione dei livelli di forma dai meccanismi di percezione coordina la concretizzazione della sua espressione grafica, incidendo sui gradi di variabilità tra l'effetto in quanto 'forma' propria e l'effetto in quanto 'segno'. Si afferma così un 'problema della forma' legato al tipo di informazione soggetta alla necessità comunicativa, e che accomuna le singole strategie in un fenomeno complessivo di materializzazione coordinato tra 'trasposizione dell'involucro' e sua 'costruzione matematica'. L'assunto di tale ricerca è consolidato nel pensiero pittorico di Kandinskij, dal quale si avvia una riflessione teoria trasversale a numerosi campi inerenti il disegno. Per una trattazione più estesa su tale teoria, cfr, Kandinskij V. V. (2011). *"Il problema delle forme e l'almanacco del Cavaliere azzurro"*. Milano: Abscondita.

35 Cfr. Alberti L. B., *op. cit.*, p. 232.

36 Il riconoscimento di corrispondenze tra la realtà visiva (esperenziale) e quella fisica (fenomenica) è alla base della teoria della percezione. Le due realtà sono sostanzialmente, essenzialmente diverse, ma possono essere formalmente, strutturalmente corrispondenti: non sono con-sostanziali, ma possono essere conformi. In tal modo l'esperienza visiva instaurata durante la percezione del fenomeno meccanico della statica strutturale tende a ricercare proprio nella forma il collegamento cognitivo di ordine ed organizzazione del fenomeno fisico, avviando il processo tra 'oggetto fisico', 'oggetto incontrato' ed 'oggetto rappresentato'. Per una trattazione più estesa su tali principi, alla base del più esteso campo della Gestalt, cfr. Köhler W. (2008) *"Evoluzione e compiti della psicologia della forma"*. Roma: Armando Editore. Ed. originale Köhler W. (1969) *"The Task of Gestalt Psychology"*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.

37 La percezione del limite della forma strutturale è supportata da espedienti specificatamente visuali anche non direttamente influenti sulla sua valenza fisico-meccanica, come nel caso del contrasto cromatico o del cono visuale. L'effetto generato dalla vicinanza comparativa tra la struttura specifica ed altre entità (come il cielo, altre costruzioni, elementi urbani) o con parametri di percezione visiva autonoma (lontananza, dimensione, temperatura) coagisce con la percezione specifica della forma strutturale, influenzandone la trasposizione della misura spaziale. Cfr. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 12.

38 Si ricorda come, tra le varie qualità fisiche che possono essere catturate in qualità formali dell'oggetto, il contorno è l'unica a non esistere realmente, ad essere un'astrazione legata alle condizioni percettive dell'osservazione. Questa caratterizzazione, strettamente legata alla relazione spaziale tipologica dell'osservatore ed alla finalità della sua percezione, gli conferisce una capacità eccezionale di sintetizzare in modo estremo e singolare la rappresentazione della struttura architettonica, schematizzando i suoi elementi in involucri semplici e riconoscibili. Si attua il processo di selezione, tra i segni tracciati, delle linee fondamentali atte ad *"esprimere le forme attraverso il loro margine, lasciar intuire il contenuto descrivendo il contenente, trascurare l'oggetto e concentrare l'attenzione sul suo limite."* In tal senso, l'identificazione del contorno e della superficie compresa assegna all'involuppo stesso *"un significato che si estende dal margine all'interno; anzi nella rappresentazione il margine torna ad essere solo la frontiera inessenziale che separata la cosa dal suo intorno ed è alla superficie in esso contenuta che si trasferisce ogni messaggio"*. Cit. De Rubertis R. (1994). *"Il disegno dell'architettura"*. Roma: La Nuova Italia Scientifica, p. 32

39 Cit. Nervi P. L., in Castelli F. R., Del Monaco A. I. (a cura di) (2011). *"Pier Luigi Neri e l'architettura strutturale"*. Roma: Print, p. 18.

40 Il rapporto forma-struttura si consolida sulla base dell'equilibrio dei corpi rigidi e delle dinamiche della loro deformazione, ulteriormente specificabili in seconda fase in termini di massa e variabili materiche di resistenza. Gli obiettivi di 'economia statica', atti a conformare l'opera strutturale garantendo adeguate fasce di stabilità, hanno costantemente accompagnato l'ideazione e la realizzazione delle geometrie resistenti proprie delle diverse figure strutturali nelle diverse epoche. Questo motiva il loro riferimento anche in termini di approccio visuale alla struttura, guidando la finalizzazione dei focus di indagine legati all'apparato strutturale ed alla sua documentazione, ed elaborandoli sulla variabilità di forme strutturali riscontrate nella storia dell'architettura, motivate proprio da tali ragioni statiche. Per una revisione estesa dei principi di equilibrio e rapporto forma-struttura, cfr. Pizzetti G., Zorgno Trisciunglio A. M. (1980). *"Principi statici e forme strutturali"*. Torino: Utet.

41 Cit. Pizzetti G., Zorgno Trisciunglio A. M., *op. cit.*, p. 3.

42 Tale dipendenza è sicuramente anche relativa al tipo di materiale di cui tali componenti sono di volta in volta costituiti. Ma è possibile considerare come le proprietà fisico-meccaniche proprie dei diversi materiali costruttivi, naturali o artificiali, siano variabili già implicitamente assunte in molti caratteri specifici delle disposizioni morfologiche e tecniche attuate in cantiere, in termini di forma e disposizione di blocchi, componenti resistenti, strati di allettamento o dispositivi di giunzione.

43 La definizione di strutture gerarchiche sulla complessità spaziale-costruttiva rimane alla base sia della pratica teorica conoscitiva attraverso il disegno che mutuata dai programmi digitali di calcolo, instaurando relazioni dinamiche tra le entità/dati. Il primo livello di scomposizione richiesto riguarda la differenza tra *primitive* (primitiva), *instance* (esempio), *object* (oggetto) e *class* (classe). La primitiva

rappresenta l'unità del modello, mentre l'*instance* deriva dalla sua manipolazione geometrica e parametrica per adattarla alla specifica conformazione dell'oggetto, ricorrentemente classificato come fisso e raccolto nella divisione delle classi. Per una descrizione più specifica, cfr. Saggio A., "Modello. Verso una logica della simulazione", in Migliari R. (2004). *"Disegno come Modello"*. Roma: Edizioni Kappa, pp. 66-70.

44 Cfr. Lévi-Strauss C., *op. cit.*

45 L'analogia tra architettura ed organismo si affaccia in senso vitalistico considerando i processi di intervento e restauro che possono interessare la forma strutturale, sia per via logica (in funzione di sopravvenute esigenze statiche o a seguito di eventi di dissesto) che per via storica (come la ricomposizione ideale della forma originaria di un monumento o complesso attraverso l'analisi dei suoi ruderi o ambienti). L'evoluzione dinamica dello specifico quadro meccanico è così legata alla continuativa, aggiornata e piena corrispondenza di quella struttura a determinate esigenze. Cfr. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 34

46 "In quanto studiosi di meccanica strutturale noi vorremmo tradurre tali leggi in modelli matematici, ma non c'è dubbio che il primo passo consiste nell'individuare [...]. Possiamo quindi leggere la meccanica delle strutture murarie nella architettura del passato, rilevarla nei sistemi di tessitura delle pietre, negli spessori dei muri, nei conci degli archi e delle volte, nei travi lignei dei tetti e dei solai. Rilevare la meccanica delle strutture significa rilevare ciò che nell'architettura ha funzione meccanica, il che spesso coincide con ciò che fa architettura. [...] è per questo che invoco l'attitudine del "rilievo" a catalogare e documentare." Cit. Giuffrè A. (1989). "Il rilievo nella scienza delle costruzioni". *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 50-52.

47 "[...] la struttura è una sola nella sua globalità, anche quando si modifichi l'aggregazione dei componenti il sistema di base e purchè non se ne alteri la funzione. Insomma, la struttura definisce e caratterizza in maniera inequivocabile, diacronica, a diversi livelli di valore globale dipendente da un determinato rapporto di forze naturali, ideali, espressive corrispondenti alle singole parti e al loro insieme, l'essenza di una realtà." Cfr. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 13.

48 Nei confronti della complessità delle conformazioni resistenti riscontrabili nell'architettura storica, la pratica dell'analisi strutturale si è consolidata sull'isolamento di porzioni della fabbrica edilizia dove il fenomeno di instabilità risulta più probabile. Concentrando l'attenzione su nodi tra murature, elevazioni, orizzontamenti e coperture, la percezione di insieme del sistema strutturale si è complessivamente orientata verso una sintesi morfologica propria e relazionale, sbilanciata sull'astrattezza signica. Si deriva così che "il tema del costruire ha troppe più valenze di quanto la meccanica sia in grado di controllare, e lo sforzo degli studiosi è nel contemplare tale complessa materia piuttosto che limitarla a schemi parziali, anche se corretti." Cfr. Giuffrè A. (1990). "Lettura sulla meccanica delle murature storiche". Roma: Kappa, pp. 33-68.

49 Nella necessità di rappresentare eventi che sono in partenza poco percepibili o del tutto invisibili, il percorso di

produzione di rappresentazioni grafiche diviene facilmente schematico poiché il primo destinatario della comunicazione dell'immagine è il ricercatore stesso. Egli attribuisce contorni all'entità osservata, evocata e ricostruita, e spesso scoperta e momento di rappresentazione si trovano a coincidere. In tal senso, "l'attribuzione di una particolare configurazione al fenomeno indagato rappresenta un esito conoscitivo rilevante", anche se in maniera semplificata, ma non può rimanere limitato a tale forma di auto-comunicazione. Cfr. Anceschi G., *op. cit.* p. 9.

50 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 14.

51 Ibidem.

52 Ivi, p. 15

53 Cit. Klee P. (2016) *"Confessione creatrice e altri scritti."* Milano: Abscondita. Ed. Originale: scritti 1921-1922.

54 Nella grotta si riconduce la più primitiva forma architettonica modellata dall'uomo, che dall'occupazione aborigena evolve in una vera e propria azione di intervento e progetto sulla struttura di tali ambienti, prevalentemente legata a valori cerimoniali che ne configurano dei veri e propri centri di rituali. La "cella" naturale, amorfa, accresce la sua struttura nell'evoluzione formale, quasi labirintica, di bassi corridoi e grandi camere naturali. È la grotta a suggerire, inconsciamente, la prima forma di struttura architettonica. Cfr. Mumford L. (1961) *"La città nella storia, dal santuario alla Polis, vol. P"*. Milano: Bompiani. Ed. originale 1961, ristampa 2002, pp. 41-43.

55 È evidente come numerose soluzioni costruttive impostate su forme strutturali succedutesi nel tempo abbiano definito l'evoluzione di sistemi continui di distribuzione statica delle fabbriche architettoniche parallelamente alle possibilità tecnologiche e costruttive di materiali, manodopera, contesto. Un esempio è quello del sistema architravato ellenico, inizialmente limitato dalla capacità di resistenza della lastra in pietra, poi sviluppato nella soluzione statica del trilito miceneo. La specifica tecnologica legata alla suddivisione della lastra in conci, con una suddivisione e moltiplicazione di unità formali, ha instaurato un processo evolutivo che dall'arco romano ha portato a configurazioni di più complesso sviluppo spaziale, fino alle volte rinascimentali.

56 Il supporto del disegno e della geometria descrittiva all'analisi delle strutture storiche è avviato dall'istituzione di ipotesi e teoremi sui meccanismi di instabilità dei moduli resistenti, derivati attraverso metodi grafici di verifica statica concentrati sulla relazione tra le forze vettoriali ed il limite formale del sistema strutturale. Ne sono un esempio lo schema trilitico di De La Hire e De Belidor, il metodo di Mery per la proiezione della poligonale delle pressioni nei sistemi ad arco, il metodo di schematizzazione delle funicolari, lo studio della sezione dei conci di Navier

57 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 10

58 Ibidem.

59 Cit. Gausa M., Guallart V., Muller W., *op. cit.*, p. 575.

60 Cit. Dorfler G. (2000). *"Scritti di Architettura (1930-1998)"*, a cura di L. Tedeschi, Milano: Mendrisio Academy Press.

Nel pensiero di Gillo Dorfles, “*la coscienza dell’effimero*” equivale alla “*consapevolezza da parte del creatore di non realizzare un’opera duratura*”, permettendo così all’architetto “*di concepire delle strutture che mai avrebbe realizzato*”.

61 Il tema della documentazione delle strutture storiche in architettura, nella loro conservazione e corrispondenza morfologica con l’aspetto funzionale meccanico, richiama necessariamente una riflessione sulla distinzione presente tra sistemi consolidati ed apparati effimeri di completamento. Mentre questi ultimi si concretizzano come supporti attivi ma temporanei, implicitamente previdenti di una pianificata sostituzione, i primi “*sfuggono il tempo reale*” ponendosi come riferimenti fissi attraverso le molteplici fasi di costruzione ed intervento sulla memoria statica dell’edificio. Tale distinzione influenza di conseguenza l’approccio nella caratterizzazione formale delle opere, dove la solidità lapidea e la permanenza dell’influenza tensionale nella dimensione delle rovine contrastano con la labilità e smantellamento delle articolazioni temporanee. Per una più estesa trattazione, si rimanda al pensiero di Marc Augé, in particolare cfr. Augé M. (2004) “*Rovine e macerie. Il senso del tempo*”. Torino: Bollati Boringhieri. Ed. orig. Augé M. (2003). “*Le temps en ruines*”, Paris

62 Cit. Augé M., *op. cit.*, p. 69.

63 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 15.

64 Il concetto di effimero riconduce al rapporto forma-tempo della struttura ed alla loro relazione in termini di ‘trasformazione’ attraverso un processo evolutivo. “*La forma dunque non è un ‘oggetto’ ma è un sistema in mutazione, in cui è possibile evincere un ‘processo’*”, il quale è orientato ad includere due dialettiche: una a breve durata, nell’allestimento della forma resistente stessa, l’altra a lunga durata, supportata dalla replicabilità dell’aggiornamento tecnologico di interesse meccanico ivi istituito. Per una trattazione più approfondita, cfr. Caliarì P. F., “*La forma nel tempo*”, in Cattiodoro S. (2012). “*Il fondamento effimero dell’architettura*”. Roma: Aracne Editrice, pp. 7-14.

65 Cit. Caliarì P. F., *op. cit.*, p. 10.

66 La lettura di un vocabolario delle strutture storiche per ‘archetipi’ individua una serie di caratteristiche attribuibili alla tecnica costruttiva ed alla base del vasto catalogo di soluzioni tessuarie: il posizionamento, l’elevazione, la continuità, la chiusura. Complessivamente, tali aspetti concorrono a definire la natura più propriamente ‘stereotomica’ e ‘tettonica’ della struttura, procedendo alla sua formazione per masse e volumi assemblati in continuità materica di strati composti, e definiti attraverso queste specifiche l’articolazione di corrispondenti forme costruite. Per una trattazione più estesa, cfr. Acocella A. (1954). “*L’architettura di pietra: antichi e nuovi magisteri costruttivi*.” Firenze: Alinea, ed. 2004.

67 Cfr. Marti Aris C. (1996) “*Le variazioni dell’identità - Il tipo in architettura*”. Barcellona: Città Studi, capitolo 4

68 Cit. Acocella A., *op. cit.*, p. 45.

69 Si riconduce a tale punto l’approfondimento della normativa tecnica attuale sulle costruzioni, la quale istituisce

nell’individuazione di nuclei di massa resistente, i cosiddetti “centri di massa” e “centri di rigidità”, una delle principali linee di valutazione strutturale delle verifiche di resistenza sismica. Cfr. NTC 2018, capitoli 4 e 7.

70 Cfr. Pardi G. (2012) “*Il fatto architettonico. Le risorse della produzione industriale*”. Milano: Franco Angeli.

71 Cfr. Middleton R., Watkin D. (1989) “*Architettura dell’Ottocento*.” Milano: Mondadori Electa.

72 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 140.

73 Cfr. Iori T., Poretti S. (2015) “*Il linguaggio delle strutture*”, in Martire F. (a cura di) (2015) “*Storia dell’ingegneria strutturale in Italia – SIXXI 2*,” Roma: Gangemi Editore, p.7.

74 Cfr. Tagliaventi G., *op. cit.*, p.138

75 Cfr. Pizzetti G., Zörgno Trisciungoglio A. M., *op. cit.*, p. 8.

76 Il concetto di “centro storico”, inteso come ambito urbano esteso, viene introdotto, dal punto di vista normativo, subito dopo il dopoguerra, quando si fa forte l’esigenza di provvedere alla ricostruzione e alla salvaguardia delle città. Cfr. Bravo L., Mingucci R. (2008) “*Centri storici. Evoluzione normativa e modelli di rappresentazione*”. *DisegnareCON* 1 (2), 2008, pp. 1-17

77 Cfr. Sanna A. (2009) “*Il nuovo progetto per i centri storici, tra conservazione e modificazione*”, in Ortu G. G., Sanna A. (a cura di) (2009) “*Atlante delle culture costruttive della Sardegna*”. Cagliari: DEI Tipografia del Genio Civile.

78 Cfr. Mumford L., *op. cit.*, p. 247.

79 Cfr. Versaci A., Cardaci A. (2017). Il rilievo per la conservazione e la valorizzazione dei borghi rurali della Sicilia centrale. *DisegnareCON*, 10 (18), pp. 8.1-8.18.

80 Cfr. Carocci C. F. (2011) “*Le ragioni della statica, dell’architettura e dell’uomo*”, in Giuffrè A. (2011) “*Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro. Saggi 1985-1997*”. Roma: Gangemi Editore, pp. 349-359.

81 Cfr. Giuffrè A. (2011), *op. cit.*, p. 35.

82 Ivi, p. 38.

83 Cfr. Formisano A., Florio G., Landolfo R., Mazzolani F. M. (2011) “*Un metodo per la valutazione su larga scala della vulnerabilità sismica sugli aggregati storici*”. XV Convegno ANDIS – L’ingegneria sismica in Italia.

84 Cfr. Minutoli G. (2017) “*Percorsi di conoscenza per la salvaguardia della città storica*”. Firenze: didapress.

85 Cfr. Giuffrè A. (2011), *op. cit.*, pp. 77-126.

86 Cfr. Versaci A., Cardaci A., *op. cit.*

87 Nello studio tipologico di un centro storico, l’analisi della connessione muro-muro è segno delle modalità di evoluzione del tessuto urbano, avvenute per successivo intasamento degli spazi liberi, sia sfruttando i muri di confine tra più costruzioni, non originariamente chiuse, che con nuovi interventi. In particolare, si parla di ‘chiusura’ con l’inserimento di un lato nuovo, come un paramento perimetrale che colma lo spazio tra due unità; ‘intasamento’

con la costruzione di due lati nuovi, a completamento angolare; 'accrescimento' con la chiusura di tre lati nuovi, che affiancano una nuova unità al tessuto preesistente. Per approfondimenti, cfr. Giuffrè A. (2011), *op. cit.*, pp. 77-126.

88 Cit. Gausa M., Guallart V., Muller W., *op. cit.*, p. 575.

89 Cfr. Giuffrè A., *op. cit.*, p. 205.

90 Cfr. Picard E. (1905). "*La science moderne et son e'tat actuel*". Paris: Flammatiou.

91 Cit. Fusco G. (1989). "Rilievo e memoria". In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 128-130

92 Cfr. Cruciani-Fabozzi G. (1989). "Il rilievo per la conservazione: dalla raffigurazione dell'architettura alle "carte tematiche" della fabbrica". In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 135-141

93 Cfr. Meogrossi P. (1989). "Gli indicatori storici, occasione e supporto di verifica del rilievo." In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 135-141

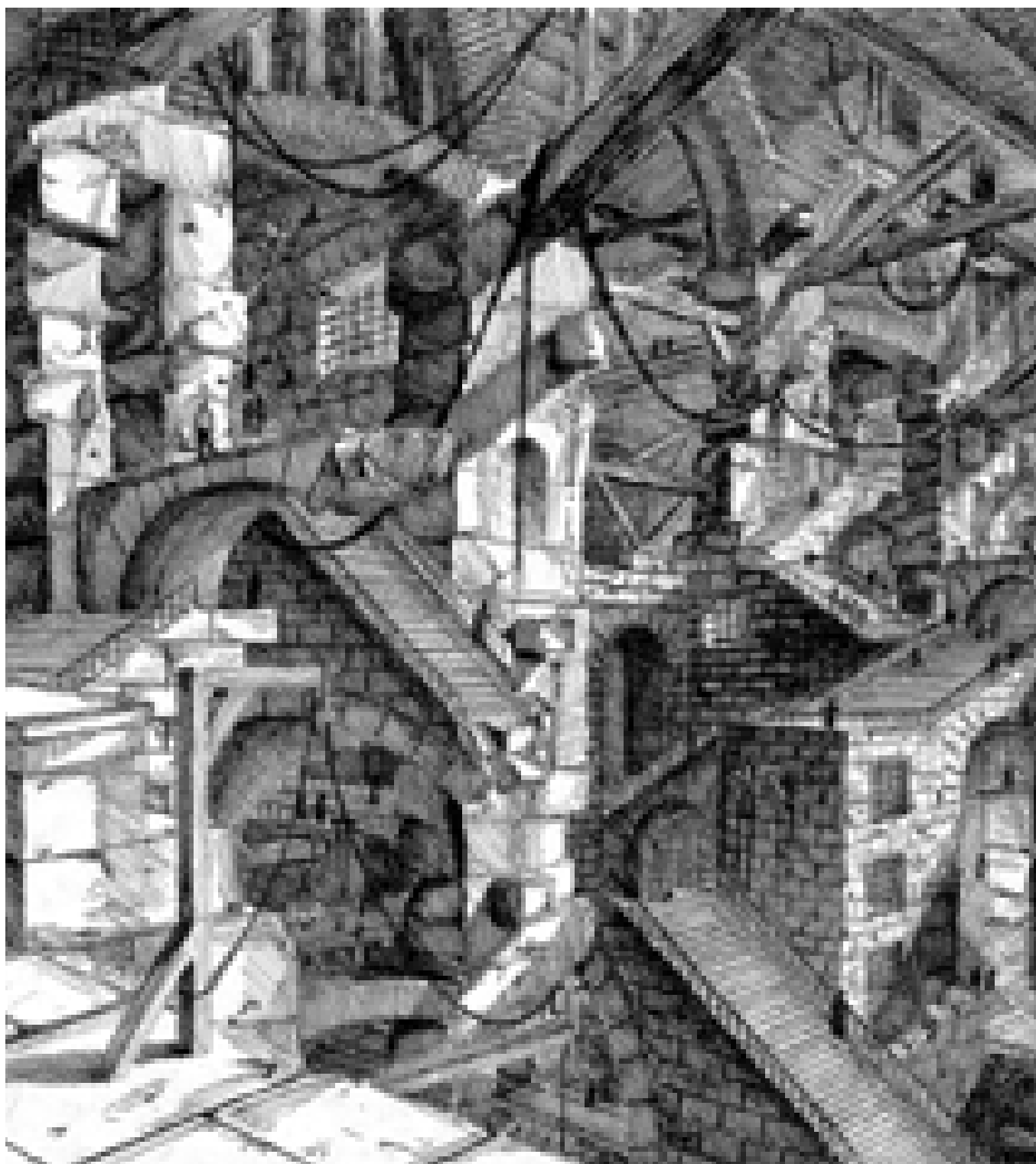
94 Cfr. Pizzetti G., Zorgno Trisciunglio A. M., *op. cit.*, p. 9

95 Ivi, p. 17

96 Cfr. Giuffrè A. (2011), *op. cit.*, p. 13

97 Cfr. Cardone V., *op. cit.*, p.14

98 Cfr. Nuti G. (1989). "La lettura del tempo e ricerca dei segni". In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 38-46.



CAPITOLO 2

Principi ed approcci grafico-formali nella rappresentazione strutturale

“I nostri occhi si sono venuti riducendo a meri strumenti mediante i quali misurare e identificare: da qui una scarsità di idee che possano venire espresse in immagini e una incapacità di ravvisare significato in ciò che vediamo.”¹

La revisione dei prodotti grafici nell'opera dei disegnatori approcciatasi alla descrizione fenomenica dell'architettura, in un ambito sia specificatamente orientato alla documentazione che finalizzato all'atto progettuale, contestualizza il tema dell'analisi strutturale evidenziando una costante variazione nella declinazione degli elaborati descrittivi, in particolare adottando la corrispondenza tra quadri signfici ed immagini affidabili come soluzione figurativa alla rappresentazione delle azioni meccaniche interagenti con lo scheletro strutturale.

Se da un lato tale corrispondenza appare innata e conservata durante le diverse epoche storiche e di alternato stile di rappresentazione, la specifica declinazione figurativa adottata non è risultata priva di criticità e contrasti nelle modalità e nei mezzi di espressione. La causa può essere riscontrata in particolare dalla duplice natura dell'oggetto di studio: tangibile, visibile in termini di variazioni morfologiche su superfici materiche, ed intangibile, virtuale, legato alla comprensione di fenomeni idealizzati di azione-reazione universalmente formulati ed espressi con linguaggio matematico².

Tale distinzione semantica ha alterato e spesso deviato lo sviluppo di una specifica 'scuola' di espressione grafica applicata alla rappresentazione strutturale, in particolare per la difficoltà di indirizzo univoco verso i possibili allievi e fruitori di tale conoscenza. Se la disciplina accademica, principale direttrice della cultura delle arti e della rappresentazione, ha visto lo sviluppo di un approccio al mimetismo della realtà materica per la sua conoscenza sistematica, la scienza della fenomenologia strutturale ha condizionato, nell'impronta analitica, un orientamento grafico prevalentemente signfico, con codici sintetici e schemi ad alta astrazione in qualità di supporti, non di contributi, al linguaggio matematico della meccanica dei corpi.

L'atto di rappresentazione del sistema resistente riconosce così il coinvolgimento combinato di un'azione mnemonica, figurativa e meccanica, nel tentativo di restituire, attraverso immagini significative, l'insieme degli aspetti formali, metrici e strutturali dell'oggetto di analisi.³ Nel processo di traduzione 'dalla realtà al disegno', il sistema identificato è sottoposto ad un'azione di dissipazione/decantazione signfica e concettuale⁴, dove inevitabilmente parte del significato della trasposizione stessa viene perso. L'evidenza fisica della struttura, in particolare, si trasmuta in un palinsesto di segni dotati di una nuova logica di immagine, che *“rispetto all'originale “carapace” privilegia ora l'aspetto dimensionale e formale, ora quello configurativo e relazionale, sottoponendo la materia a una serie di azioni dominabili o meno nell'esperienza fenomenica di ciascuno di noi”*.⁵

Il tema affrontato si concentra quindi sulla comprensione dell'effettivo contributo gnoseologico del disegno alla documentazione strutturale, concentrandosi sulle fasi emergenti della pratica rappresentativa nel contesto di studio. La suddivisione del percorso di ricerca attorno alla centralità della morfologia e delle sue classi figurative ricostruisce le variazioni grafiche apportate in rapporto alle necessità cognitive e analitiche evidenziate nel progredire della tecnica delle costruzioni, e riscontra nel grado di trasformazione e declinazione dei componenti fondamentali del disegno quelle che sono le capacità ed i limiti di operazione effettivi dell'immagine applicata alla statica dell'architettura.

Nella pagina a fianco:

Giovanni Battista Piranesi, “Carceri di Invenzione”, 1745-1750.

2.1. ESPRESSIONE FIGURATIVA DELLA MECCANICA STRUTTURALE: PRINCIPI DI REVISIONE GRAFICA.

Come per la definizione del concetto stesso di 'struttura', la declinazione del disegno ad essa dedicato ha attivato nel tempo modelli di approccio grafico di più generale sviluppo nelle pratiche connesse al 'disegno dell'architettura'. L'assenza di dedicate scuole o accademie interessate sul tema ha ritardato, verso il Settecento, l'affermarsi di un pensiero indirizzato specificatamente alle effettive criticità e qualità per la comunicazione del sistema meccanico, lasciando che la rappresentazione complessiva dell'opera architettonica sviluppasse un linguaggio grafico universale, non specializzato ma capace di esprimere in un'unica chiave illustrativa tutti i diversi ambiti funzionali ad essa legati, tra i quali quello della capacità resistente.

Il percorso sintetizzato evidenzia un'introduzione al problema rappresentativo dell'apparato strutturale di carattere tematico, concentrato sulla conoscenza acquisita e trasmessa in termini di 'figura' con riferimenti tecnici di più libera precisione quanto logici nella corrispondenza immediata ai processi di costruzione. Il controllo 'geometrico' e l'istituzione di una 'proporzione' dei componenti dell'apparato avviano una revisione delle modalità di attuazione mimetica della rappresentazione, della sua profondità e del grado di incidenza critica sui processi di documentazione del sistema strutturale, indirizzata verso una crescente finalizzazione di carattere gnoseologico. La conoscenza degli apparati resistenti viene così approfondita e precisata in termini di rapporti tra le forme esistenti e quelle riproposte, in un'elaborazione del rilievo sempre più connessa all'aspetto materiale e tecnologico della sua applicazione. Il rapporto formale-meccanico è così prima consolidato in 'moduli' tassonomici e successivamente condensato in 'scheletri' strutturali capaci di meglio enfatizzare i percorsi tensionali agenti sul sistema.

Il conseguimento dell'immagine strutturale in termini di 'matrice', adeguata ai processi analitici delle piattaforme di calcolo, segna un passaggio dello stato dell'arte in materia di prodotto grafico applicato alla tecnica delle costruzioni dove il contributo del disegno si riduce alla sintesi dei processi di astrazione della realtà, e sembra annullare la coerenza tra forma e struttura, vanificando la ricerca di una realtà spaziale più complessa ma al contempo ricca di informazioni, completa ed esauriente.⁶

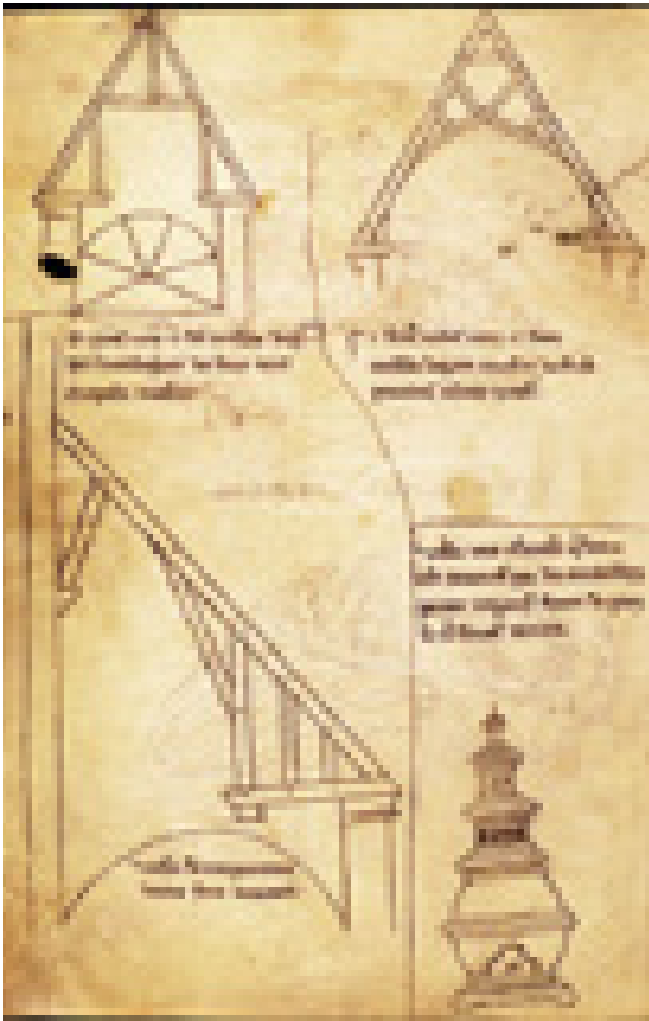
2.1.1. *Figure strutturali: la tecnica della linea supportata dalla meccanica allegorica*

L'impressione di equilibrio manifestata nella genesi dell'opera architettonica, in termini non solo di contorno ma anche di unità ed articolazione, declina dal XII secolo un'attenzione specifica del lessico grafico sulla rappresentazione dell'insieme strutturale.

La logica figurale di componenti e realtà costruttive è perseguita con crescente fiducia a seguito dell'abbandono del *continuum* murario per il passaggio a sistemi di appoggi puntuali, quali tecniche già associate ma prima impiegate in maniera meno estesa nella costruzione di fabbriche complesse⁷. Tali innovazioni sottendono così la pratica costruttiva all'impiego di conoscenze geometrico-matematiche ben oltre l'implicito studio di tecniche e materiali, generando modelli meccanici più articolati che spingono verso una dedicata grafica descrittiva per la loro determinazione compiuta.⁸

La produzione grafica si concentra così attorno al disegno di schizzi e schemi figurativi legati alle istruzioni di cantiere, luogo originario dell'attuazione di tali innovazioni morfostatiche⁹. Tra il repertorio conservato, considerando ancora l'assenza di un'apposita pratica rappresentativa, è possibile ritrovare dettagli di archi rampanti, capriate, torri, catini absidali, pilastri, sagome in legno e del taglio delle pietre. Una raccolta che enuncia l'intento non tanto mimetico, di perfetta aderenza ai dettagli tecnici, quando cognitivo nell'identificazione specifica di soluzioni meccaniche compiute e innovative, trasponendo i sistemi costruttivi applicati attraverso la nitidezza della linea di contorno.

Questa attitudine è avviata nel XII secolo con l'opera grafica contenuta negli *Architekturmusterbücher*¹⁰, dove il delineamento delle componenti strutturali è applicato quale atto primario alla loro identificazione e comprensione costitutiva, senza la pretesa di verificare una perfetta corrispondenza proporzionale e di dettaglio tra il disegno e la realtà formale¹¹. Il processo rappresentativo è così condensato nel primo atto di individuazione dei componenti del sistema, distinguendoli, numerandoli e collocandoli con ordine nello spazio. Manca ancora l'attenzione grafica verso le modalità di connessione, lasciando che il tracciato



(2.1) Villard de Honnecourt, "Livre de portraiture", XII secolo.
La rappresentazione, lontana dall'individuare un dominio spaziale delle strutture, si concentra sul loro delineamento in termini di insieme figurato di componenti. Ogni elemento ligneo è definito e raccordato alla struttura complessiva, evidenziando la sua identità nel sistema.

di contorno definisca compiutamente gli elementi senza fornire segni meccanici di articolazione.

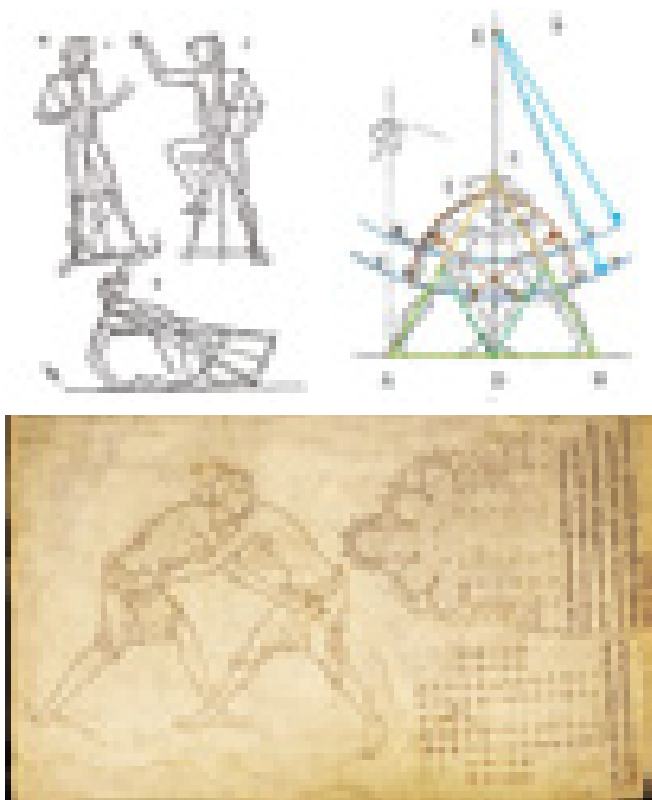
La linea è adottata quale unità grafica generatrice della figura strutturale¹², sviluppando un principio razionale di ordine che dalla delimitazione del campo esterno penetra fino agli elementi resistenti primari¹³. Mantenendosi pulita e precisa, essa si moltiplica, arricchisce ed ingentilisce, e sempre attraverso il tracciato di contorno diviene nitida espressione della materia "interna al limite"¹⁴.



(2.2) Villard de Honnecourt, "Livre de portraiture", XII secolo.
Dal profilo delinato delle configurazioni umane e animali, il tentativo di rivelare le direttrici di tensione ed i loro schemi di equilibrio viene perseguito attraverso la costruzione di geometrie regolari di ordine della scena. La linea pura è adottata a soddisfare tali requisiti figurativi.

La rappresentazione si declina come atto sensibile di relazione tra la descrizione, grafica, e l'esperienza, visuale, del sistema strutturale, evidenziando la combinazione di valori qualitativi dinamici il cui ruolo strategico emerge attraverso la definizione dei lineamenti¹⁵, in termini di costruzioni grafiche "animate" proiettate nella e dalla mente del disegnatore in antitesi con quelle materiali del mondo fenomenico.

La volontà di esplicitare le necessità statiche nell'articolazione degli elementi strutturali rimane ancora



Dall'osservazione della fenomenologia reale agli schemi figurali e vettoriali di equilibrio. (2.3) Eugène Viollet-le-Duc, *Dictionary of French Architecture from 11th to 16th Century*, 1856, ispirato a (2.4) Villard de Honnecourt, "Livre de portraiture", XII secolo.

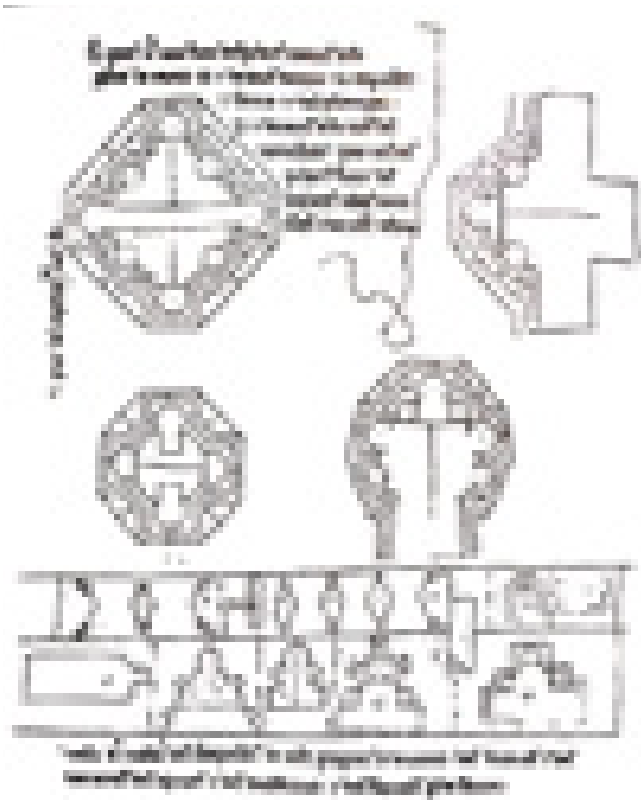
irrisolta in termini di ragionata trasposizione mimetica o simbolica, e la componente di tensione spaziale è assegnata attraverso composizioni allegoriche, in un ampio repertorio inizialmente recante le figure concluse associate al modulo meccanico. Successivamente, l'allegoria dei corpi è combinata a schemi grafici definiti dalle direttrici di forza delle tensioni, interne alla struttura sistema-figura. *"A prescindere del tutto dalla diversità di caratteri che vengono determinati dalle tensioni interne, e a prescindere dai vari processi di formazione, la fonte originaria di tutte le linee rimane la stessa, la forza. La collaborazione della forza col materiale dato introduce nel materiale l'elemento vitale, che si esprime in tensioni. Le tensioni, a loro volta, esprimono l'aspetto interno dell'elemento. L'elemento è il risultato reale del lavoro della forza sul materiale. La linea è il caso più chiaro e più semplice di questa opera di formazione."*¹⁶

2.1.2. Geometrie strutturali: regolarità ed assoluto nello scheletro resistente

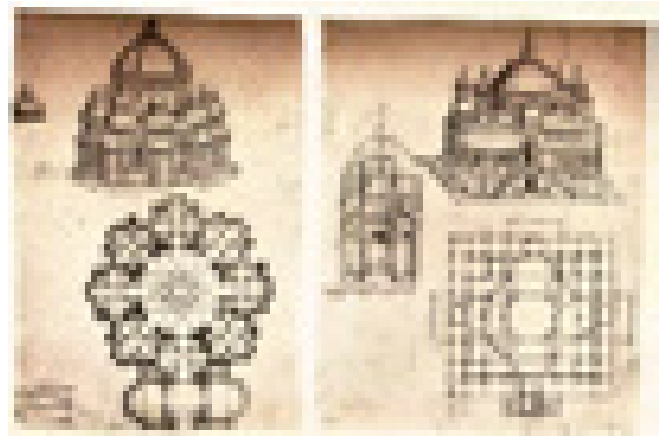
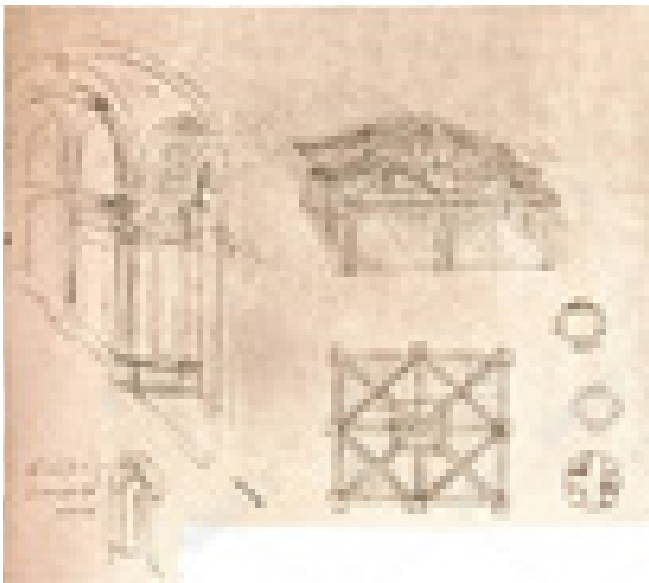
Il tema delle figure regolari e delle proporzioni armoniche, già presente in modo spontaneo nella costruzione architettonica ma riaffermato e teorizzato durante il Rinascimento, centra il discorso del disegno della struttura sui fondamenti della geometria e sulla possibilità di gestione, attraverso tali principi, dei suoi moduli elementari non solo come elementi a sé stanti ma in relazione con gli altri componenti del sistema¹⁷. Le tradizionali proporzioni tra la singola articolazione e l'unità dello scheletro resistente sono così affiancate da nuove logiche di rapporto, creando legami razionali che al tempo stesso identificano ed articolano i diversi elementi. La Geometria è accettata come Sistema Assiomatico Formale, un *a priori* dall'esperienza sensoriale della proporzione spaziale, che da Vitruvio attraverso i primi trattatisti teorici giunge alla Teoria delle Geometrie Formali come strumento per indagare l'Idea della Forma della realtà fisico-architettonica, oltre alla *forma mentis* dell'intero approccio alla struttura fisica ed alla sua rappresentazione¹⁸.

*"La tradizione rinascimentale, quindi, valorizza la pratica grafica nella sua funzione ideatrice."*¹⁹ E la regola geometrica è introdotta nell'idea di struttura in termini sia di 'visibilità', con analogie razionali e proporzioni simboliche, che di 'tecnica', nell'attuazione concreta per la costruzione del suo sistema²⁰. La Struttura Geometrica si configura come sostegno sicuro all'idea disegnata dello scheletro resistente, tanto percettivamente, con richiami, coincidenze, allineamenti, quanto logicamente, recuperando ed esaltando i moduli elementari dei rapporti di trasmissione tensionale e delle figure statiche di equilibrio, testimoniando una *"sensibilità organica verso le strutture piuttosto che la consapevolezza di obiettive leggi meccaniche"*²¹.

La rappresentazione individua una connessione tra struttura e immagine tramite l'articolata costruzione di operazioni geometriche, assumendo un ruolo insostituibile nello sviluppo di matrici regolari²² descrittivamente basate sulla linea di tracciato, ed impostando un carattere di 'regolarità' per mantenere lo schema semantico senza mai esplicitarlo totalmente ma rendendolo comunque riconoscibile all'interno del contorno disegnato. L'espressione grafica consuma la sua funzione descrittiva del sistema strutturale in un'elaborazione formale di primo livello, inquadrata

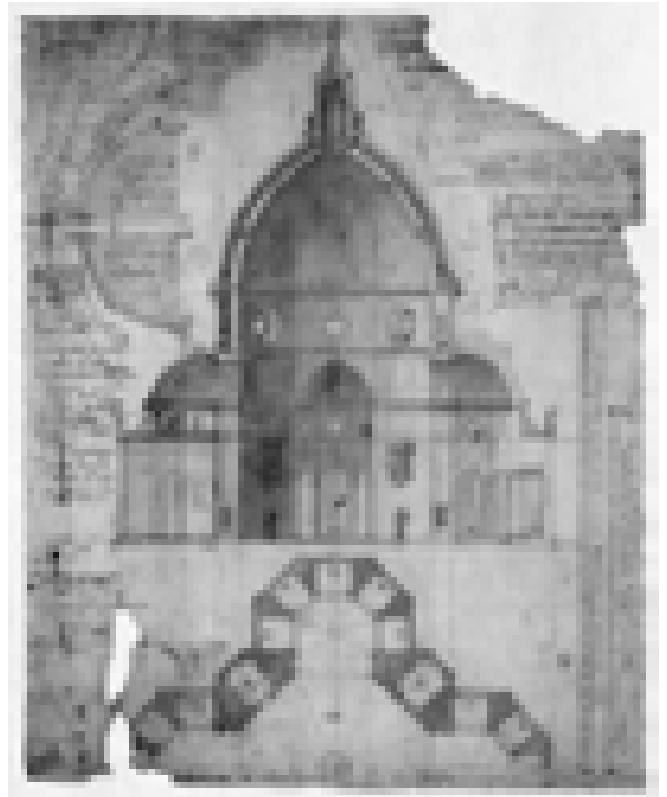


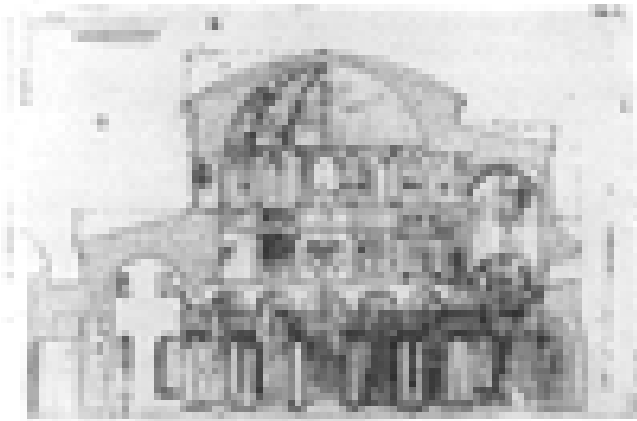
Sotto (2.7) Leonardo da Vinci, disegni architettonici di dettagli strutturali, 1472-1512, da Jean Paul Richter, *The Literary Works of Leonardo Da Vinci*, Vol. II, 1883. A destra (2.8) Filippo Brunelleschi, disegno della cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze, riproduzione del Cigoli, 1613.



La rappresentazione delle forme strutturali inizia a prediligere le proiezioni di planimetrie e sezioni basate sulla costruzione geometrica. La linea si articola ed arricchisce per aumentare il contenuto descrittivo.

A sinistra (2.5) Villard de Honnecourt, studio delle sezioni delle colonne nella cattedrale di Reims, XIII secolo. Sopra (2.6) Leonardo da Vinci, rappresentazione architettonica di due chiese, 1472-1512, da Jean Paul Richter, *The Literary Works of Leonardo Da Vinci*, Vol. II, 1883.





(2.9) Jacopo Barozzi da Vignola, Mausoleo di S. Costanza, Roma, 1550. La disposizione geometrica ed il massiccio volume delle strutture contenute nella linea di sezione definiscono l'immagine della struttura.

su forme geometriche assolute elaborate in termini di complessità tramite azioni di addizione e moltiplicazione di moduli, lasciando però sempre alla regola geometrica il ruolo di districare la forma strutturale quale criterio di disposizione delle unità e di definizione del contorno resistente. “*Quando le dimensioni dell'opera siano notevoli, la perfetta aderenza alle leggi statiche, peraltro indispensabile, finisce per determinare un'estetica “assoluta” di origine e definizione presuntivamente razionale.*”²³

Il disegno della struttura, in un'impostazione leonardiana poi mantenuta ed ampliata, riparte dagli schemi grafici 'lineari' delle 'allegorie meccaniche' ed abbraccia la complessità geometrica come regola di articolazione ed elaborazione delle direttrici tensionali, rafforzando poi il segno dello scheletro resistente attraverso il peso del tracciato, fino a raggiungere una campitura monocroma racchiusa tra le linee di delimitazione dei due perimetri murari interno ed esterno. Allo spessore cromatico è affidato il ruolo cognitivo della rappresentazione, e l'immagine della struttura si esaurisce in una gerarchia grafica di due livelli, l'impostazione schematica regolare ed il corpo di peso formale, trattenendosi dall'approfondimento sulle specifiche tecnologiche della costituzione materica.

Le informazioni inerenti all'articolazione del sistema sono assorbite dall'uniformità della campitura, enunciando nell'esaltazione della regolarità geometrica l'implicita corrispondenza dei requisiti materici e tecnologici all'equilibrio statico. La perfezione della geometria sovrasta

e domina la lettura dell'equilibrio strutturale, al livello macroscopico nell'impostazione dell'intera fabbrica ed a livello di dettaglio sottintendendo un'implicita suddivisione in unità articolate. L'interazione tipologica statico-dinamica in atto è omessa, rimandando all'equilibrata ripartizione geometrica delle tensioni come risposta consequenziale ovvia dell'impostazione regolare, senza prevedere alcuna possibilità di evoluzione tensionale e, di conseguenza, deformativa di componenti e paramenti.

2.1.3. Proporzioni strutturali: composizione tra misura e statica nel disegno delle fabbriche cinquecentesche.

Il processo di geometrizzazione dello spazio e della sua struttura è posto alla base della dimensione fisica e statica delle fabbriche architettoniche cinquecentesche, ritrovandovi una sua espressione in termini sia progettuali che documentativi nella specificità degli elaborati grafici sviluppati dalla scala delle macro-fabbriche a quella di dettaglio costruttivo.

La premessa istituita dagli assiomi di regolarità e armonia è recuperata per lo sviluppo di metodi quantitativi di conoscenza dei rapporti spaziali istituiti, sia misurati che commisurati²⁴, coordinando la rappresentazione sull'istituzione di convenzioni grafiche necessarie ad uniformare il linguaggio tecnico-espressivo dell'insegnamento architettonico. Le basi metodologiche sono così innestate in una manualistica²⁵ al tempo stesso orientata su criteri operativi e repertori tipologici capaci di disporre il catalogo di forme costruttive dal modulo parziale alla composizione dell'intero sistema, ed al loro interno le disposizioni inerenti all'apparato resistente dell'opera architettonica sono consolidate senza apparente distinzione tassonomica.

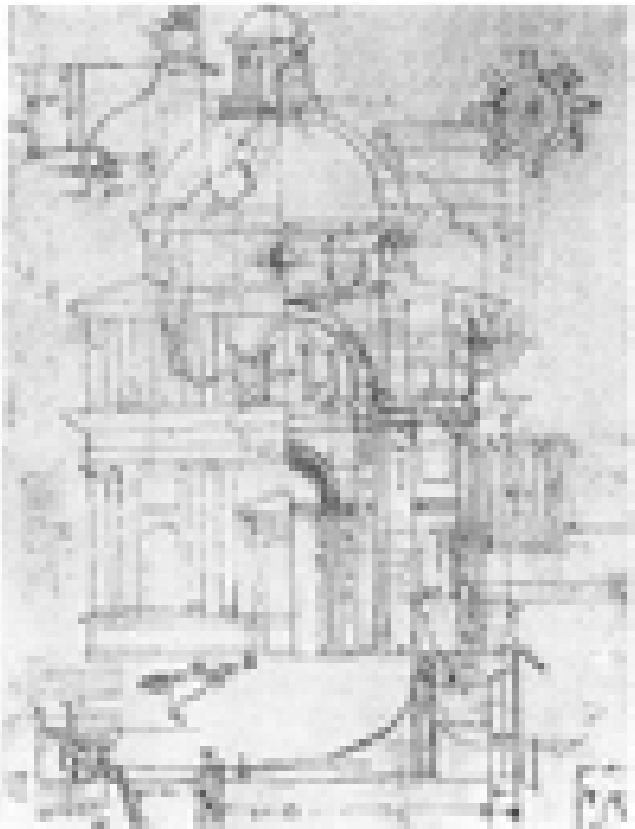
“*Questa letteratura ha diffuso due fondamentali tecniche di controllo dello spazio architettonico: la proiezione (delle dimensioni su di un piano di vista) e la modulazione, ovvero la gestione di un sistema di griglie orientate, che contiene, in ordine di multipli e sottomultipli, l'insieme delle grandezze del progetto, rese conseguenti da fattori aritmetici interi.*”²⁶

Tale metodo di frazionamento del continuum spaziale, corrispondente in unità discrete metriche e materiali, ha combinato gli studi di proporzionamento classico con la rielaborazione formale e strutturale delle grandi fabbriche, espressione di dominio razionale delle dinamiche resistenti volumiche e paramentali non 'della' ma 'sulla' geometria. I differenti sistemi di partizione dei componenti del sistema

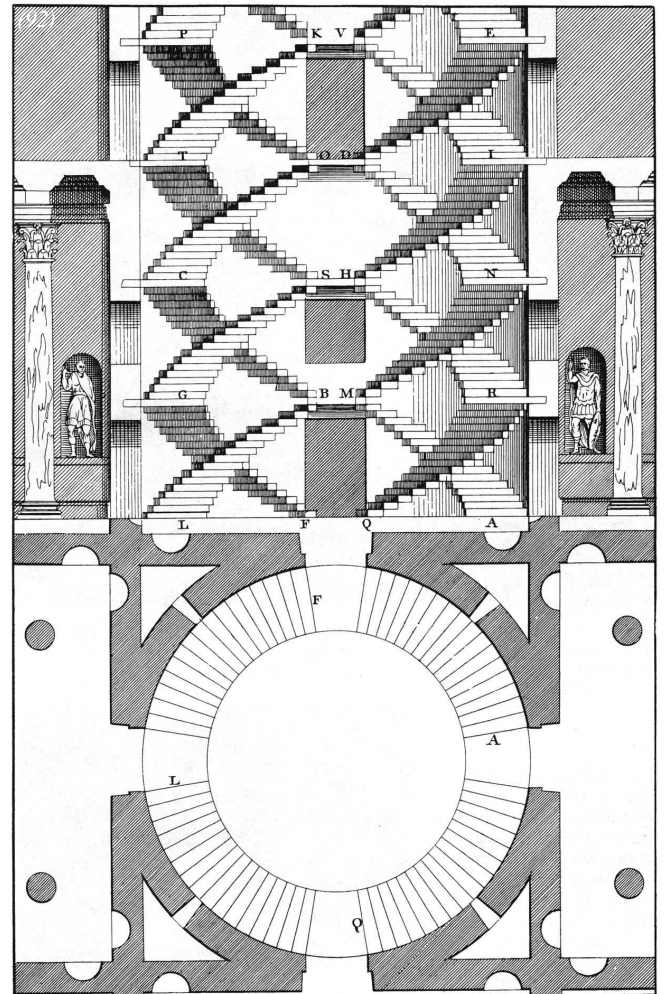
hanno prodotto particolari qualità figurative della matrice sintattica, includendo tessiture di unità, denominate in quanto 'costrutti'²⁷, fra le classi segniche concorrenti nell'architettura per il compresente valore plastico ed estetico.

La rappresentazione ha accolto l'elaborazione di tali contenuti percettivi con un metodo di articolazione della linea attraverso guide geometriche e descrittive di base, colleganti le articolazioni del visibile tridimensionale anche in termini di non descrivibili tracciati regolatori. Un'espressione grafica che tende quindi a sovrapporre gli archetipi spaziali alle forme della realtà, effettuandone una correzione di frazionamento secondo regole topologiche di organizzazione del rapporto tra linea e campo. Pertanto, l'identità visuale della struttura plastica non risulta

dipendere dalla base geometrica di lunghezze e direzioni intere, bensì dalle proprietà fondamentali di orientamento, che distinguono la sostanza del volume statico nel campo percettivo.²⁸ A tale riguardo, come nei trattati di stereotomia, un vasto campo di proprietà di modulazione della 'linea strutturale' è affrontato, relazionando le proporzioni del progetto con le proiezioni del sistema resistente, ed in tale veste informativa corredandolo di numerose enunciazioni²⁹. Si afferma la direzione di particolarizzazione e descrizione del dettaglio tecnologico e di impronta esperienziale della linea come espressione della forma architettonica, a sua volta quale mezzo visuale di conoscenza e racconto inerente alle declinazioni costruttive e compositive dell'opera in termini di approcci identitari alla ragione strutturale.



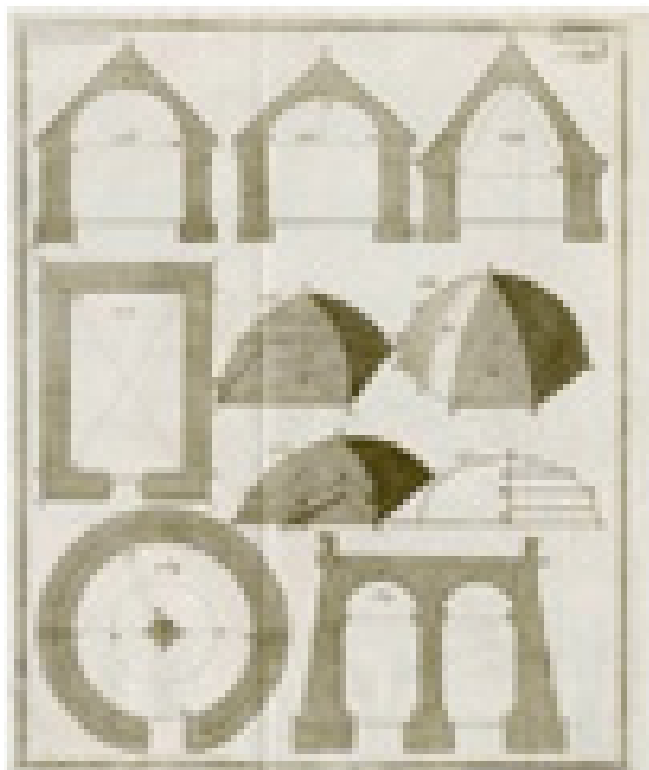
Sopra (2.10) Baldassarre Peruzzi, sezione e particolari di S. Eligio degli Orefici, Roma, 1509-1575. A destra (2.11) Andrea Palladio, studio della struttura delle scale a Santo Apostolo di Roma, da "I quattro libri dell'architettura", libro I-XXVIII, 1790. La forma inizia a delinarsi per lasciar meglio trasparire la disposizione tecnica strutturale.





Il rinnovato approccio matematico alle costruzioni strutturali in quanto "scienza" declina il disegno come strumento principale di studio e pianificazione delle proporzioni della materia, prima schematiche poi adattate alla fisicità dei materiali e componenti edili.

Bernard Forest de Beldor, dal "Nouveau cours de Mathematique", 1735: sopra (2.12) costruzioni analitiche di schemi strutturali; sotto (2.13) moduli costruttivi dell'architettura.



2.1.4. Modulo strutturale: dettaglio tecnico ed espressione cinematica nei grandi trattati scientifici.

La produzione grafica declinata sulla rappresentazione del sistema strutturale manifesta un evidente cambio di direzione cognitiva e, conseguentemente, stilistica a partire dal Settecento. La rinnovata fiducia nelle scienze e nella tecnica costruttiva ricolloca l'attenzione sul significato del dettaglio formale e della sua trasposizione grafica quale principale chiave espressiva intermedia tra l'idea del sistema resistente e la sua realizzazione e concezione concreta.

La produzione di disegni raccolta nell'avvio delle collane di 'manualistica'³⁰, all'insegna dell'era della specializzazione dei compiti e delle professioni³¹, conferisce un assetto sistematico, evoluto, alla trattatistica rinascimentale e cinquecentesca, oltre ad introdurre un'azione fondamentale di schematizzazione e disciplina dei moduli costruttivi tecnici improntati alle leggi fisico-matematiche e della materia³². Tale rivisitazione della funzione del disegno e dei suoi metodi espressivi, per la prima volta centranti l'oggetto di percezione sulla specifica identità dell'apparato resistente, si attua principalmente in ambito formativo, quale quello delle Accademie francesi, contribuendo a favorire una straordinaria produzione di elaborati grafici declinati interamente sull'aspetto strutturale dell'opera architettonica, combinando l'illustrazione dell'idea progettuale, sempre più possibile che utopica, con il primario aspetto della rappresentazione del valore tecnico-costruttivo della sua anima meccanica.³³

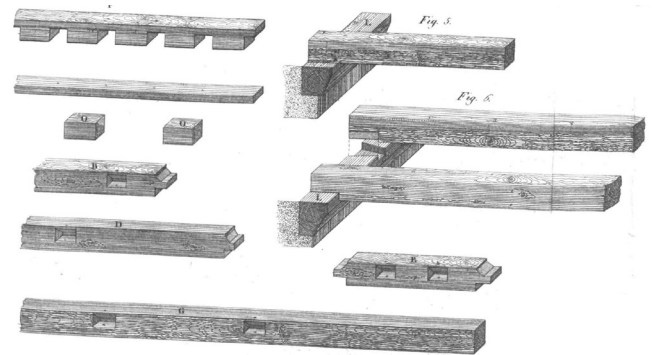
L'espressione visuale della tecnica dell'architettura si traspone e dettaglia nella configurazione di moduli strutturali standardizzati, dove il tratto di contorno delimita e dettaglia, assieme a retini ed eventuali cromatismi, una forma resistente interamente pensata in termini di unità costruttive e loro articolazione, con un'attinenza grafica scientificamente oggettiva nella trasposizione dal componente reale al disegno e viceversa. Il significato statico legato alla visione meccanica del sistema architettonico è esaltato nella specificità tecnica e mimetica ai componenti materici, e solo in alcuni casi è declinato ancora attraverso schemi tensionali, complementari alla rappresentazione affidabile di moduli già ottimizzati per soddisfare la necessità conoscitiva nella resa grafica del loro dettaglio tecnologico.

*"L'elemento esterno sopraffà l'elemento interno"*³⁴ e ne soddisfa al contempo la cognizione statica legata alla particolarità formale. In tal modo, la comunicazione

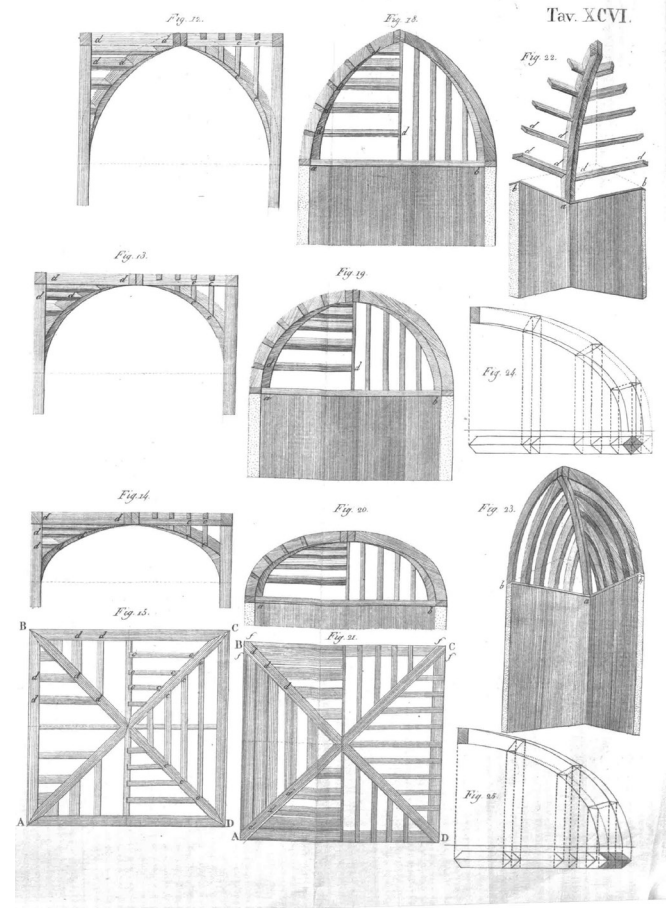
della disciplina strutturale è irrigidita attraverso una rappresentazione rigorosa per codici e tipologie grafiche precise, ricercando nel disegno parametri stilistici scientifico-oggettivi ed eliminando qualsiasi personalizzazione dell'espressione grafica³⁵. L'istituzione di una tassonomia del disegno strutturale ne motiva l'idea di sistema e di classificazione³⁶, in termini sia di tema che di modalità descrittiva, incontrando il periodo storico di diffusione della stampa quale ulteriore incoraggiamento all'istituzionalizzazione di una regola grafica dedicata³⁷. La comunicazione di un'univoca informazione costruttiva si traspone così in disegni a carattere metodologico, con elaborazioni di precisa codifica inerenti disposizioni tecniche inequivocabili. L'addensamento signico è incrementato verso il limite della campitura, reso possibile dalla qualità grafica di stampa del disegno, e fornisce una possibilità di espressione dei dettagli tecnici che avvicina il modulo strutturale sempre più al suo alter ego concreto rispetto allo schema di formulazione teorica. La precisione del tratto, nella doppia accezione metrica e di tracciato, finalizza le sequenze materiche e tecniche del processo costruttivo, e formalizzando e codificando sempre più i moduli prescrittivi della struttura prosegue nella direzione di progressiva separazione nell'espressione della fabbrica architettonica e dei suoi componenti tra momento progettuale e momento esecutivo/analitico.

*“La mimesis sposta ora decisamente il suo oggetto; si diffida della fallace rassomiglianza figurale; si tende a cogliere i caratteri, le strutture, a isolare il modello ideale e teorico dalle sue manifestazioni contingenti. La rappresentazione è il campo in cui convergono e si unificano le cose e il discorso sulle cose, l'esperienza e il senso che se ne costruisce, il mondo e il linguaggio che, parlandone e descrivendolo, lo ordina.”*³⁸

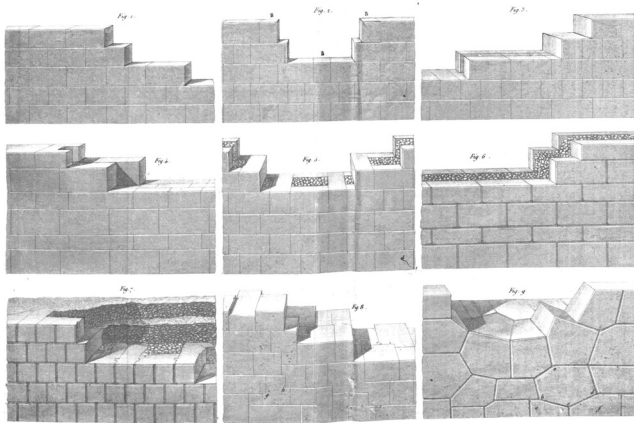
A partire dall'*Encyclopédie*, le cui tavole mettono per la prima volta a disposizione di tutti un sapere fatto di modi, strumenti e procedure prima di esclusivo patrimonio di corporazioni di arti e mestieri, la manualistica dei moduli strutturali definisce una vera e propria 'formalizzazione' grafica dei limiti costruttivi, concreti e statici delle strutture, indicando attraverso il loro disegno "modalità e



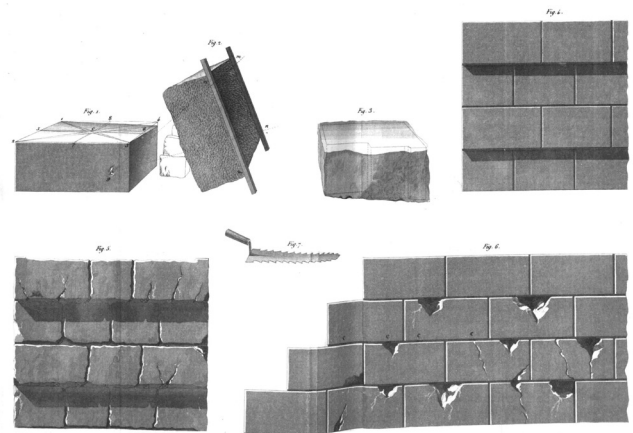
L'accurato disegno mimetico di componenti ed aggregazioni di funzione strutturale vuole fondare un codice di "tecnicità" dell'immagine per la descrizione della scienza del costruire. I moduli della struttura sono trattati da un punto di vista esclusivamente di forma tecnologica, privi di interesse per la composizione e l'ornamentazione. Il metodo di rappresentazione assume chiarezza e replicabilità, applicando profili ed eventuali retini che giocano sulle variazioni del tratto lineare.



Jean-Baptiste Rondelet, dal *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802-1805: sopra (2.14) soluzioni di connessione tra componenti lignei; sotto (2.15) articolazione di strutture complesse da profili lignei.



L'attenta analisi rappresentativa dei caratteri costruttivi inizia fiduciosamente ad avanzare considerazioni manualistiche ed empiriche sul dimensionamento strutturale, così come sul degrado di resistenza.



Jean-Baptiste Rondelet, dal *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802-1805: a sinistra (2.16) tipologie di tessitura per blocchi murari; sopra (2.17) imperfezione formale dei componenti strutturali.

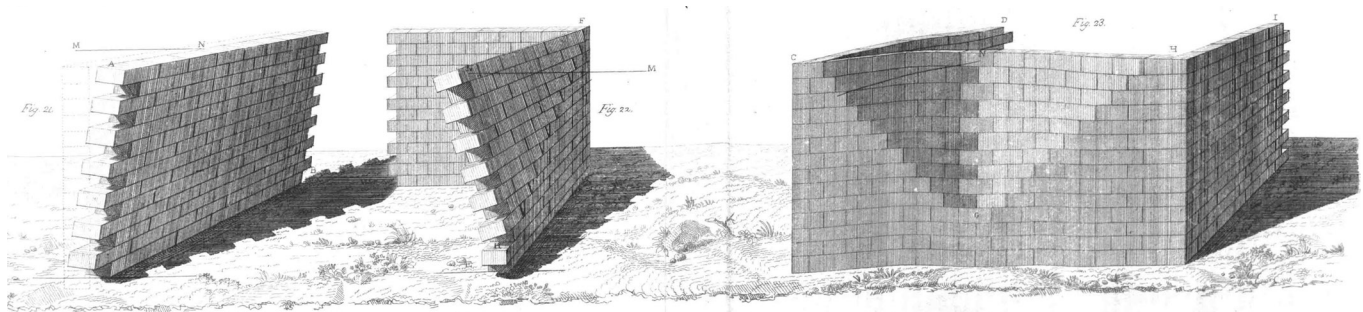
procedure specifiche, che colui che opera all'interno del campo disciplinare può selezionare e prescegliere, anche per oltrepassare, forzare o modificare i limiti stessi."³⁹

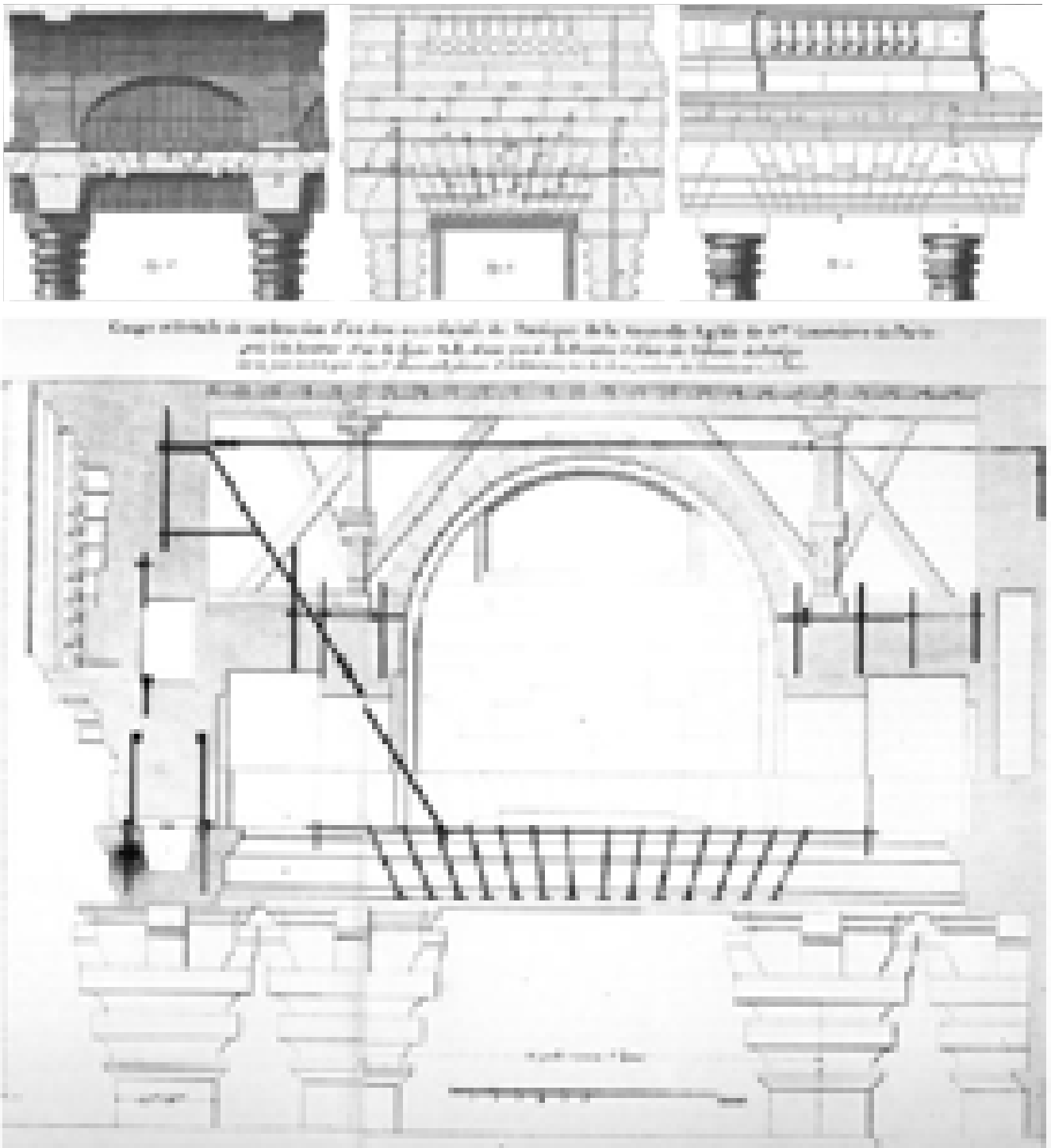
"Il confronto, adesso, non è astratto, ideologico; esso è un metodo che si attua concretamente nella misura, nelle immagini, nelle rappresentazioni prodotte alla stessa scala, dunque direttamente comparabili, potenzialmente sovrapponibili per verificarne scarti e congruenze."

⁴⁰ E tale confronto riparte proprio non solo dal progetto ma anche dall'osservazione e analisi delle opere architettoniche esistenti, pervenute nella loro natura morfologica e visuale attraverso le esperienze tensionali di forze e carichi, descritte nella loro monumentalità tecnica⁴¹, quanto scomposte ed analizzate in termini quasi 'anatomici', in un parallelismo rappresentativo che dai disegni scientifico-meccanici conduce direttamente alla dissezione dei componenti costruttivi⁴².

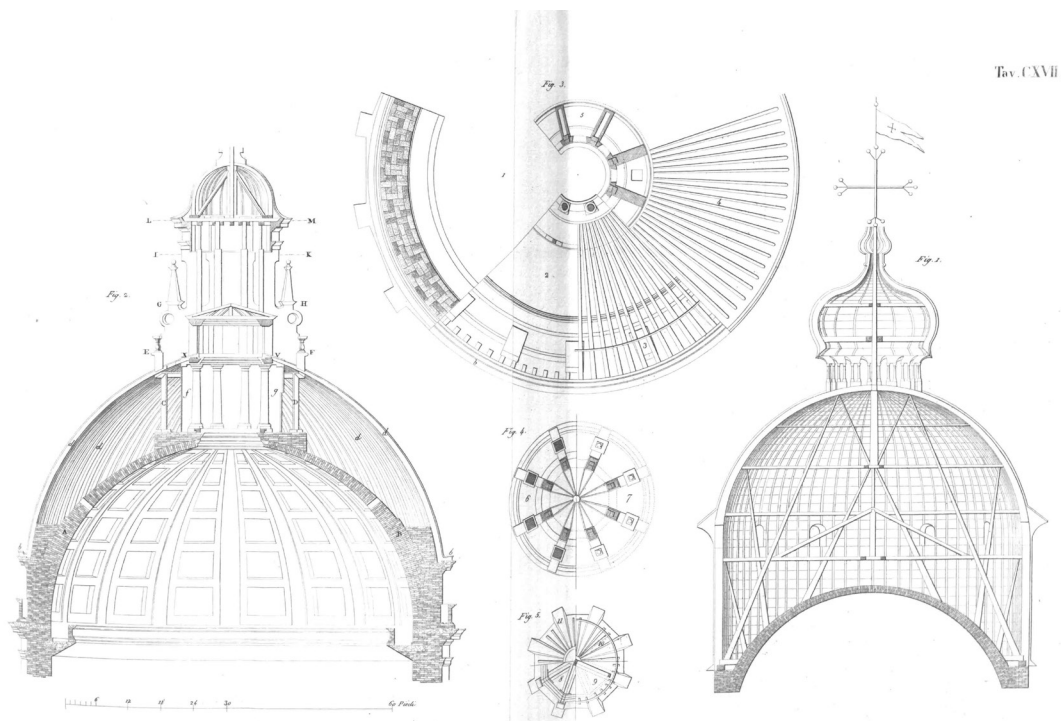
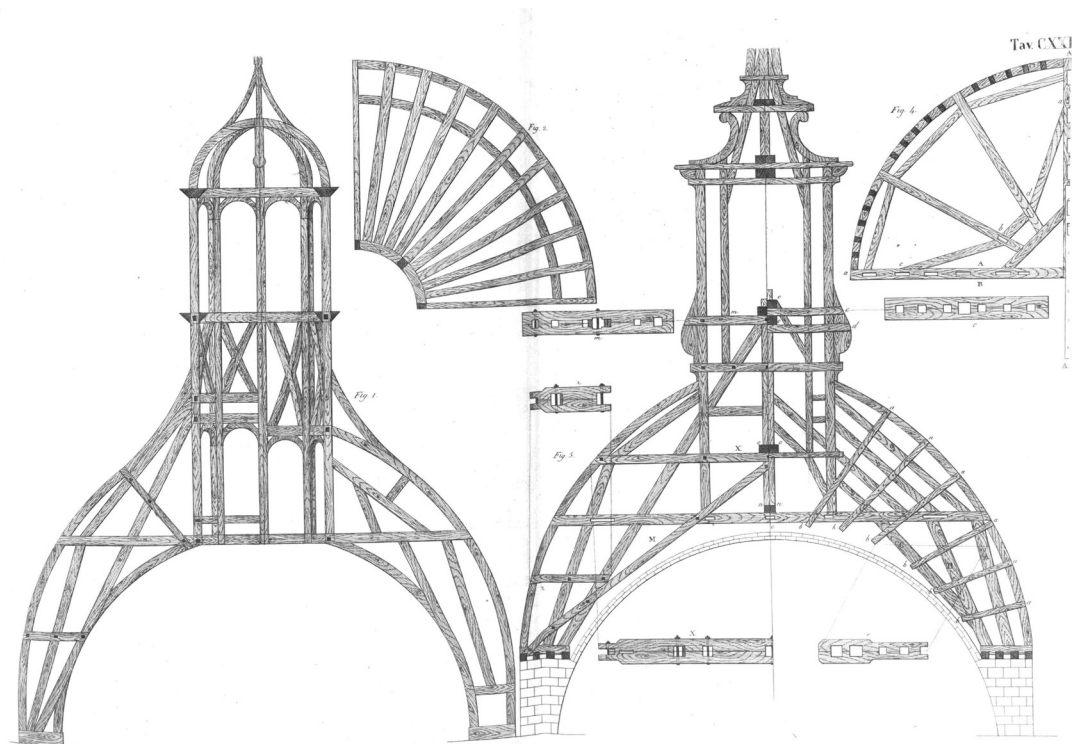
È il passaggio cruciale dell'introduzione grafica del segno di deformazione, imperfezione, movimento e cambiamento della statica del monumento architettonico, integrando agli elaborati classici un repertorio signico associato alle informazioni di documentazione e rilievo dei comportamenti dinamici delle fabbriche costruite. La direzione segnata è verso una rappresentazione che si spinge alla materia interna alla struttura, ipotizzata secondo schemi logici formali e statici per la disposizione dei componenti costruttivi.

L'idea della rappresentazione strutturale si declina così con un atto decisivo dall'ambito dell' 'arte' a quello della 'tecnica', approfondendo l'argomento con un insieme di valori trasposti nella produzione grafica che sviluppano un canale parallelo e dedicato, l'inizio del sopravvento della figura meccanica alla regola dell'arte e l'apertura ad una percezione del disegno quale 'dominio virtuale', simmetricamente parallelo alla concretezza tettonica della struttura.





A sinistra (2.18) Jean-Baptiste Rondelet, dal *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802-1805, osservazione grafica dei fenomeni di collasso nelle strutture storiche; sopra (2.19) Jacques-Germain Soufflot, esempi grafici di intervento per il consolidamento statico di strutture, 1764.

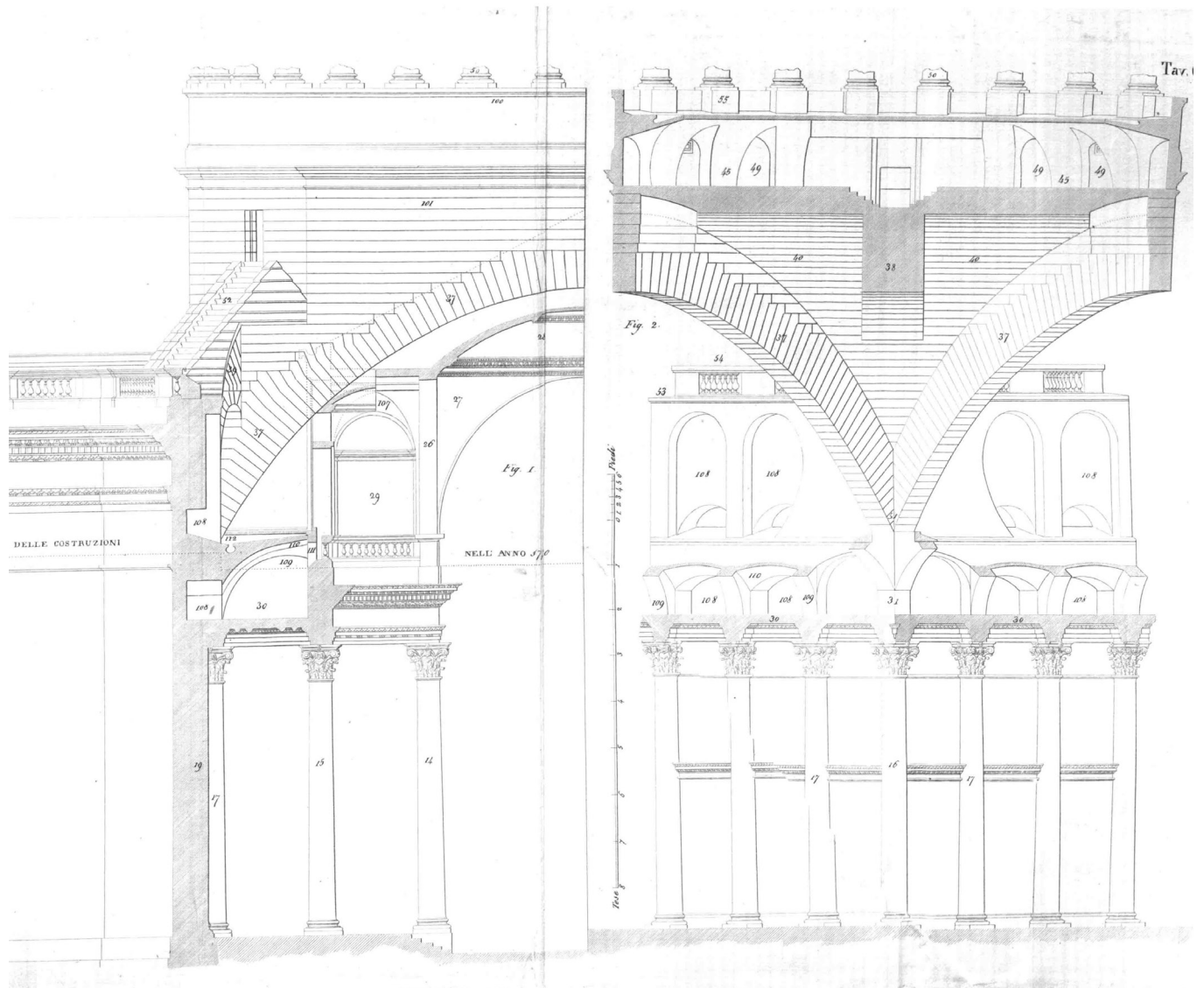


Schemi logico formali e statici per le ragioni della forma strutturale nelle soluzioni tecnologiche complesse. L'attenzione verso l'identificazione dei singoli elementi e dei rapporti di coesistenza nel sistema di insieme condiziona la modulazione ed il controllo del tratto della linea, ancora pulita e 'anatomicamente' nitida.

Jean-Baptiste Rondelet, dal *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, 1802-1805.

A sinistra (2.20) scheletri lignei complessi dall'articolazione e connessione di elementi a supporto della rete di distribuzione tensionale; (102) tipologie di modularità e soluzioni tecnologiche per strutture murarie e composte.

Sotto: (2.21) componenti costitutivi, scomposizione e denominazione per l'analisi semantica di scheletri strutturali in muratura.



2.1.5. *Scheletri strutturali: la sintesi delle complessità costruttive nel delineamento dei prontuari tecnici.*

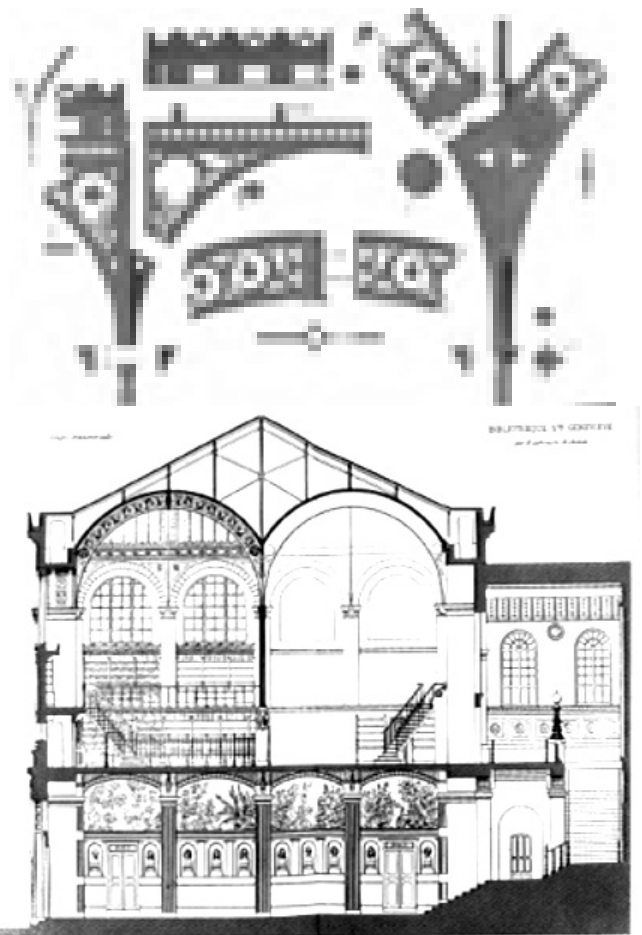
Nel repertorio prodotto tra Ottocento e Novecento, molti aspetti rappresentativi avviati sulla forma costruttiva e densità signica della rappresentazione strutturale sono richiamati dall'ambito della documentazione dell'esistente alla prassi progettuale, consolidando un'evoluzione grafica non solo riguardo i mutamenti nella didattica e nella formazione ma anche in termini professionali, dove il disegno "era sempre stato considerato veicolo di una scrittura chiara e precisa, capace di sottrarre la misura all'opinione, di anticipare sviluppi e risultati, di dialogare con il mondo della produzione e con gli operatori dell'arte edilizia"⁷⁴³.

L'orientamento del gusto eclettico istituito in ambito progettuale contribuisce ad espandere un repertorio conoscitivo su 'scheletri' costruttivi strutturalmente applicati, in termini intenzionalmente stilistici ma proponendo implicitamente inevitabili riflessioni sulla loro applicazione tecnologico-statica. Le prospettive di modernizzazione nel campo dei materiali e dei sistemi costruttivi esercitano un'influenza nella grafica descrittiva del processo tecnico su componenti ed unità del sistema strutturale, contribuendo alla raccolta di cataloghi e categorie di classificazione, ordinamento e schedatura delle modalità costruttive rapportate tra la ricerca illustrativa storico-tipologica e le fonti documentarie in termini tecnologici.

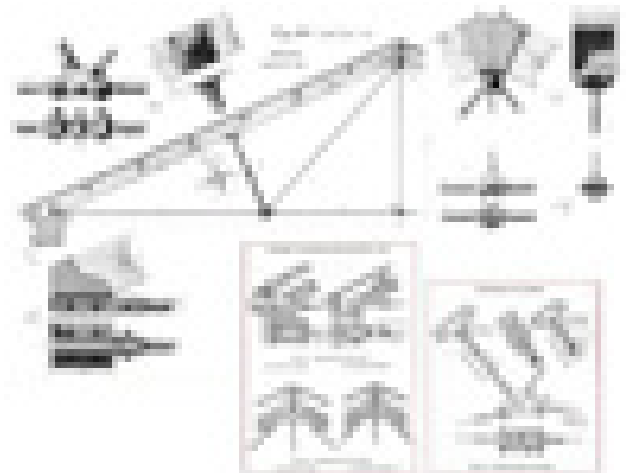
Il disegno strutturale si declina così in una posizione intermedia tra il conseguimento di una compiuta ricostruzione storica e la pratica di cantiere nella realizzazione degli scheletri resistenti di nuove opere, adattando ampie variabili grafiche per la resa tecnica e materica sugli elaborati di supporto.

"A tali ambiti si addiceva una preparazione che andasse oltre le competenze tradizionali maturate nelle accademie di Belle arti e impostate sulla composizione e l'ornato, e che fosse invece in grado di rispondere alle diverse istanze di modernizzazione che avevano investito il sapere e, in particolare, il progetto e il prodotto edilizio."⁷⁴⁴

Dall'alto: Henri Labrouste (2.22) dettaglio della struttura ornamentale negli archi della Biblioteca di Sainte Genevieve, (2.23) sezione dell'ala della biblioteca, 1838. (2.24) Camille Polonceau, *Notice sur nouveau système de charpente en bois et fer*, in *Revue Générale l'Architecture et des travaux Publics*, 1840.



L'ingentilimento dei profili strutturali, permessi dalle nuove tecnologie in campo edilizio, porta ad arricchire le forme della rappresentazione dettagliando profili e modalità di connessione per il sistema.

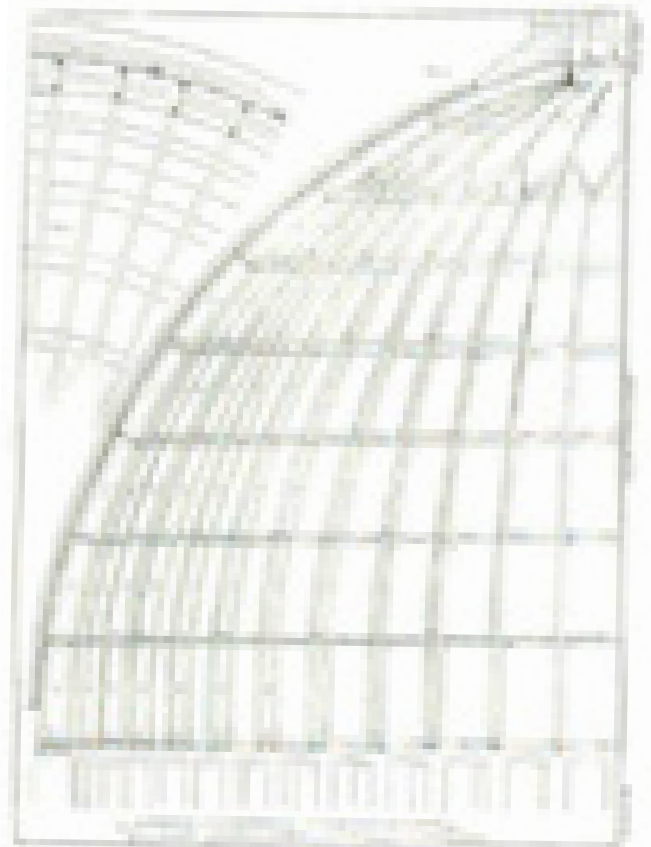


L'adeguamento grafico accompagna l'evoluzione tipologica e tecnologica del progetto e della sua produzione edilizia, nella quale l'elemento tecnico si riallaccia alla trattatistica estetica dell'architettura mostrando "i legami che esistono fra l'arte e la materia"⁴⁵, considerando che "non solo l'equilibrio e la simmetria delle masse, ma altresì le minute particolarità edilizie" risultano centrali nella descrizione grafica dell'organismo strutturale, "accoppiando alle leggi di proporzioni l'accorta scelta ed applicazione dei materiali, per arrivare così, con metodo ed ordine, a fondere in un solo studio la logica del comporre colla pratica del costruire."⁴⁶ In tal senso, gli elaborati grafici si concentrano attorno ad alzati, sezioni ed assonometrie dove il rinnovato interesse di resa tridimensionale attraverso campiture chiaroscurate, ombreggiate e spesso acquerellate, affianca il corredo di particolari secondo il gusto ed i riferimenti decorativi adottati. La qualità informativa è mantenuta concentrata sul dettaglio costruttivo, ma spesso ingannando la reale complessità tecnologica e stereometrica degli scheletri strutturali con articolazioni stilistiche di tipo calligrafico, al posto di una semplificazione formale incentrata sul reale apporto volumico e morfologico dei componenti resistenti alla complessiva statica del sistema.

In tali termini, il disegno finisce per acquistare una duplice natura autonoma di documentazione dell'apparato strutturale, nella variante 'compositiva', di maggiore espressione dell'ideale di solidità e distribuzione dell'insieme, ed in quella 'tecnica', concentrata sul dettaglio formale costruttivo e destinata alle commissioni di cantiere. È a quest'ultima che sono assegnate le peculiarità di differenziazione tra i livelli di struttura e le variabili di forma tecnica, spesso rappresentata più in termini artistici e scultorei che per corrispondenza di ragioni statiche.

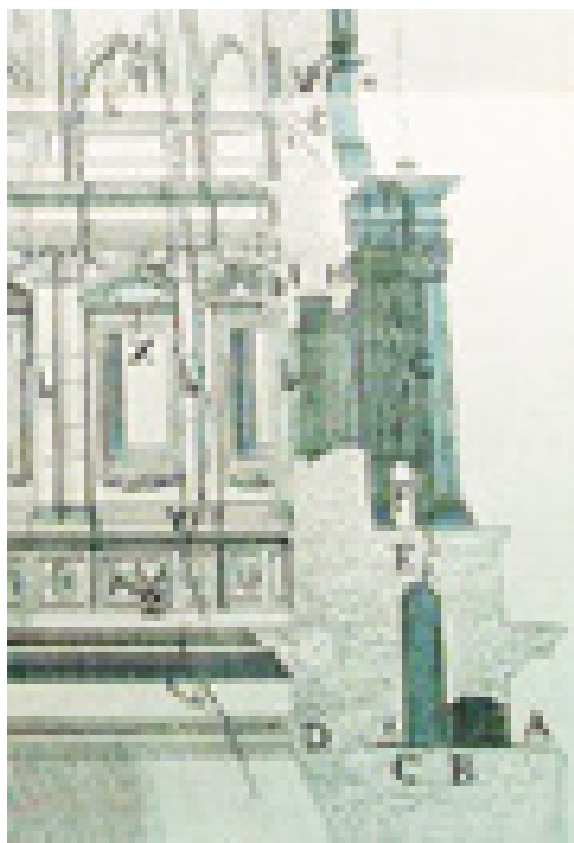
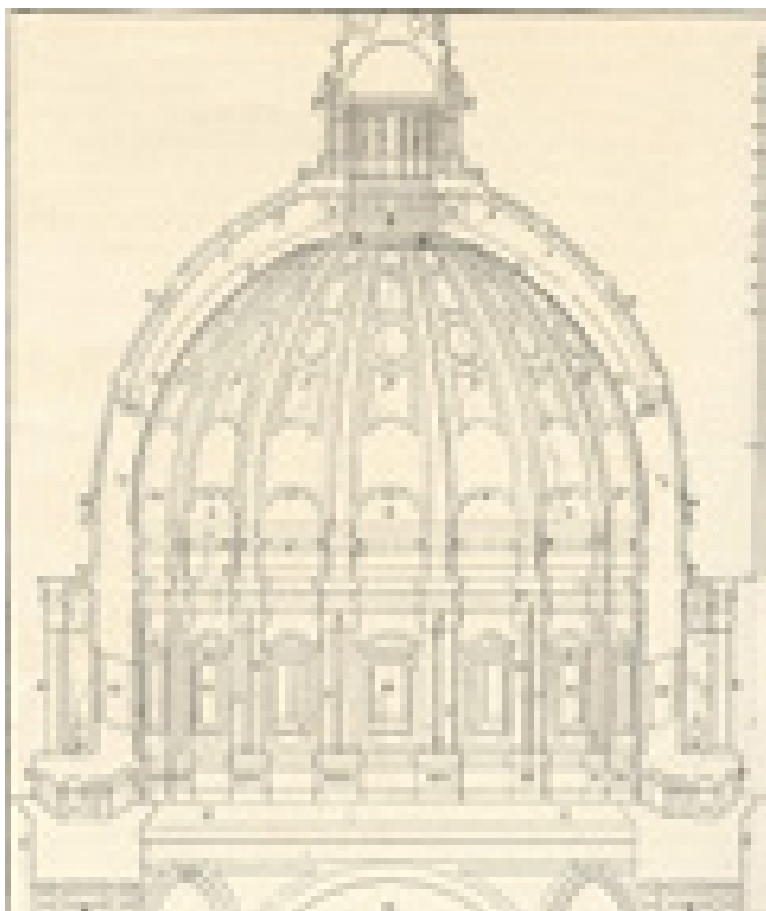
Tali espressioni grafiche trovano spazio nella redazione di prontuari di tecniche costruttive, corredati di esaustivi atlanti di tavole cromolitografiche in grado di illustrare dettagliatamente tutte le fasi di un cantiere, dalle fondamenta dell'opera grezza fino alle finiture. Un'opera che, oltre a presentare un breve compendio sulle "generalità riguardanti le strutture delle fabbriche", si prefigge di "rappresentare i principali particolari costruttivi che vi si riferiscono, studiati in base alle effettive pratiche di esecuzione, nel proposito anche di rendere più evidente l'importanza e l'estensione che gli studi applicati hanno nell'arte del costruire"⁴⁷.

Così come "i trattati avevano formato per secoli gli architetti alla ricerca delle vitruviane euritmia, simmetria e decoro, così in questi decenni e ancora nel Novecento la manualistica condurrà i moderni progettisti proprio verso la concreta 'pratica del fabbricare'"⁴⁸.



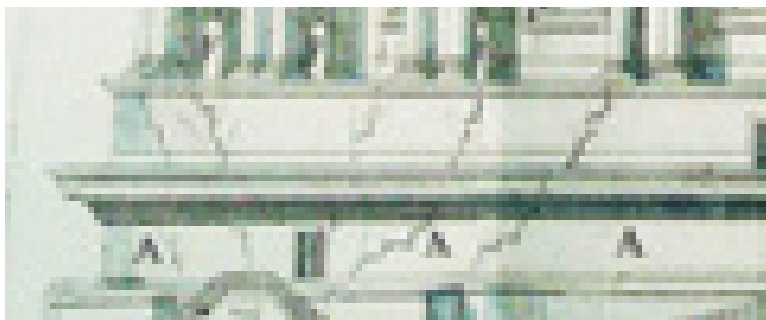
La notevole redazione di trattati tecnici sui metodi costruttivi e strutturali prosegue, specializzandosi rispetto alle nuove esigenze tecnologiche che, oltre alla "regola dell'arte" ed alla qualità materica, concentrano la conoscenza grafica sul dimensionamento dei componenti del sistema. Ingegneri ed architetti sono così a richiedere alla rappresentazione di soluzioni ed applicazioni strutturali un attributo sempre più quantitativo. L'obiettivo di integrare l'informazione dimensionale al disegno trova diverse soluzioni di esplicazione, dalla scalatura alla quotatura, associandosi a figure scarnificate dalle complesse qualità visive, degli 'scheletri strutturali'.

Sopra (2.25) Gustav Adolf Breymann, Trattato generale di costruzioni civili, Milano, 1845.



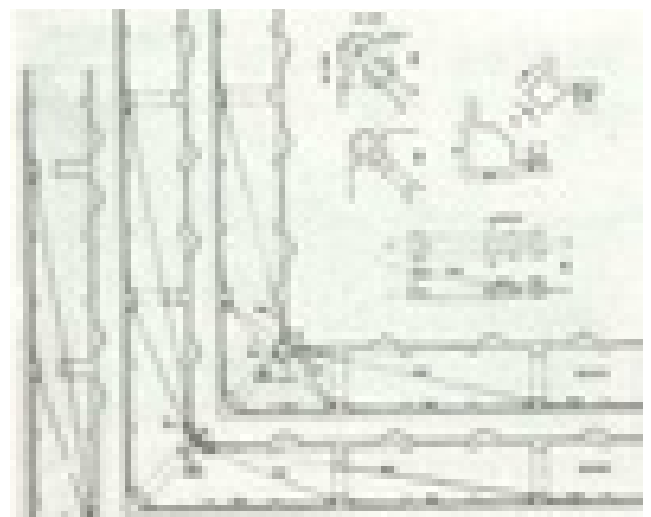
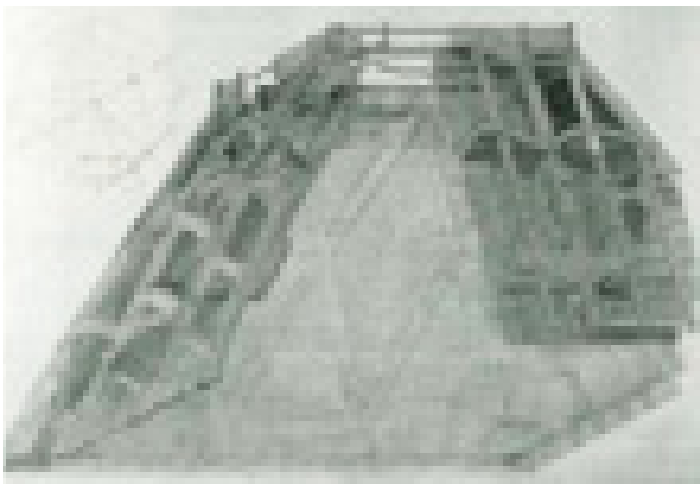
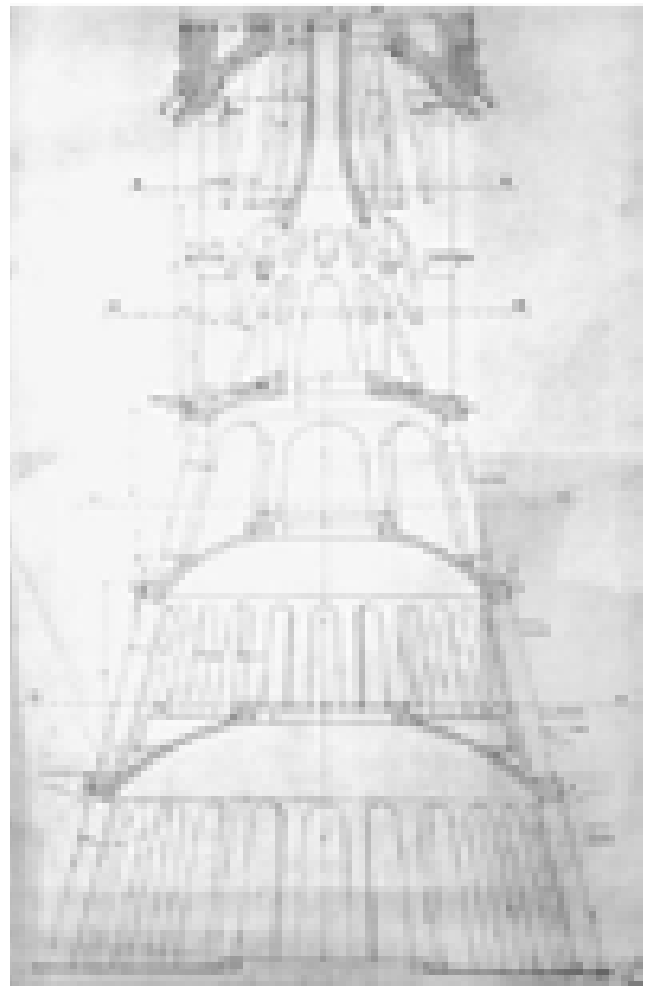
All'affermarsi del ruolo della misura combinata al profilo grafico degli elementi strutturali, per motivarne le qualità di resistenza, si instaura la pratica di descrizione non solo dell'idea progettuale, ma anche dell'esistente. Il rilievo diviene così strumento di conoscenza e di supporto per approfondimenti tematici legati alla meccanica delle strutture, in particolare riguardanti le analisi cinematiche dei dissesti sulle fabbriche storiche.

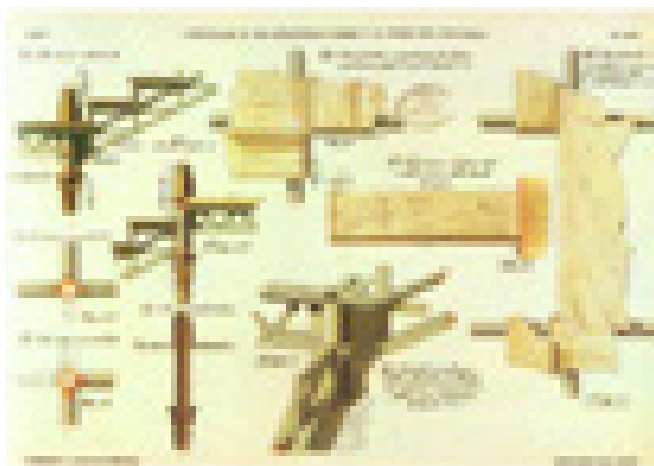
(2.26-2-29) Rilievo della cupola di San Pietro a Roma, dalla Perizia del 1742. E' possibile apprezzare la descrizione grafica delle "spaccature" osservate sul tamburo della cupola, localizzate dalle superfici allo spessore murario.





*Il disegno strutturale per il dimensionamento dei profili di progetto.
(2.30-2.31) Alessandro Antonelli, sezioni per il progetto strutturale della
Mole, Torino, 1863. Si evidenzia la pulizia del tratto, applicato prevalentemente
per profili principali ed alcune campiture, a garanzia della chiarezza
di lettura del dato sulla misura.
(2.32-2.33) Schema costitutivo strutturale della Mole, schemi delle armature
delle murature d'angolo, 1863.*

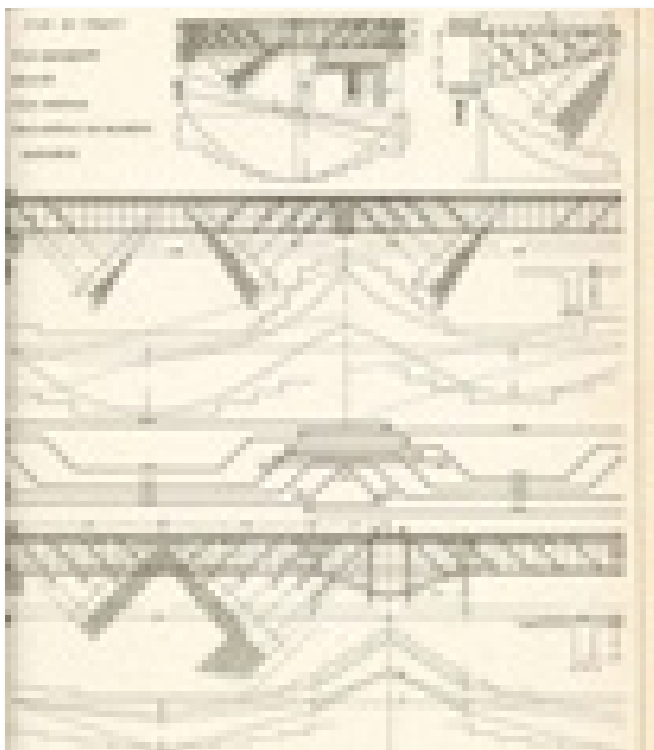




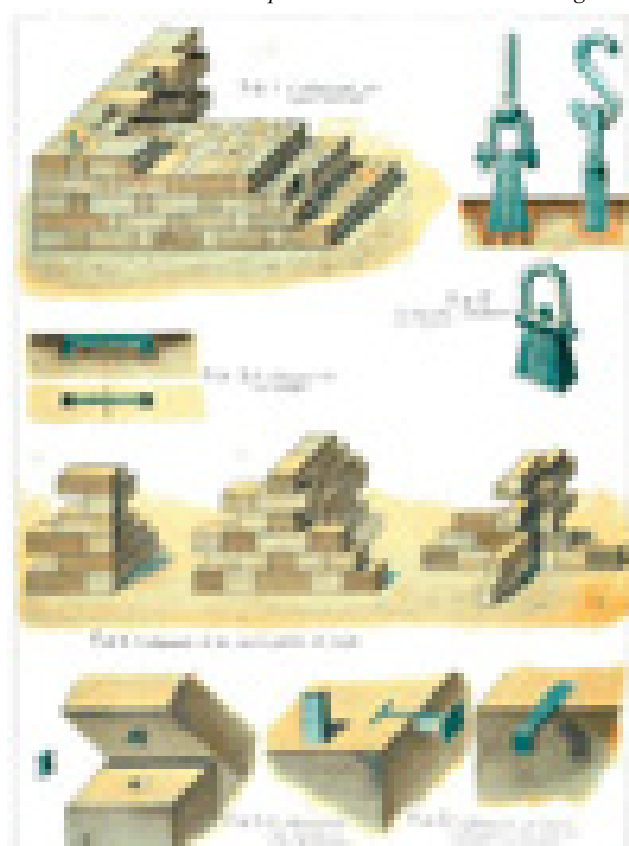
Lo specializzarsi delle tecniche costruttive introduce soluzioni miste tra materiali edilizi, oltre a particolari vincoli di connessione ed articolazione dei componenti di conformazione spaziale.

Il disegno, per soddisfare il fine descrittivo, si arricchisce di campiture cromatiche, prevalentemente ad acquerello, che incrementano la resa mimetica dell'immagine. L'impatto visuale è artistico, oltre che di comunicazione tecnica, e si riavvicina in parte alla "regola dell'arte".

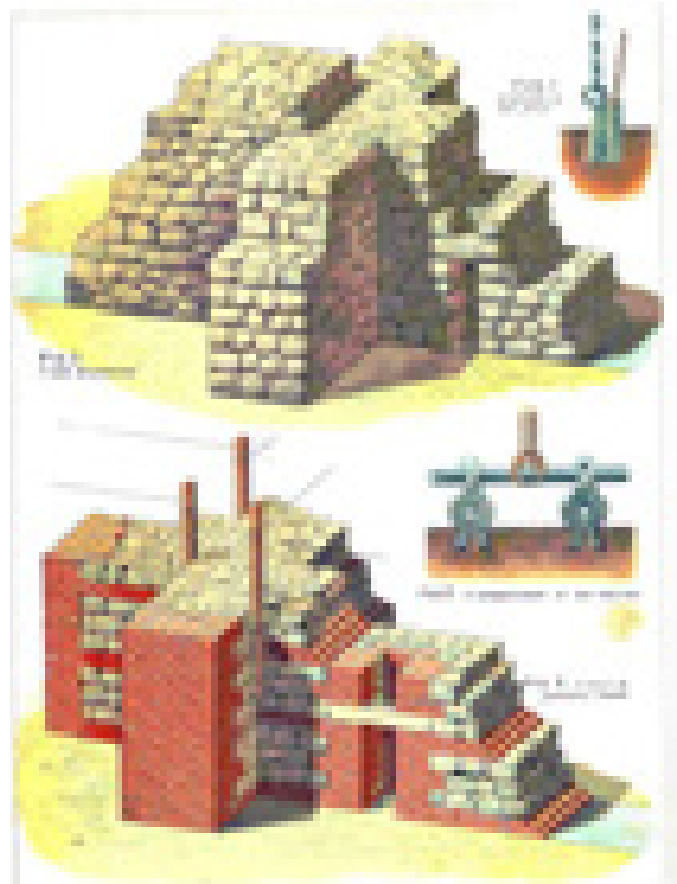
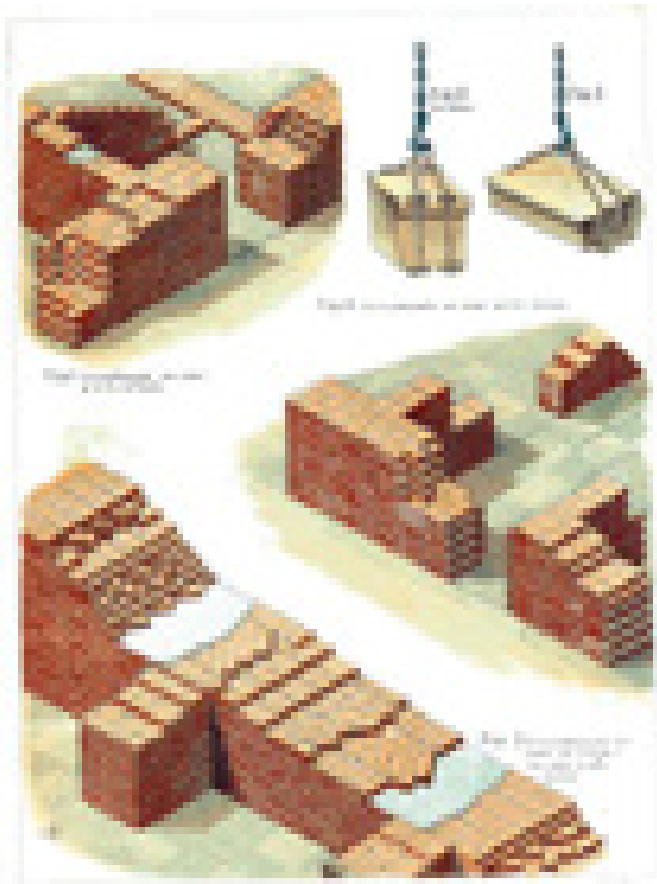
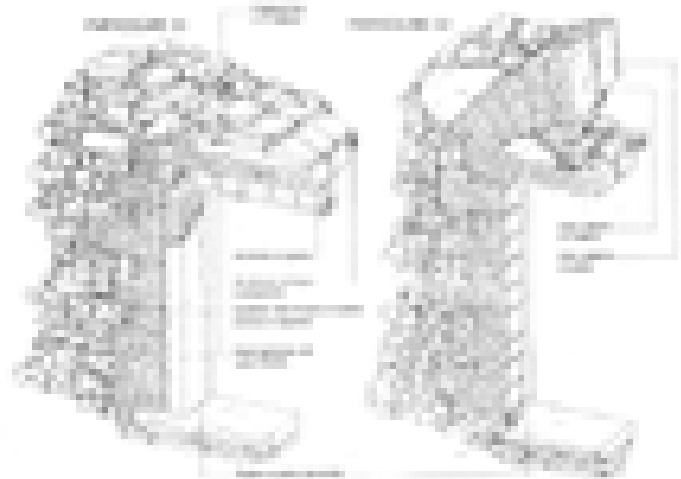
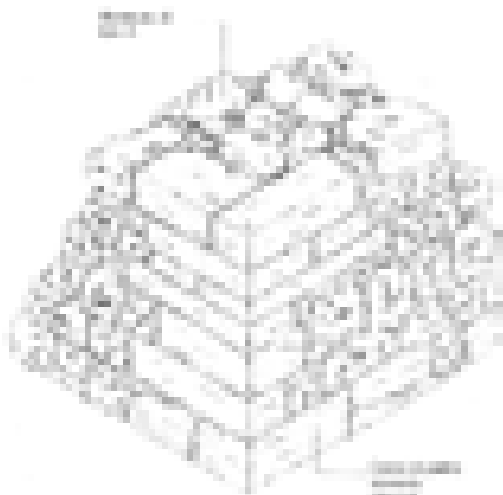
Parallelamente, un settore di elaborati dedicati alla valutazione di profili di armatura si orienta verso un stile grafico più sintetico e schematico.



(2.34-2.35) Carlo Formenti, da "La pratica del fabbricare", 1893
Nodi e unità di connessione per strutture in acciaio e misto-ligneo.



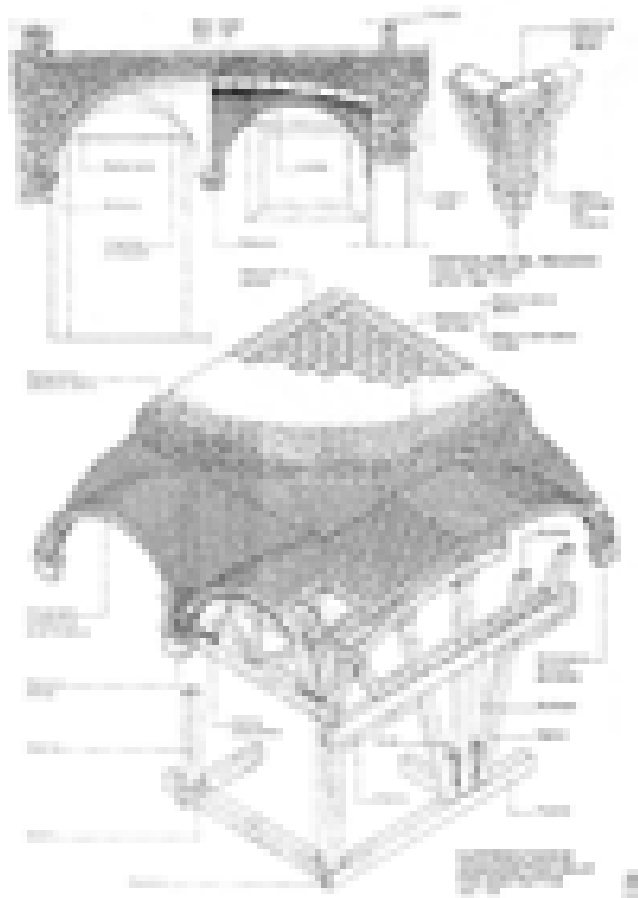
Sopra (2.36) Carlo Formenti, da "La pratica del fabbricare", 1893
Soluzioni di grappe e listelli per il consolidamento strutturale.
A lato (2.37) Daniele Donghi, dal Manuale dell'Architetto, 1935.
Schemi di armatura abbinati a profili strutturali.



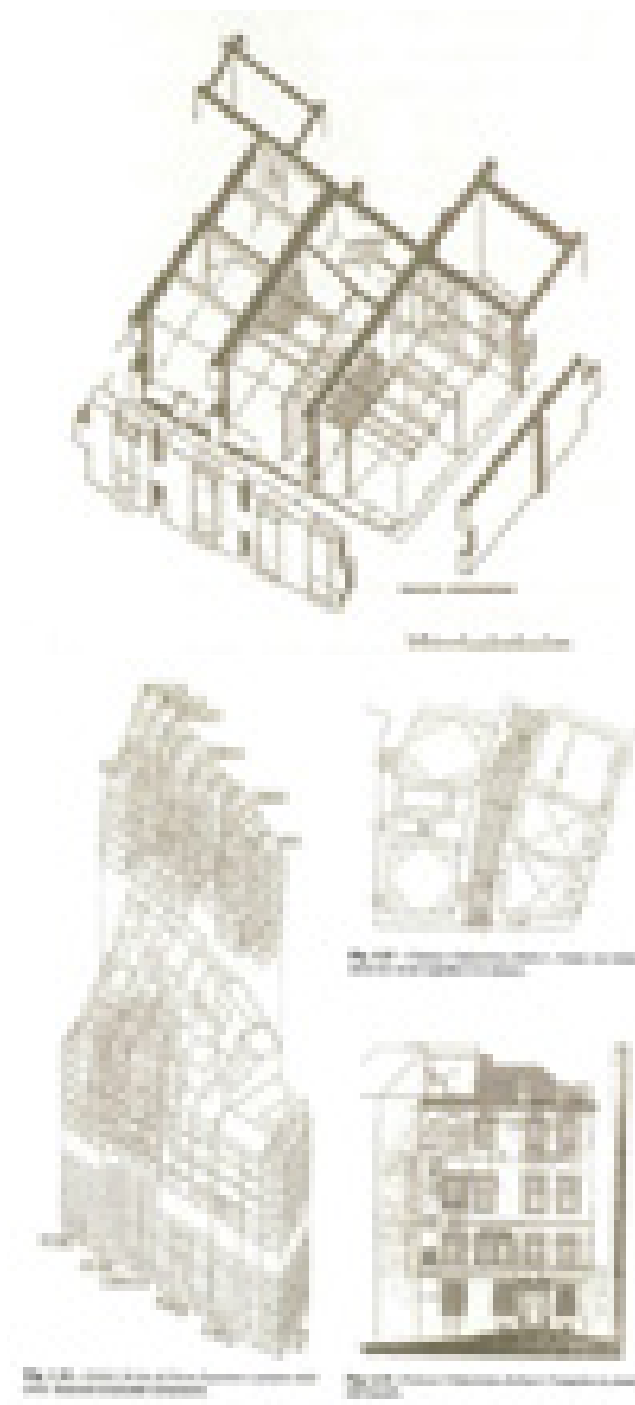
A partire dai cataloghi di pregio, più completi e graficamente curati, la pratica della rappresentazione dei moduli strutturali per mimesi descrittiva si diffonde anche nella realizzazione di 'manuali locali' applicati dalle amministrazioni per gli interventi edilizi normati post-bellici.
Sopra (2.38) paramenti murari dal Manuale di Città di Castello, 1946; sotto (2.39-2.40) Carlo Formenti, da "La pratica del fabbricare", 1893.

2.1.6. *Matrice strutturale: dal catalogo compositivo alla scelta dell'astrazione.*

L'approccio al tema strutturale muta nella seconda metà del Novecento con lo sviluppo di una comunicazione conoscitiva e didattica mantenuta metodologicamente incentrata sulla disciplina del disegno e sulla funzionalità della standardizzazione modulare⁴⁹ dei manuali tecnici di architettura. Una produzione di cataloghi grafici, affidabili nella corretta corrispondenza tra immagine e realtà tecnica, che innesca un processo metodico di cognizione sistematica della struttura, con un effetto di "riduzione dell'universo infinito della creazione architettonica al mondo chiuso di un catalogo di segmenti ready-made"⁵⁰.



La produzione di manuali edilizi territoriali continua, affiancando i capitoli per l'intervento, e specializzandosi in tratto e dettaglio del disegno. (2.41) Dal Manuale di recupero di Città di Castello, volta di mattoni a schifo lunettata, 1990.



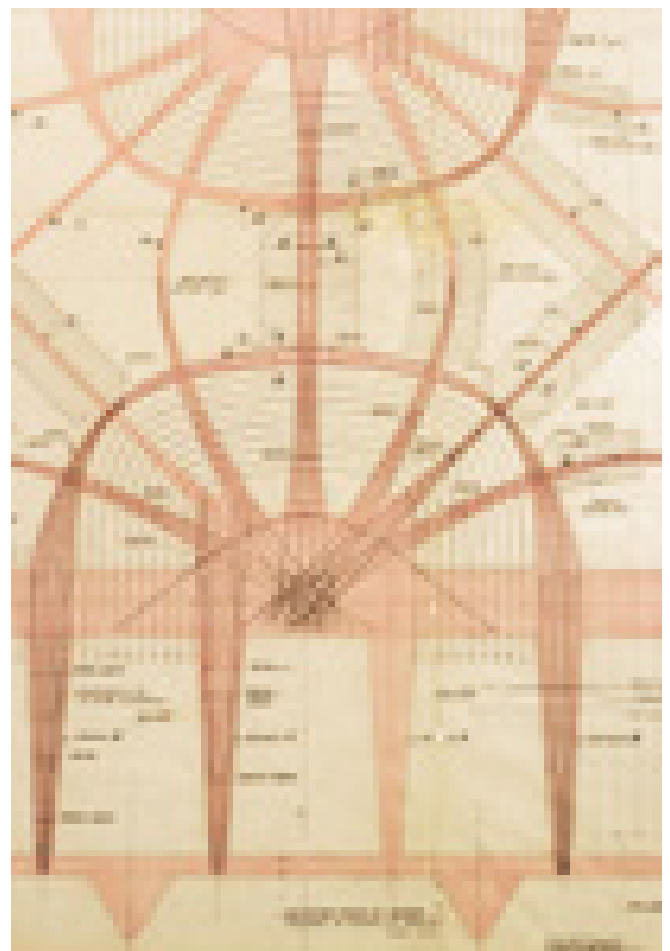
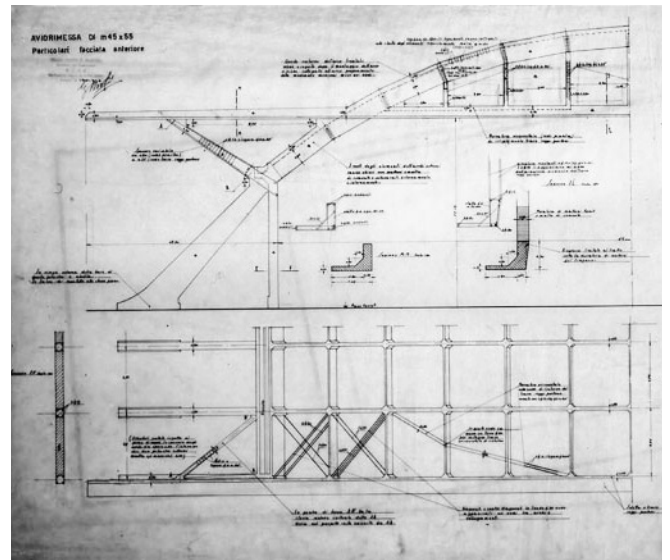
La rappresentazione delle strutture esistenti per la regolamentazione normativa di intervento si espande alla scala dell'aggregato urbano e della sua scomposizione in unità. (2.42) Dal Manuale di Recupero di Genova Antica, considerazioni specifiche sulla struttura urbana, 1988.

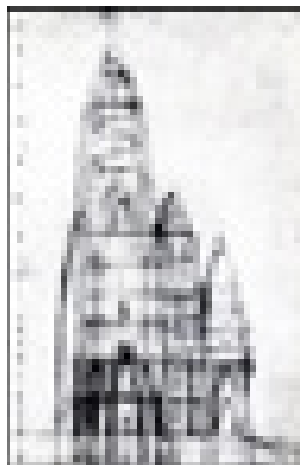
La crescente adozione di componenti e moduli edilizi standardizzati, in termini formali ma soprattutto meccanici, è affiancata dalla ricerca ingegneristica sui parametri fisico-meccanici dei materiali costruttivi storici, e l'espressione delle modalità di comportamento statico dell'apparato strutturale oltrepassa gradualmente le variabili formali orientandosi verso l'indicizzazione di valori numerici sulle grandezze caratteristiche di resistenza. Una declinazione dell'approccio di standardizzazione che si espande dall'ambito del disegno verso quello della scienza dei materiali, orientando però tale settore su un ritorno all'espressione numerica, alla formulazione analitica dell'apparato strutturale ed al linguaggio matematico per la sua enunciazione.

In un'emersa fiducia verso la parametrizzazione caratteristica dell'apparato strutturale attorno ai valori di resistenza dei materiali costruttivi, nelle appurate qualità chimico-fisiche⁵¹, l'intero approccio conoscitivo grafico al sistema resistente ne rimane influenzato. La dicotomia tra 'disegno' e 'meccanica' strutturale viene sbilanciata verso un'espressione quantitativa, numerica, dominante su quella qualitativa nella comune declinazione finale e comunicativa dei risultati.

*"Ogni forza trova la sua espressione nel numero, e ciò si chiama espressione numerica. Oggi, questa rimane, nell'arte, un'asserzione più che altro teorica, ma che, nondimeno, non deve essere trascurata: oggi ci mancano delle possibilità di misurazione, che però una volta o l'altra possono essere scoperte e non rimanere un'utopia. Da quel momento in poi, ogni composizione avrà la sua espressione numerica, anche se questo dovrà valere, all'inizio, solo forse per il suo "schema" e per i suoi complessi maggiori."*⁵² Dalla concretizzazione analitica di ideali approcci teorici, deriva un arresto elaborativo nella teoria dell'immagine e l'incipit di un ridimensionamento cognitivo dell'avvicinamento grafico alla struttura, risultante in un meccanismo di progressiva sintetizzazione della forma e rinuncia ai valori di dettaglio del disegno, sostituiti nella dimensione conoscitiva da segni vettoriali e schemi meccanici di sollecitazione.

(2.43) Pier Luigi Nervi, dettagli di studio per strutture complesse, 1950. Nei suoi disegni, Nervi inizia gradualmente a separare la descrizione strutturale dall'impostazione tecnico-geometrica del disegno, conferendogli caratteristiche più info-grafiche e slegando la forma strutturale dai canoni di modularità istituiti nel disegno della manualistica.





La rappresentazione della struttura è così avviata attraverso una sintesi astrattiva, che ricostruisce l'articolazione unitaria del sistema attraverso due entità di base: la linea, il componente formale costitutivo, ed il punto, il vincolo connettivo nell'articolazione dell'unità. La linea è chiamata a descrivere l'elemento resistente direzionale, nelle configurazioni collettivamente idealizzate di trave e pilastro, combinando visualmente 'direzione' ed 'estremità' nello sviluppo dell'azione tensionale. Tale pratica è accompagnata da un'accentuazione sulla variabile del peso della linea stessa, quasi sempre in modo simbolico ad identificare un'associazione informativa implementata, in termini di proprietà geometriche e materiche del componente. Il punto esplicita invece una rappresentazione del vincolo, interno alla struttura o al contorno del suo sistema, espresso in termini precisi di vettore e modulo, per la comunicazione di relazioni di articolazione e connessione ad assoluta intesa statica ma privati della biunivocità ad un corrispondente dettaglio tecnologico. Il concetto di 'peso grafico' del punto simbolico viene slegato dall'idea di peso materiale, fisico, legandolo invece all'espressione di una risposta sollecitativa esterna o di tensione interna.

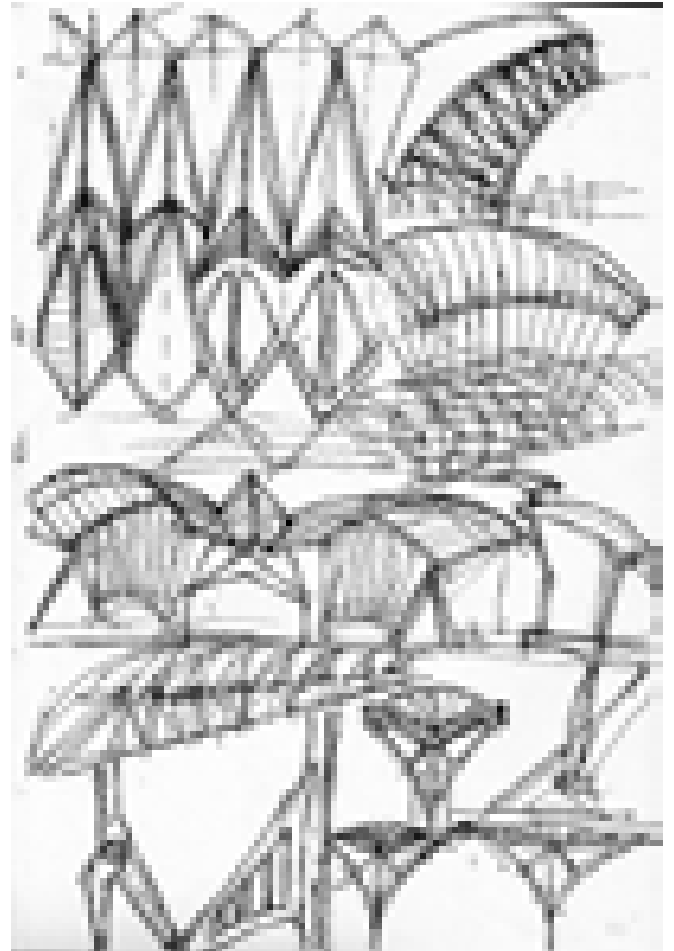
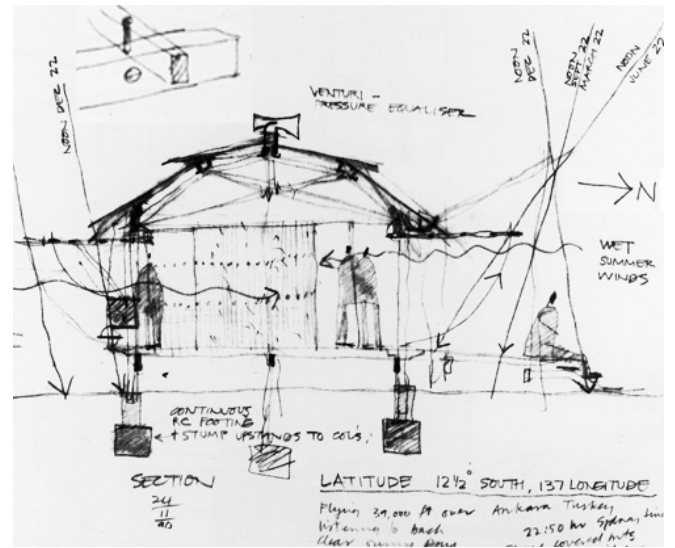
Libertà e fluidità di forme e tratto per la rappresentazione strutturale. (2.44-2.48) Disegni per la descrizione di strutture complesse di Antoni Gaudì (1852-1926), Frank Lloyd Wright (1867-1959), Antonio Sant'Elia (1888-1916).



“La linea ha soppresso la superficie”⁵³, e la scelta simbolica sostituisce il grado di anatomia tecnologica raggiunta attraverso i precedenti studi, con sistemi che “parrebbero essersi sviluppati per codificare quei significati cui le intelligenze umane sono ora più propense”⁵⁴. In tal modo, la configurazione morfologica, confermata sull’astrazione, conduce a modelli grafici di declinazione schematica, dove il contorno formale è prosciugato attorno ad uno scheletro dell’unità sempre più estremizzato, privato di ogni caratterizzazione materica visiva e contenuto in una griglia di articolazione tra componenti strutturali, vincoli di connessione e sistemi di riferimento.

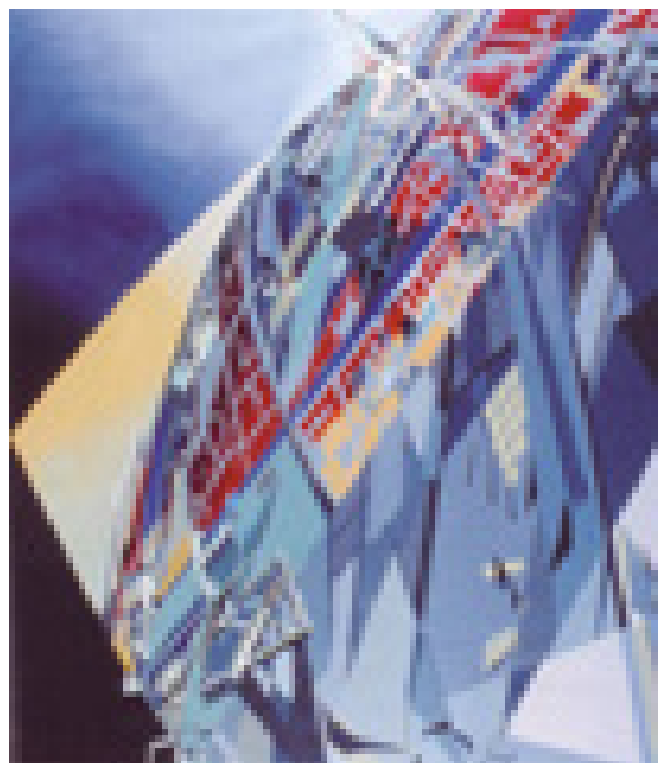
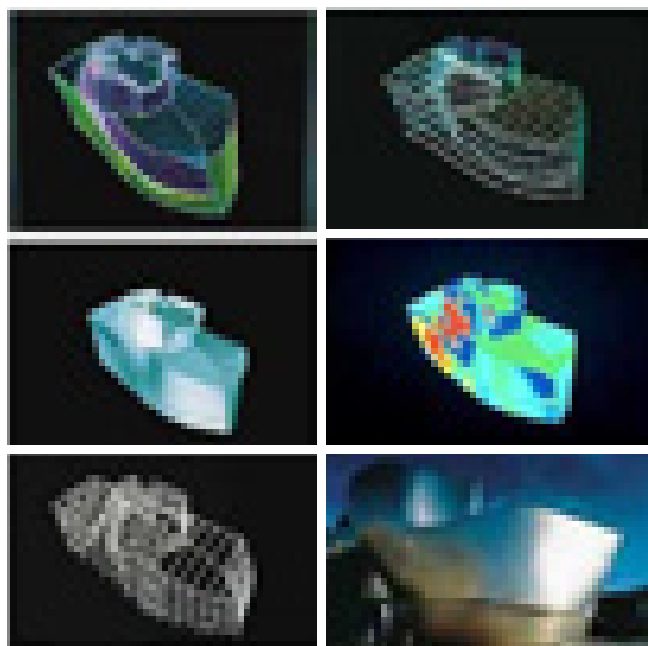
Si avvia così la ricerca di un approccio grafico sintetico a strutture meccanicamente controllate, per le quali si sia in grado di eseguire una corretta analisi derivante dall’individuato schema strutturale sintetizzato nei suoi tratti essenziali statici, partendo pur sempre dall’osservazione dell’effettiva morfologia costruttiva. L’operazione conoscitiva è così avviata attraverso un primo stadio di percezione visiva, dove lo studio tipologico della ‘forma’ di unità e sistemi permette di derivarne una versione signica, che ricalca i percorsi comportamentali schematici semplificando la complessità morfologica delle ammorsature murarie⁵⁵.

Coesistente e corrispondenze strutturali attraverso forme complesse. (2.49-2.51) Disegni per la descrizione di strutture moderne e contemporanee di Le Corbusier (1887-1965), Carlo Scarpa (1906-1978), Santiago Calatrava (2001).

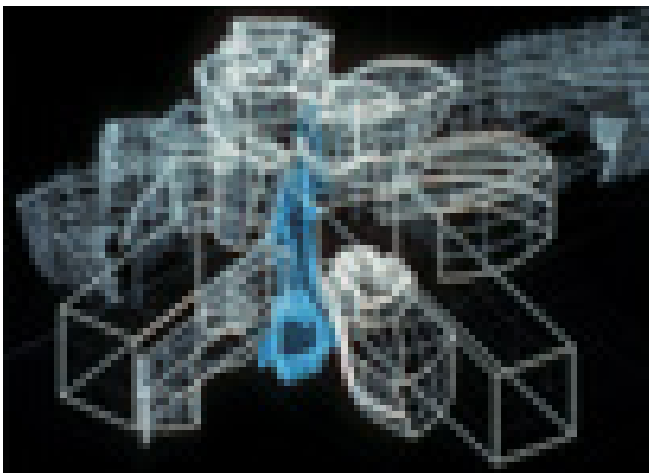
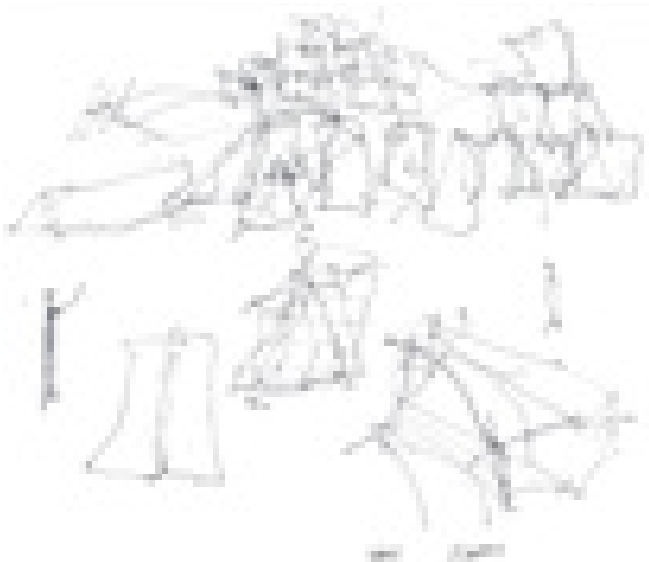


“Il resto è soprattutto una questione di pazienza, che porterà alla dissezione dei complessi maggiori in complessi sempre più piccoli, subordinati. Solo dopo la conquista dell'espressione numerica sarà completamente realizzata quella teoria esatta della composizione.”⁵⁶ È il segnale di passaggio allo sviluppo degli schemi di analisi del *Finite Element Method*, alla trasposizione delle complessità strutturali nella composizione di cellule geometriche elementari, univocamente definite dalla matrice delle loro relazioni tensionali, morfologicamente slegate dalla specifica materia e governate nella loro identità grafica unicamente da necessità di carattere computativo: qualsiasi specifica costruttiva e sull'imperfezione tecnica è declinata e statisticamente distribuita all'interno di parametri analitici, senza lasciare traccia visibile sulla pelle dello schema.

Iperstrutture di manipolazione del sistema di connessione e configurazione degli elementi, dalla grafica 2D alla dimensione digitale 3D.



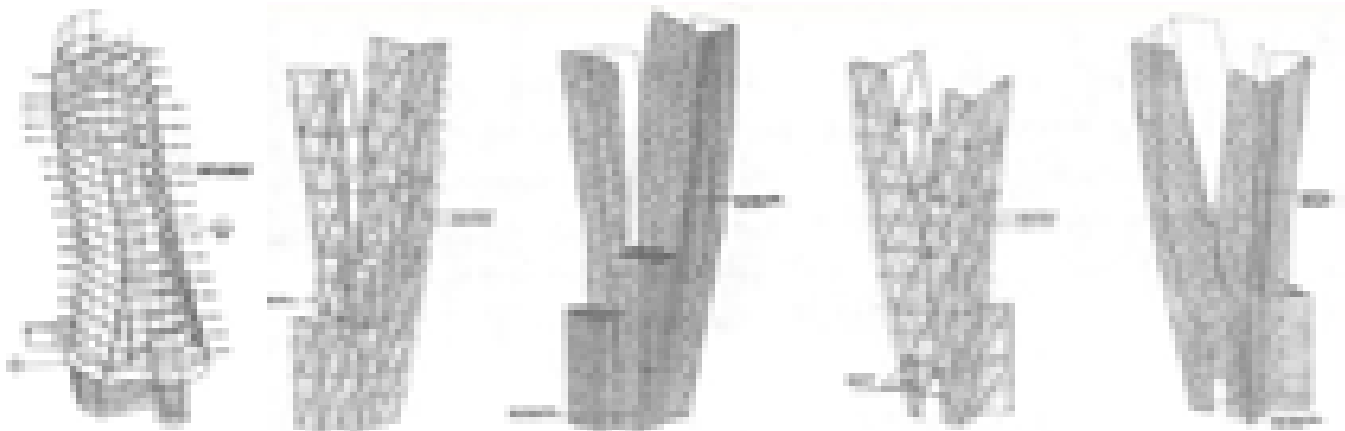
Sopra (2.52) Zaha Hadid, *The world (89 Degrees)*, 1983. A lato, Frank Gehry e la dinamicità delle strutture dal progetto digitale (2.53) modello strutturale da CATIA; (2.54) Guggenheim Museum, modello totale.



Il processo di decimazione formale applicato alla rappresentazione delle unità del sistema resistente, fino alla caratterizzazione monodimensionale dell'elemento strutturale⁵⁷, trova un adeguato ambiente di sviluppo in contemporanea all'affermarsi delle pratiche di disegno digitale, ed alla loro manipolazione dell'atto grafico. La ricerca di affidabilità mimetica, solitamente auspicata per la descrizione della realtà oggettiva in modo corretto e univoco, è appartata in virtù dell'affermarsi di un linguaggio normalizzato dall'elevata potenzialità informativa⁵⁸ a scapito di una dialettica del disegno ora governata dalla sequenza di sintassi geometriche ideali in lessico digitale⁵⁹. Si instaura un ambiente di sopravvivenza grafica dove i tradizionali mezzi di supporto e medium della rappresentazione sono sostituiti da entità digitali solo apparentemente visuali, nella relazione di interfaccia con l'operatore, ma cognitivamente e funzionalmente fondate su una meccanica di algoritmi virtuali dove "non c'è alcun momento nel sistema che possa essere chiamato 'disegno'"⁶⁰.

Le opportunità offerte dall'ambiente digitale amplificano le modalità di espressione della struttura, liberandola da vincoli della rappresentazione mimetica verso le possibilità irreali offerte dalla modellazione geometrica per primitive ed algoritmi.

(2.55) Frank Gehry, disegno di concept progettuale per l'apparato strutturale del Guggenheim Museum di Bilbao. (2.56) Trasposizione dell'involuppo lineare in entità geometrico-parametriche, con superfici e volumi digitali complessi. (2.57) Moduli strutturali CAD di aggregazione ed integrazione tra livelli di elementi e connessioni.



2.2. VERSO UNA RIABILITAZIONE GRAFICA: POSSIBILITÀ COGNITIVE E DIGITALI DELLA DIALETTICA MORFOLOGICA STRUTTURALE

“E oggi? La facilità di calcolo consente di “ridurre” geometricamente-numericamente forme inusuali, offrendo una libertà che talora scivola nell’anarchia. In effetti l’ampliamento dei confini, un po’ rigidi, della geometria euclidea, rende assai più difficile il dominio delle forme: ma queste richiedono sempre una giustificazione, formale o simbolica, che si dispieghi ai sensi del fruitore. La lingua si complica e, dopo l’entusiasmo collettivo per qualche novità di forte impatto, subentra la coscienza o dell’incapacità di leggere questi nuovi linguaggi, o della gratuità dell’opera.”⁶¹

Il progressivo cambio di indirizzo revisionato nell'ambito del disegno dedicato alla rappresentazione strutturale evidenzia lo stato di alternato squilibrio legato alla sua valenza e ruolo nell'aspetto cognitivo della conoscenza del sistema.

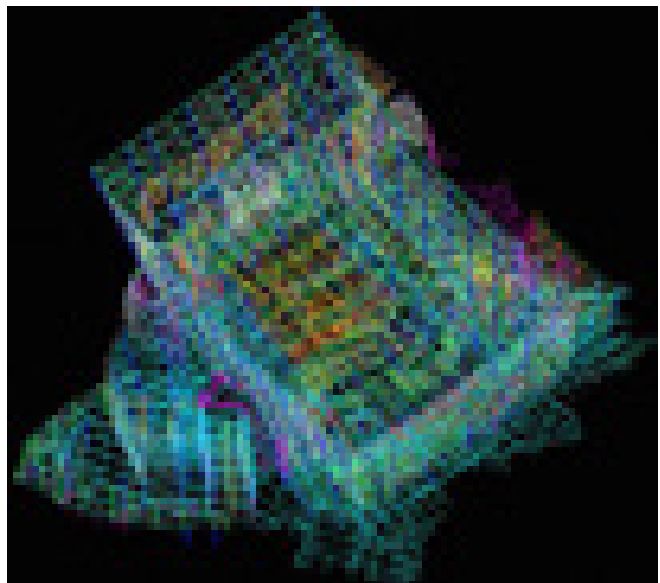
La pratica schematica di estrema sintesi astratta a cui sembrano aver condotto l'approccio digitale ed il calcolo computazionale, attraverso i sempre più evoluti metodi di Finite Element Analysis FEA, evidenzia a prima vista un'estrema fiducia nella possibilità di applicare parametri e vincoli legati alla materia costruttiva che siano quasi interamente capaci di derivare un'analisi completa del comportamento tensionale dell'opera architettonica, con il supporto di un mezzo grafico geometricamente semplificato nel quale la pura forma sia a disposizione del contenuto esperenziale. La facilità di calcolo instaurata dalle più recenti piattaforme consente di 'ridurre' geometricamente e numericamente forme anche inusuali, offrendo una libertà mimetica che talora lascia scivolare il contenuto grafico nell'anarchia della possibilità architettonica⁶², assimilando moduli strutturali compositi e dettagli di articolazione nell'indifferente omogeneità scompositiva del pattern FEM⁶³. Il riutilizzo di dati già stabiliti presta l'uso dei parametri numerici all'adattamento multiplo da parte delle macchine di calcolo, all'iterazione del progetto ed alla riapplicabilità del sistema, ma al tempo stesso oltrepassa spesso il controllo consapevole dell'azione⁶⁴.

L'approccio concettuale di “divisione analitica in elementi fondamentali, per giungere poi a una propria espressione grafica”⁶⁵, già affermato nella storia della rappresentazione astratta ed ora declinato nella comunicazione oggettiva della struttura, esprime però la sua debolezza al relazionarsi con una forma singolarmente definita, 'già prevista',



(2.58) Ambiente CAD, disegno vettoriale applicata ad una struttura e parametrizzazione dinamica dei suoi componenti.

(2.59) Gestione di struttura a telaio reticolare complesso in ambiente digitale, attraverso vettorializzazione e layer di componenti.

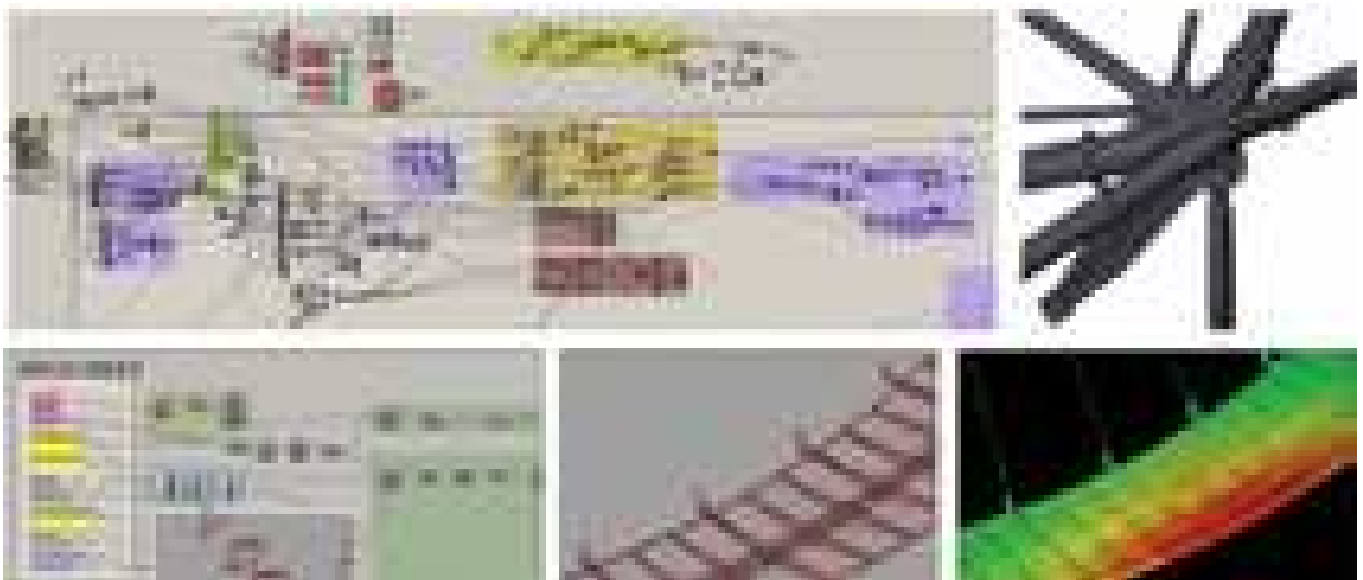


quale quella fornita dall'imperfezione morfologica delle fabbriche strutturali storiche, che ricolloca nel dettaglio mimetico l'essenza del puro problema formale. Se il significato metodologico di Struttura richiama, dall'origine antica 'ster', il disporre in forma aperta, chiara e visibile, sia il prodotto che il lessico della sua costruzione⁶⁶, è anche vero che le pratiche di mimesi (alla pari di quelle di non mimesi) oggi promosse dal disegno digitale sembrano promuovere un oggetto irreali, 'che è altrove'. Le nuove tecnologie digitali pongono oggi inedite questioni sul ruolo che le illusorie forme di restituzione mimetica possono assumere rispetto all'oggettività di un mondo concreto, che nella sua rappresentazione è invece sempre più rimosso dal campo della conoscenza e dell'esperienza. Le nuove potenzialità della grafica digitale promettevano di fare dell'architettura una 'scienza esatta' superando definitivamente il disegno imperfetto, definito quale arte applicata 'fatta a mano' senza tenere in considerazione la sua attinenza a trasporre una realtà materica a sua volta imperfetta. È così che ora assistiamo ad una "denigrazione dello sguardo"⁶⁷, costretto ad alterare il collegamento tra occhio-mente-disegno forzandosi ad una standardizzazione semplificata dell'immagine strutturale, ed alla scomparsa del segno formale e dell'imperfezione geometrica, difficilmente previsti dagli algoritmi dell'eidomatica⁶⁸. La collocazione contemporanea in un'"era del post-digitale"⁶⁹, operante una revisione degli assunti del

disegno ed una valutazione critica sulle loro reali potenzialità e declinazioni, offre già la ricerca a nuove strade della rappresentazione architettonica capaci di intessere un dialogo combinato tra forma e meccanica, che comunichi non solo un corredo di procedimenti e di manovre a un operatore, ma una nuova sensibilità verso le questioni della prefigurazione e modellazione del sistema strutturale, soprattutto dell'espressività comportamentale di cui le forme affidabili si possono caricare traducendosi in "realitas objectiva"⁷⁰. Nell'approfondimento di tali pratiche, viene così centrato il problema dell'assegnazione di adeguate identità di astrazione alle forme strutturali che non appartengono alla creazione algoritmica. Tale fase è volta in primo luogo a riaffermare il relativo processo di generazione nell'osservazione e discretizzazione diretta della realtà documentata, e implicitamente essa ridefinisce il ruolo e la competenza della Forma attraverso i suoi molteplici gradi di astrazione ed iconicità.

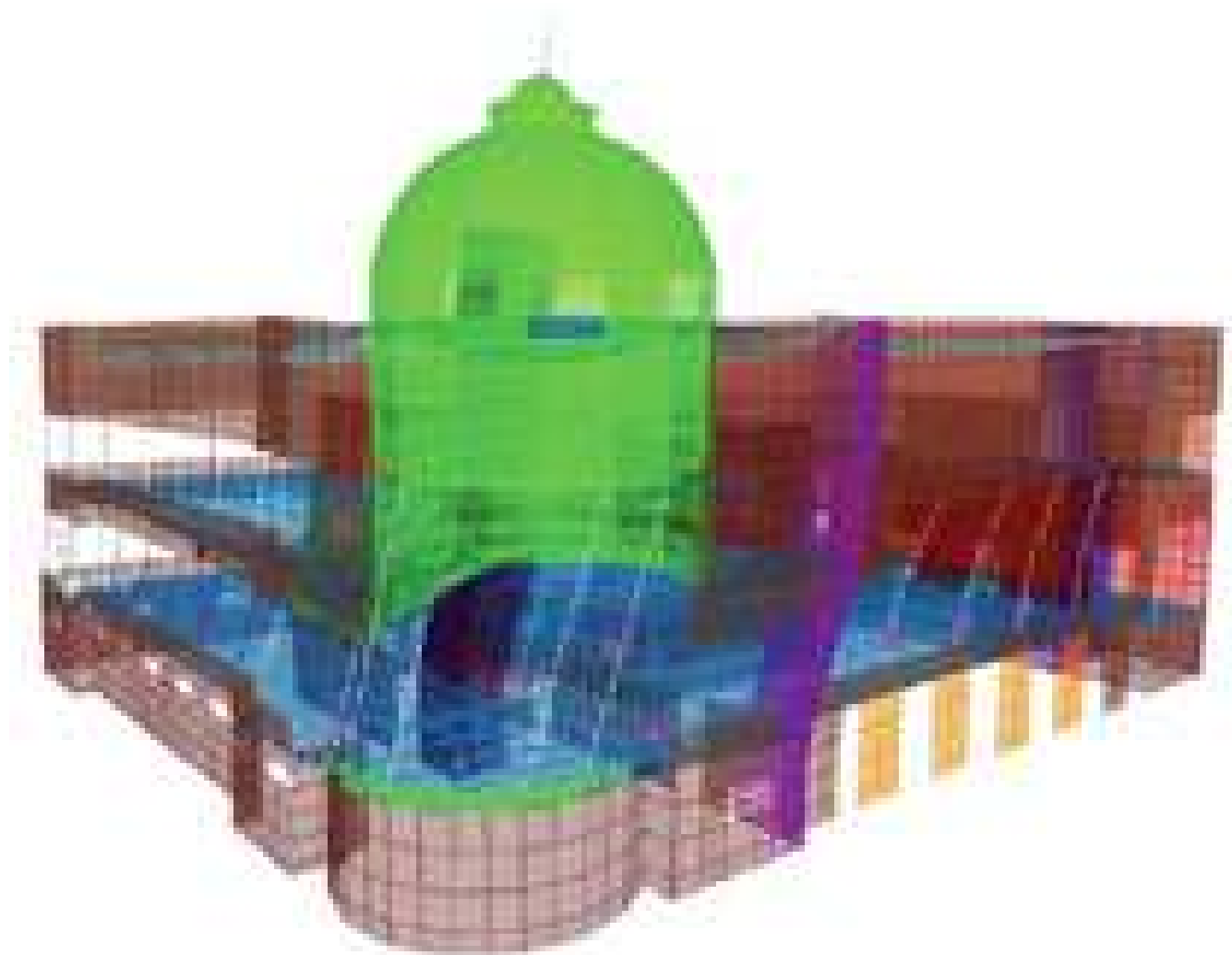
Il dominio visuale degli apparati strutturali è ceduto alla manipolazione formale attraverso algoritmi dinamici e modulazioni geometriche. La modellazione 'costruttiva' è allontanata verso una metodologia prevalente di programmazione numerica, abbandonando le procedure di percezione e rappresentazione caratteristiche del disegno.

(2.60) Opportunità e workflows per la modellazione di strutture digitali.



Esempio di pratica rappresentativa per i sistemi strutturali appartenenti a complessi di architettura storica: standardizzazione formale ed astrazione dei dettagli morfologici per la valutazione di deformazioni specifiche secondo le formulazioni.

(2.61) struttura FEM di complesso storico architettonico in muratura per valutazioni sismiche da Wiss, Janney, Elstner and Associates, Inc, 2016



NOTE

1 Cit. Arnheim R. (2004) *“Arte e percezione visiva”*. Milano: Feltrinelli Editore. p. 23. Ed. orig. Arnheim R. (1954). *“Art and Visual Perception: a Psychology of the creative eye”*. Regents of the University of California.

2 Se è appurato come il matematico riesca a costruire formulazioni mentali astratte la cui logica è interamente al di fuori di ogni tipo di rappresentazione, non è generalizzabile che il pensiero figurativo sia assente nei contesti di predominio della logica analitica. Esso richiama in realtà il rinnovo dei gradi di interazione tra l'espressione grafica e la logica scientifica, riscoprendo il 'primato dell'occhio' alla base dell'interazione tra l'uomo e l'ambiente fisico nel quale ha luogo l'esperienza della meccanica delle strutture.

3 *“La rappresentazione, dunque, si esercita in absentia rispetto all'oggetto o all'idea di esso [...] misurando continuamente, attraverso la rete di segni che la configura, lo scarto tra una struttura rigorosamente formalizzata – quella del disegno appunto – e la realtà, pur'anche quella del pensiero, fortemente caratterizzata per la sua natura stocastica. La rappresentazione è il segno sensibile di una lontananza che separa il mondo della descrizione da quello dell'esperienza, e tuttavia in questo gap, a un tempo qualitativo e quantitativo, emergono valori e aporie che la rendono indispensabile.”* Cfr. De Rosa A. (2011) *“Il disegno e la rappresentazione: lezioni dall'architettura contemporanea”*. Rivista di Estetica, 47/2011: disegno pp. 95-103

4 L'autore Robin Evans, storico e critico dell'architettura negli anni Ottanta, nel suo saggio sottolinea l'esperienza attiva sull'oggetto architettonico nel processo di traduzione bidirezionale *“dal disegno all'edificio”* e viceversa, dove, oltre alla perdita della terza dimensione ricondotta nel disegno alla sua mera proiezione, si trasmuta anche l'evidenza fisica del manufatto. Per quanto concerne la presente ricerca, la riflessione sarà in merito alla consapevolezza e controllo di tali logiche di variazione, in funzione degli obiettivi conoscitivi sull'apparato strutturale. Per approfondimenti, cfr. Evans R. (1997) *“Translation from Drawing to Buildings and Other Essays”*. Cambridge, MA: MIT Press.

5 Il conseguimento di un'immagine 'strutturale', quale azione documentativa di registrazione dell'esistente per mezzo del disegno, pone una riflessione sul *“ruolo che le illusorie forme di restituzione mimetica possono assumere rispetto all'oggettività di un mondo concreto sempre più rimosso dal campo della conoscenza e dell'esperienza”* a causa di una eccessiva pretesa delle tecnologie digitali di soddisfare l'intero processo di rappresentazione, dall'atto mnemonico alla restituzione figurativa e di analisi. Resta così aperto *“il problema dell'assegnazione di identità linguistiche forti alle immagini digitali che non alberghino all'interno del mondo tecnologico”*, poiché in tal senso *“si rinsalderebbe e rinnoverebbe un antico legame fra scienza ed espressività figurativa”*. Cit. De Rosa A. (2011), *op. cit.*

6 Nei termini della diagnostica strutturale, le modalità del disegno sono a richiedere una necessaria declinazione analitica in

merito ai riferimenti grafici di base, contestualmente al processo di trasposizione della realtà attraverso il segno. L'esigenza è affinché essi si presentino come univoci, scientificamente rigorosi, comparabili, archiviabili ed aggiornabili nella capacità di seguire l'effettivo andamento evolutivo dei quadri di lesione e danno. Per una più estesa trattazione, cfr. Tosti G. (1989). *“La diagnostica strutturale”*. In XY Dimensioni del disegno, (V), 11-12, 1989, pp.

7 Il passaggio a schemi strutturali puntuali nelle fabbriche edilizie storiche avvia una riflessione di dettaglio sulle relazioni tra forma resistente ed equilibrio statico dell'insieme architettonico. Se prima tale aspetto era fondamentalmente risolto nella potenzialità volumetrica di scarico tensionale dei maschi murari portanti, l'introduzione di appoggi strutturali puntuali indirizza il disegno della fabbrica architettonica ad una più profonda analisi in termini sia formali che di esperienza meccanica. Tale conoscenza scientifica è trasmessa inizialmente in una modalità grafico-geometrica di proporzioni e rapporti geometrici, ma verrà gradualmente affiancata da una prevalente descrizione analitica. Per una più estesa trattazione, cfr. Abbate F. (2008) *“Presentazione”*, in Galasso D. (2008) *“Villard de Honnecourt, la rivoluzione strutturale del medioevo”*. Archigrafica 13, 2008.

8 Ibidem.

9 I trattati architettonici dell'epoca medievale non presentano un carattere sistematico sul componente strutturale, e non offrono un apporto teorico alla disciplina che affrontano. In generale, essi si presentano piuttosto come i sedimenti di un sapere figurativo sulla concezione della 'forma' della struttura in quanto 'modello' o exemplum. Le raccolte grafiche pervenute si configurano prevalentemente come 'raccolte di cantiere', il cui carattere specifico tecnico-costruttivo sarebbe stato implementato in corso d'opera ed ulteriormente arricchito e rimaneggiato dai Magister successivi. Per una più estesa trattazione, cfr. Recht R. (2001) *“Il disegno d'architettura. Origine e funzioni”*. Milano: Jaca Book, pp.109-114.

10 Gli Architekturmusterbücher costituivano libri di modelli architettonici e costruttivi prodotti a partire dal XII-XIII secolo ad uso specifico di artigiani e progettisti, diffusi in Europa come 'manuali' a partire dalla fine del XV secolo. Tali opere erano assunte con l'obiettivo di informare sul modo di comporre geometricamente sistemi costruttivi delle fabbriche edilizie medievali, quali pinnacoli, volte, finestre, scale e rosone, mettendo in relazione proporzionale le diverse sezioni. Tra gli esempi graficamente più ricchi, si ricorda il Taccuino di disegni o Livre de portraiture di Villard de Honnecourt, compilato verso il 1235 ma rinvenuto solo nel 1849. Tra i disegni contenuti, sono noti in particolare quelli relativi all'alzato interno ed esterno delle cappelle absidali della Cattedrale di Reims.

11 Cfr. Galasso D., *op. cit.*, p. 8

12 Adottata tra le unità elementari del disegno, la linea è concettualmente ragionamento astratto, filosofico, di limite del pensiero di identificazione. Solo nel momento in cui il suo significato passa a quello di 'contorno' della 'figura', margine tra il suo dominio e lo sfondo indistinto, essa si configura quale atto visuale di modulazione della superficie. Il passaggio a volume,

infine, può avvenire se essa abbandona il profilo esterno delle figure per penetrare al loro interno.

13 Quale manifestazione della suddivisione visuale, la linea è adottata come segno dell'involucro, del diaframma che separa ed individua l'elemento funzionale. All'interno di tale limite estremo, la costruzione matematica domina arbitrariamente, e può distruggere la forma e la delimitazione dei suoi elementi primari per ricompilarla con perfetta necessità e coerenza secondo il messo materiale instaurato tra le sue varie parti. Per una più estesa trattazione sul significato grafico e pittorico della linea, cfr. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, p.69

14 Cit. Abbate F. (2008), *op. cit.*

15 La linea di contorno è qui intesa come "circumscriptione", un segno che individua l'oggetto, lo definisce e lo razionalizza. Cfr. Alberti L. B. (1966) "*De re aedificatoria*". Milano: Il Polifilo, Libro I, 7. Ed. orig. (1450). *De re aedificatoria*

16 Cit. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, pp. 99-100.

17 A tale fase di revisione grafica, si fa riferimento al 'disegno strutturale' in una veste ancora prevalentemente orientata sull'idea di "disegno progettuale", non di rilevamento. Sarà possibile solo più avanti, verso l'Ottocento, instaurare concettualmente un proposito di atto rappresentativo come intenzione di cogliere e condensare i segni di trasformazione e cinematismo presenti sulle fabbriche storiche già esistenti.

18 "*Tale premessa va fatta per sottolineare come la Geometria sia, di fatto, un modo di pensare, con le sue regole sintattiche, la sua logica di chiara impronta deduttiva, il suo ruolo pratico descritto da Vitruvio. [...] La necessità di trovare giustificazione sia delle cose dell'Universo che dei nostri atti (nel caso specifico, progettuali) trova nella Geometria un sostegno sicuro, tanto percettivamente – richiami, coincidenze, allineamenti, ecc. – quanto logici, ovvero spiegabili e trasmissibili. In effetti, la strutturazione geometrica dello spazio consente facilità di orientamento all'interno dello stesso attraverso appunto richiami evidenti di allineamenti e coincidenze, autentiche "spiegazioni spaziali", giustificazioni logiche."* Cfr. Marotta A., De Bernardi M. L. (2012) "Geometria ovvero il cristallo del pensiero". *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 41-46

19 Cit. Candito C. (2012) "Quale fondamento? Quale immagine?" *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 5-12

20 Nell'ambito dell'architettura delle strutture storiche, un notevole contributo è dato dallo studio delle opere fortificate. Le architetture della difesa, per le ragioni teoriche e costruttive relazionate alla loro ingegneria, rappresentano tra i casi più approfonditi di analisi del legame tra la geometria algebrico-matematica della forma e la concezione razionale e statica delle sue componenti resistenti, particolarmente enfatizzate in termini di sollecitazione non solo a carichi statici ma ad eventi accidentali di carattere bellico. Per una più estesa trattazione, cfr. Marotta A. (2012) "Geometria e costruzione: modelli mentali e tipi realizzati nel territorio della difesa." *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 161-166

21 Cit. Giuffrè A. (2011), *op. cit.*, pp. 210

22 La regolarità geometrica trova espressione nel

consolidamento di una 'matrice' quale attitudine di controllo razionale nell'analisi delle forme. Esse consolidano un'operazione di discretizzazione del reale finalizzata a delineare le geometrie salienti presenti nella rappresentazione, ed instaurano un percorso cognitivo che conduce alla selezione degli elementi necessari alla sua figurazione. Per una più estesa trattazione, cfr. Centofanti M. (2008) "*Dalla matrice geometrica vitruviana alla regola. Aspetti del disegno di architettura nel Cinquecento*". Roma: Aracne.

23 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 87

24 L'oggettivizzazione dell'esperienza della dimensione fisica attraverso la geometria non può astenersi dall'identificazione di livelli multipli di interazione visuale e proporzionale ai quali tale rapporto geometrico risulta riferirsi. "*Su queste premesse teoriche la civiltà occidentale ha sviluppato un metodo quantitativo per la conoscenza dei fatti spaziali, basato sulla misurazione (degli enti fisici in sé stessi), sulla commisurazione (degli enti fisici fra loro) e sulla rappresentazione di tali rapporti mediante convenzioni geometriche e grafiche, che trasmettono all'intelletto le informazioni necessarie a ricostruire la conformazione dell'ambiente.*" Cfr. Ramacciotti P. (2006) "*Strutture e sistemi del messaggio architettonico*". Napoli: Liguori Editore, pp. 190-191

25 Tra i principali manuali architettonici cinquecenteschi si richiamano gli apporti de I quattro libri dell'Architettura (1570) di Andrea Palladio, Sette libri dell'Architettura (1537-1575) di Sebastiano Serlio, Due regole della prospettiva pratica (1583) di Jacopo Barozzi da Vignola, Dell'idea dell'architettura universale (1615) di Vincenzo Scamozzi.

26 Cit. Ramacciotti P., *op. cit.*, p. 190.

27 Ibidem.

28 Ivi, p. 191.

29 Ai fini del tema della ricerca, si richiamano i contenuti di Guarino Guarini, Euclides adactus et methodicus Mathematicaque universalis. Torino: B. Zapata, 1671.; Frézier A. F., La Theorie et la Pratique de la Coupe des Pierres et des Bois pour la Construction des Voûtes et autres Parties des Bâtimens Civils & Militaires, ou Traité de Stéréotomie, à l'usage de l'architecture, par M. F., J. D. Doulsseker figlio, Strasbourg 1737-39.

30 La nascita della scienza moderna, a partire dal XVII secolo, inizia a costruire la formalizzazione delle discipline odierne, dispiegandone la classificazione dei saperi fino a tendere ad una loro rinnovata specificità di autonomia. Tale strutturazione della conoscenza viene indirizzata verso il canale di comunicazione divulgativa dei 'manuali', dal carattere enciclopedico; in particolare, in ambito architettonico ed ingegneristico, i contenuti scientifici in tema di costruzioni e di loro scienza statica trovano metodo di esposizione in un rinnovato lessico del disegno, tecnicamente implementato e graficamente arricchito per condensare le specifiche conoscitive. Tra i principali manuali ed opere illustrate, si richiamano le produzioni di Etienne-Louis Boullée (1728 – 1799), *Essai sur l'architecture* (1753-1755) di Marc-Antoine Laugier, *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir* (1802-1817) di Jean Rondelet, *Lezioni di Architettura* (1809) di Jean-Nicolas-Louis Durand.

31 L'evento culturale non coinvolge solo il più conosciuto rapporto tra l'architettura di accademia e l'ingegneria insegnata nei nuovi politecnici, condensato nell'Ottocento quale risultato di almeno due secoli di contrasto, ma più in generale le intere macro-discipline dell'arte e della matematica. L'emergere di figure persecutrici di tentativi di riallacciamento tra i due ambiti ha progressivamente declinato le pratiche del disegno verso una "matematicizzazione delle tecniche grafiche", con la nascita della geometria descrittiva e l'istituzione di proiezioni, assonometrie, prospettive: ne sono esempio e passo fondamentale nella storia del disegno Gerard Desargues (1591-1661), Gaspard Monge (1746-1818), William Farish (1759-1839). Per una completa trattazione, cfr. Parra G., Binci M., Magagnini M., Sardella P., Zannoni M. (2005) *"Il disegno dell'architettura"*, Bologna: Pitagora Editrice.

32 Cfr. Tagliaventi G., op. cit., p. 86

33 L'esperienza condotta nelle accademie francesi assume un carattere propriamente formativo, ed avvia una straordinaria produzione di rappresentazioni di architettura declinate in doppia misura sia sull'espressione dell'opera costruita che sulla descrizione delle sue specifiche in termini estetici e costruttivi. L'eredità grafica assume le prime sembianze di un disegno di 'qualità informativa', dove il sistema rappresentativo parte dalla soluzione compositiva e distributiva per giungere all'approfondimento costruttivo e proporzionale sui dettagli dei suoi apparati. Cfr. Amoruso G. (2013) "Il disegno imperfetto. Il processo analitico-visuale per il progetto", in Amoruso G., Brevi F., Ceconello M., Pierluigi G., Rossi M., Russo M. (2013) *"Verso l'era post-digitale. Disegnare il progetto, tra design e architettura"*, Giornata di studi 23 novembre 2012, Milano: Maggioli Editore, pp. 189-198.

34 Cfr. Kandinskij V. V. (1968), op. cit., p.53

35 Cfr. Amoruso G., op. cit.

36 Cfr. Ugo V., op. cit., p. 34

37 Il contributo della stampa, in termini sia di riproduzione per la diffusione che di qualità visuale della grafica rappresentata, risulta centrale per il contributo di tale manualistica all'uniformazione della conoscenza architettonica delle strutture. L'oggettività ed i codici istituiti impostano un rinnovato dialogo sul disegno delle strutture che indirizza verso una loro analisi anatomica, tecnicamente e modularmente impostata, alla pari del medium di stampa in fase di pressa. Cfr. Carpo M. (1998) "Il disegno dell'architettura all'epoca della sua riproducibilità meccanica", in Carpo M. (1998), *"L'architettura dell'età della stampa. Oralità, scrittura, libro stampato e riproduzione meccanica dell'immagine nella storia delle teorie architettoniche"*, Milano: Jaca Book.

38 Cfr. Ugo V., op. cit., p. 35

39 Ivi, p. 41

40 Ivi, p. 36

41 Si richiama il contributo grafico di Durand J. N. L. in *"Recueil et parallèle des edifices anciens et modernes"* (1799).

42 Si richiama il contributo grafico di Rondelet J. in *"Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir"* (1802 – 1817).

43 Cit. Selvafolta O. (2009) *"Testi, manuali, disegni per*

l'insegnamento dell'Architettura pratica al Politecnico di Milano nella seconda metà dell'Ottocento: il ruolo di Archimede Sacchi" in Brizzi G. P., Tavoni M. G. (a cura di) (2009) "Dalla pecia all'e-book. Libri per l'Università," Bologna: CISUI, CLUEB, p. 517. La scuola politecnica di Milano, in tale campo, definisce una tra le avanguardie ottocentesche di riflessione sul ruolo del disegno nel neo-conformato campo della tecnica professionale e dei sistemi di comunicazione grafica per il progetto architettonico.

44 Ivi, p. 513.

45 Cfr. Donghi D. (1905) *"Manuale dell'Architetto"*. Torino: Unione Tipografico-Editrice. Grazie all'ampia esperienza in ambito tecnico come ingegnere praticante presso il comune di Torino, e successivamente come ingegnere capo dell'Ufficio tecnico del comune di Venezia, la realizzazione del suo Manuale dell'Architetto in 10 volumi (1905-1935) istituisce uno dei compendi grafico-tecnici più completi nell'ambito della pratica progettuale architettonica ed ingegneristica. Con estrema sintesi illustrativa ma dall'alto contenuto informativo, Donghi redige un apparato di moduli grafici sulla standardizzazione di scheletri costruttivi, sistemi statici ed elementi di finitura, costituendo un'opera letteraria a cavallo fra il trattato e il manuale, che oggi ci appare per molti versi addirittura eroica per la dimensione e l'ampiezza del lavoro compiuto. Più che di un manuale, è possibile assimilarla ad una vera e propria enciclopedia tecnica di architettura, minuziosamente compilata. Nella direzione avviata da Donghi, si richiamano il *Bau-Entwurfslehre* (1936) di Ernst Neufert, *Manuale dell'Architetto* (1946) da CNR e USIS, *Manuale di Progettazione edilizia* (1992) di Mario Zaffagnini, *Il Nuovissimo Manuale dell'Architetto* (2003) di Luca Zevi.

46 Cit. Beltrami L. (1887) *"Commemorazione della vita e delle opere di Archimede Sacchi"*. Lettura fatta al Collegio degli Ingegneri ed Architetti nell'adunanza 12 dicembre 1886, «Il Politecnico. Giornale dell'Ingegnere Architetto Civile e Industriale», vol. 19, fasc.1-2, febbraio 1887, p. 47.

47 Cit. Formenti C. (1909) *"La pratica del Fabbricare, 2° edizione ampliata."* Milano: Hoepli, p. 9. L'opera di Carlo Formenti è inclusa nella revisione dei principali manuali grafici per l'edilizia, per il suo apporto alla codifica grafica e sistematica delle tipologie tecnologiche strutturali. Rispetto agli autori precedentemente citati, in questo caso l'opera si caratterizza per un'elaborazione illustrativa meno schematica e che risente maggiormente degli influssi accademici nella resa cromatica e spaziale delle conformazioni strutturali, tuttavia sviluppate con approccio analitico nella ricostruzione di campiture e soluzioni di tratto grafico in corrispondenza delle diversità materiche e costruttive.

48 Cfr. Buratti Mazzotta A. (2008). *"Cultura del progetto e didattica della rappresentazione al Politecnico di Milano tra Otto e Novecento"*. Annali di Storia delle Università Italiane, 12, 147-169.

49 Nella definizione di 'standard' e 'standardizzazione' bisogna considerare che mentre il primo termine assume soprattutto valore di modello di riferimento, da intendersi in senso piuttosto ampio, il secondo forza il termine precedente ad assumere un senso più coercitivo, ponendo l'accento su un'uniformità di forme e

dimensioni, che derivi dal rispetto di precise norme (da cui anche il termine normalizzazione). Per approfondimenti, cfr. Chirone E. (2007) *“Oggetti e forme all'origine della standardizzazione”*, in Terenzi B. (a cura di) (2008) *“Dal protodesign al design. La qualità dell'oggetto tra passato e presente guardando al futuro”*. Bergamo: Sestante Edizioni.

50 Cit. Carpo M. (1998), *op. cit.*, p. 58.

51 La normativa in materia strutturale, sia europea che nazionale, si è adattata in tempi recenti ad una trattazione in termini di sicurezza e verifiche di resistenza dei sistemi secondo l'istituzione di parametri caratteristici, indicatori del comportamento dei materiali e della sicurezza in merito alla qualità tecnologica e tipologica del tipo di struttura. Tale approccio, interamente analitico rispetto alle precedenti pratiche, ha contribuito a sbilanciare le modalità dell'analisi strutturale a sfavore del supporto grafico, sempre più relegato in termini di complemento per la progettazione spaziale e non di valore morfologico quale sorgente di dati utili in termini di calcolo quantitativo.

52 Cit. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, pp. 100-101

53 Ivi, p. 113.

54 Cit. Gardner H. (1999). *“Intelligence reframed: Multiple intelligences for the 21st Century.”* New York, NY: Basic Books. pp. 37-38. Secondo la teoria per cui l'intelligenza umana, in termini elaborativi, è sviluppata su più di una singola proprietà della mente, è possibile intendere per il XXI secolo lo sviluppo di intelligenze multiple. Tramite esse, il pensiero umano si trova a poter rimodulare l'esperienza dell'esistente con collegamenti, intuizioni e mezzi di elaborazione dell'informazione prima non possibili. In tali termini, ciò che intendiamo come 'codifica' di informazioni intese come 'immediatamente intuibili' può corrispondere invece ad una 'traduzione' di dati in una forma direttamente incomprensibile ma compatibile con una delle nuove intelligenze affermate: ne è qui caso di riflessione il tema dell'informazione sulla struttura architettonica in termini computazionali meccanici.

55 Cfr. Giuffrè A. (2011), *op. cit.*, p. 36.

56 Cit. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, pp.100-101

57 La congiunzione della struttura analizzata con molteplici informazioni di carattere fisico-meccanico, se da un lato apre il paradigma della forma multidimensionale dove ogni dimensione è corrispondente ad un differente grado e contenuto informativo, dall'altro agisce all'opposto sulla forma strutturale, trasponendo tutte le sue caratteristiche in variabili numeriche, fino a perdere anche la centralità del suo profilo di sezione, standardizzato, e ridurla all'essenzialità della linea monodimensionale.

58 Cfr. Cardone V., *op. cit.*, p. 17. Nella volontà di comunicare il messaggio referenziale, denotante la realtà oggettiva, a differenza del messaggio estetico di carattere più ambiguo e legato a scelte interpretative, la somiglianza visiva dell'immagine al contesto reale non è strettamente necessaria al fine logico. La descrizione della realtà oggettiva in modo corretto e univoco, instaurando un adeguato grado di normalizzazione, può essere sufficientemente supportata dal linguaggio di schemi e sistemi di astrazione, purché

tale azione corrisponda ad una fase di comunicazione di informazioni e conoscenze già percepite e dedotte dal mondo reale. Se il prodotto grafico vuole invece costituirsi esso stesso quale sorgente di conoscenza, la sintetizzazione del linguaggio signico delinea una rarefazione dei dati di elaborazione dall'immagine all'idea.

59 Cfr. Battro A., Denham P. J. (2010) *“Verso un'intelligenza digitale”*. Milano: Ledizioni, p.51. In tal senso, il riconoscimento di un'"intelligenza digitale" individua un carattere di "mutazione antropologica" che oltre al campo delle neuroscienze risiede nell'interazione pratica al campo dei nuovi media comunicativi e visuali, tra i quali si conta anche il panorama dei dispositivi di disegno e rappresentazione tridimensionale oggi caratterizzanti la pratica della documentazione architettonica.

60 Cit. Sutherland I.E. (1963). *“Sketchpad. A Man-Machine Graphical Communication System”*. PhD Thesis. Boston, MA: Massachusetts Institute of Technology, p. 102.

61 Cit. Marotta A., De Bernardi M. L., *op. cit.*, p. 45

62 Ibidem

63 Al di là della concezione strettamente analitica del metodo FEM, in termini di risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali, il metodo matematico è supportato da un criterio di scomposizione della forma strutturale in cellule elementari di controllo al contorno, definenti nel loro insieme un pattern di proprietà geometriche applicato all'unità compresa nel continuum. L'approccio analitico ai suoi estremi torna così a concentrare la sua ragione logica su di un processo morfologico che identifica, in termini di conoscenza per la computazione, un controllo di carattere geometrico sulla forma complessa della configurazione reale. Cfr. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2000) *“The Finite Element Method, Volume 1: The Basis”*. 5th Edition. Boston, Oxford: Butterworth-Heinemann. I principi e le conseguenze legati al grado di sintesi ed astrazione applicato tramite la modellazione FEM alla trasposizione della forma strutturale saranno tema di approfondimento nei capitoli seguenti.

64 Più l'automazione è estesa, meno è consapevole il controllo sulla forma trasposta. Il proposito di riapplicabilità comporta una trattazione del problema della complessità formale in termini non specifici, ma generalizzati attraverso comuni fasi di elaborazione, che si trovano ad essere applicate su contesti e scale diverse di oggetto strutturale, dal componente costruttivo al sistema complessivo. Tale approccio comporta così una perdita, non controllata, delle qualità specifiche e singolari dell'imperfezione formale, senza un criterio che ne guidi la consapevolezza di valore sul complessivo quadro formativo. Cfr. Baudrillard J., Nouvel J. (2003). *“Architettura e nulla. Oggetti singolari”*. Milano: Electa. Ed. orig. *“Les objets singuliers: architecture et philosophie”*. Paris: Calmann-Levy, 2000. pp. 53-54

65 Cfr. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, p. 108

66 *“Partire da una base etimologica non è mai sbagliato, anche se poi le parole si evolvono, come il pensiero, e vale la loro ultima accezione non meno della prima. Sembra che l'origine antica, oltre la quale non si risale, sia la sillaba “ster” che ha a che fare con il distendere, disporre in forma aperta, chiara e forse anche ben*

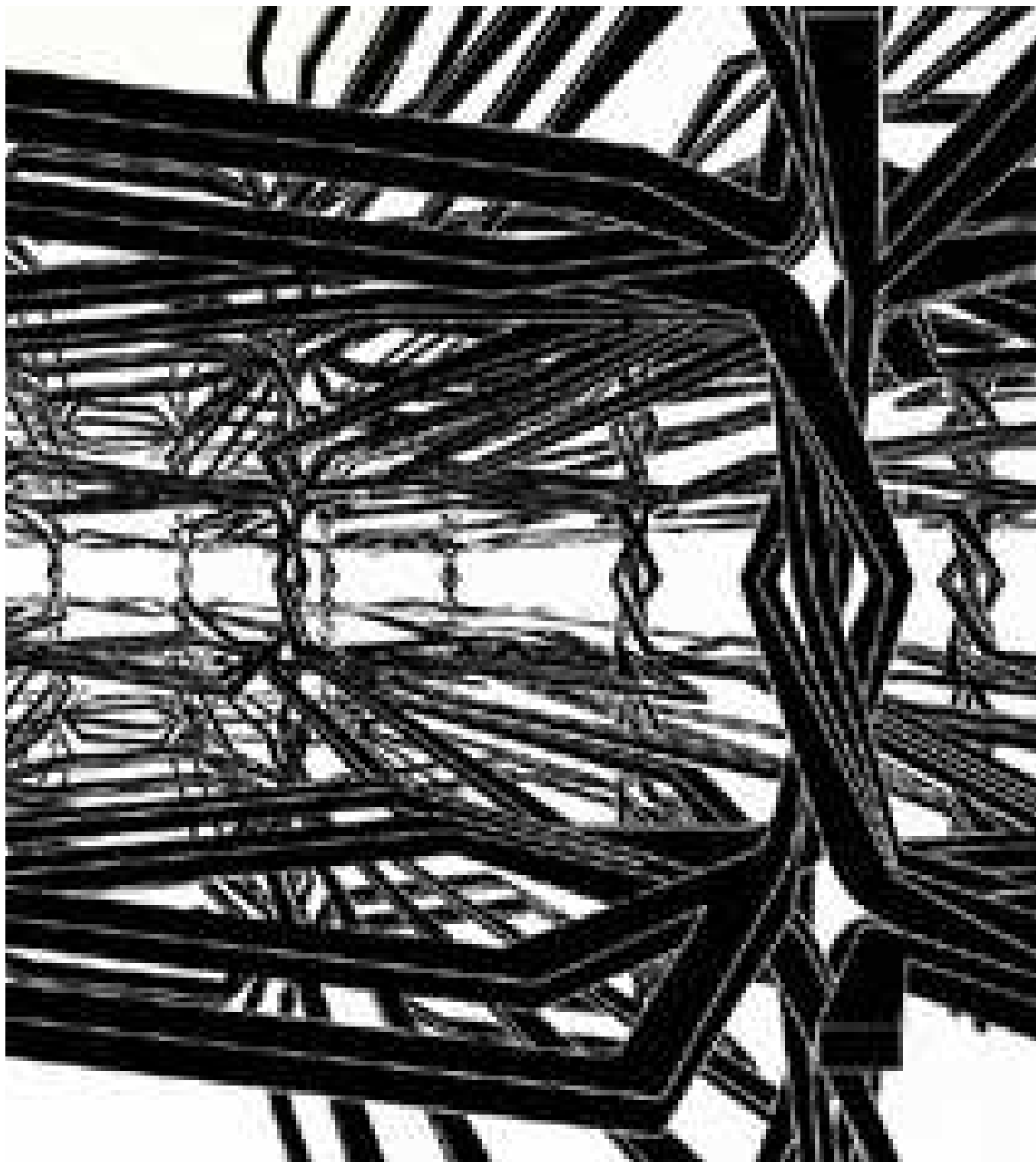
visibile, a strati, ovvero in successione. La "struttura" ne sarebbe il prodotto e la "costruzione" il prodotto ottenuto dall'unione di più strutture. Che questo possa dar luogo sia a disegni che ad oggetti, vale a dire sia a costruzioni grafiche che a costruzioni di fabbricati è immediatamente evidente, perché comprensivo del significato comune di esporre e disporre con chiarezza e ordine. Potrebbe bastare per tacitare il bisogno di un significato comune. Ma complica un po' le cose il fatto che la geometria non abbia come solo fine la costruzione e l'architettura non abbia come sola base la geometria, perciò la constatazione che il termine sia diventato così centrale per entrambi i casi richiede qualche altra considerazione." Cfr. De Rubertis R. (2012) "Memetica della rappresentazione". *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 23-26

67 Cfr. Jay M. (1994) *Downcast Eyes. The Denigration of Vision in Twentieth-Century French Thought*. Berkeley, Los Angeles: University of California Press. Il ruolo che l'osservatore ha svolto nel processo di costruzione e fruizione delle immagini, nel corso dei secoli, ha impostato contestualità e regimi del pensiero filosofico e delle teorie sulla comunicazione visuale. Nel tempo si è assistito a segnali inequivocabili di nuove concezioni della rappresentazione, tanto da spingere le pratiche tradizionali ad esercitare un 'diritto di prelazione' sulla 'integrità' fisica del processo fruitivo dell'immagine. Ogni epoca ha elaborato una personale idea di rappresentazione indissolubilmente legata al suo osservatore, disprezzato o esaltato nella sua capacità di lettura e interpretazione dello spazio e delle immagini che lo restituiscono. I temi odierni della rappresentazione offrono l'occasione di riflettere su quali suoi nuovi scenari si stiano delineando nell'era della rappresentazione digitale, consapevoli che, a partire dagli ultimi due secoli, lo sviluppo di strumenti meccanici – analogici e digitali – di produzione e di riproduzione di immagini ha definito una condizione di 'denigrazione dello sguardo', per il ruolo succedaneo che l'osservatore ha progressivamente assunto rispetto a quei meccanismi. (Riflessione da De Rosa A. (2003), *Apertura del seminario di studi "Lo sguardo denigrato. Ruolo dell'osservatore nell'era della rappresentazione digitale."*)

68 Per una trattazione più approfondita sul cambiamento apportato dalle emergenti tecnologie dell'immagine digitale in termini di manipolazione e sintesi dei prodotti grafici, in particolare di origine fotografica, cfr. Mitchell W.J. (1992) *The Reconfigured Eye: Visual Truth in the Post Photographic Era*. Cambridge: MIT Press.

69 Cit. Amoruso G., *op. cit.*

70 Cit. De Rosa A. (2011), *op. cit.*



CAPITOLO 3

La Forma assegnata: un approccio di analisi tra segno e *mimesis*.

“Il mondo, nel quale gli oggetti ineriscono l’uno all’altro nello stato di cose, è la struttura dello stato di cose.

La forma è la possibilità della struttura.”¹

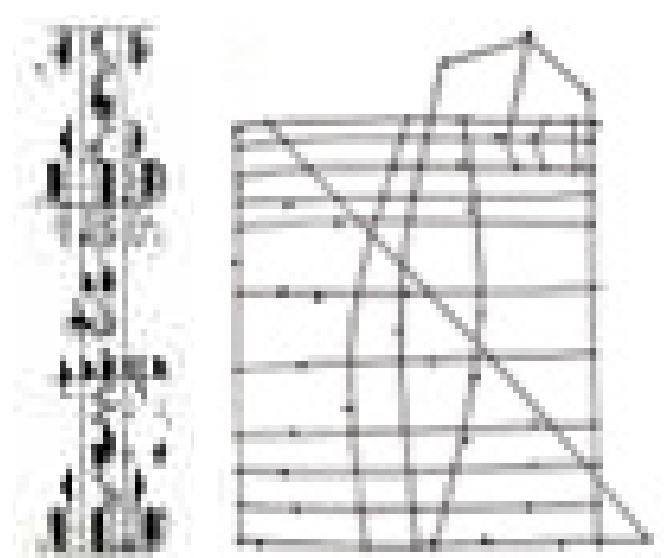
La revisione delle variabili di manipolazione visuale, e dei corrispondenti protocolli grafici applicati alla struttura in architettura, indirizza la ricerca sull’espressione visuale e meccanica dell’oggetto strutturale in termini di entità percettiva. È la percezione ad istituire e concretizzare, nei termini della rappresentazione, un collegamento tra espressione visuale e meccanica osservate sulla struttura, intendendole come sfere di dialogo che adottano un ‘medium’ singolarmente identificato e adeguato alle dichiarate necessità cognitive e comunicative: la Forma².

“We understand shape as a bond between probable relationships, the latter able to draw upon tactical criteria in order to favour a more open correspondence between figuration and concept, between image and movement, between reality and abstraction [...] in direct relationship with the interpretation of the physical, and cultural, contemporary space.”³

L’assunzione della Forma come entità di completa espressione per la combinazione Unità-Limite-Sistema considera quindi l’interrezza del suo duplice significato, come forma sia fisica, generata dalla materia dei corpi, che virtuale, definita dall’immaterialità delle tensioni meccaniche. Forma fisica, in quanto ‘*morphé*’, materialmente percepita nel limite dell’unità come concreto e diretto accesso attraverso i sensi visuali, e forma virtuale, trascendente il mero visibile come ‘*phántasma*’ dei comportamenti statici sistema che lo rendono tangibile dell’esperienza fenomenica⁴.

La riflessione che ne deriva, di ampio panorama e declinazione multidisciplinare⁵, è in tal modo assunta all’interno della ricerca per regolare l’accentramento dei livelli di manipolazione della realtà strutturale in funzione

dell’apparato espressivo morfologico. L’ordine di tali livelli sviluppa una sequenza gerarchica che relaziona struttura e forma sugli assunti di regolazione, identificazione e trasposizione⁶. Il potenziale di esplicitazione della Struttura “in” Forma evidenzia così il ruolo di coordinamento sulla sua identità, assunto come oggetto scientifico di espressione visuale della realtà meccanica, ma anche come generatrice stessa dei caratteri di tensione e sollecitazione statico-dinamica sottoposti al processo di conoscenza.



Sopra (3.1) Esempio di notazione cinematografica Laban per i movimenti del corpo; (3.2) Carta geografica realizzata da tribù indigene, dove gli elementi puntuali (conchiglie) simboleggiano le isole, le linee (bambù) le correnti e i venti prevalenti.

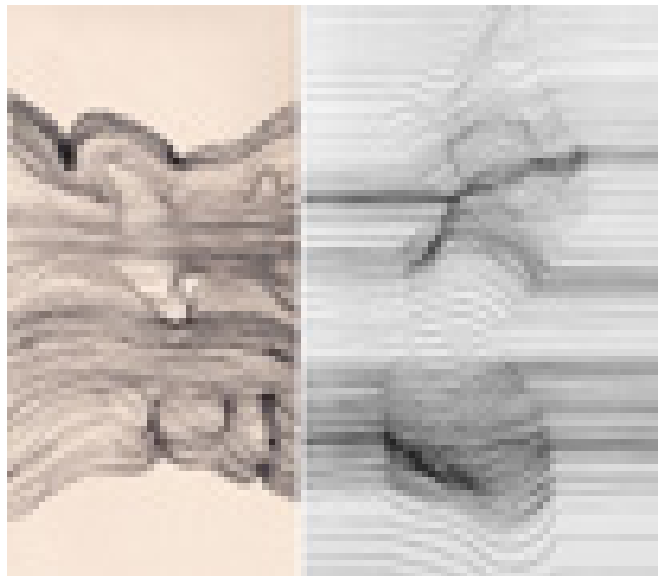
A fianco: Konrad Wachsmann, illustrazione, prospettiva di una struttura di cinque piani formata con modulo di costruzione standard, 1968.

In tal modo, la forma si costituisce attorno e tramite una complessità infinitamente maggiore di elementi e variabili, e tenta di comunicare l'analogia con la realtà fisica dalla quale si origina attraverso la rappresentazione. Ne risulta che *“non soltanto la rappresentazione deve tendere a restituire la forma dell'architettura, non soltanto è produttrice di forma, non soltanto ha una forma o può assumere diverse forme: essa è, essa stessa, una “forma”; e in quanto tale è produttrice di un preciso senso”*.⁷

Mentre l'approccio alla documentazione strutturale tende a sbilanciarsi sul primato della regola matematica, la forma a sua volta si muove verso un sistema simbolico, consacrando un rapporto di armonia teorica fra le sue variabili di manipolazione nella codifica sintetica della superficie esterna e delle proporzioni d'insieme. In tal senso essa si accorda con le proprietà grafiche del sistema statico, la cui pratica nelle analisi numeriche è giunta ad affermare un esempio iterabile di unità formale fissa e riapplicabile (gli elementi *truss* “*beam&column*”), come insieme coerente la cui singolarità è debolmente declinata per non alterare lo schema di base⁸, decretando un assoluto morfologico di regola analitica spesso molto distante dalla realtà.

Il pericolo che l'espressione numerica sia inadeguata all'impressione percettiva, e che perciò semplifichi fino a frenare ed omologare le configurazioni della forma strutturale, rende l'approccio empirico e le formule analitiche simili alla *“carta moschicida, di cui gli sbadati restano vittime”*⁹. La formulazione matematica della meccanica delle strutture rischia così di divenire *“una comoda poltrona”*¹⁰ per l'affermarsi di una *“forma semplice”*, invece di ricercare l'espressione di quel ‘substrato’ capace di penetrare l'anatomia dell'architettura per leggerne la meccanica delle tensioni.

Mentre *“le formule muoiono e vengono sostituite da altre appena nate”*¹¹, l'approccio alla disciplina della forma rimane consolidato nelle ragioni conoscitive e nei principi di manipolazione, sfruttando il linguaggio di comunicazione grafica e lo sviluppo tecnologico dei suoi metodi di percezione e restituzione come premessa per un salto qualitativo dei valori espressivi e di sintesi sull'apparato strutturale. Si conservano in tal modo le ragioni di conoscenza della struttura in funzione dell'interpretazione della sua forma da parte del soggetto percipiente, ricordando che *“non c'è forma senza un creatore di forma.”*¹²



*La definizione di una ‘forma’ legata al senso di ‘struttura’ richiama l’assegnazione di opportuni caratteri visuali. Bidimensionalmente definita come entità a sviluppo monodimensionale, non è dalla sua natura quanto dalla sua applicazione che è possibile derivare la qualità dei suoi prodotti grafici. Può essere controllata e modulata, fino a descrivere virtualmente volumi e figure riconoscibili, o può essere liberamente incontrollata, confluendo in un attrattore visuale con comportamento irregolare ed imprevedibile, proiezione di una traiettoria logicamente non riconoscibile ma matematicamente governata dalle sole funzioni x , y e z .
Sopra (3.3) Composizione di linee per la percezione di volumi; sotto (3.4) C. A. Pickover, Attrattore caotico 3-D. 1995.*



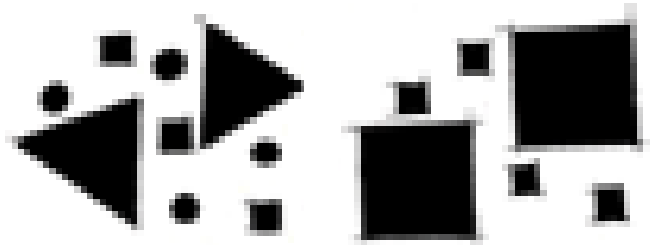
3.1 TEORIE VISUALI E DISVELAMENTO PER LA PERCEZIONE DEL 'SUBSTRATO' FENOMENICO.

La studio della morfologia strutturale richiama un'evoluzione dell'approccio cognitivo alla forma ed alla sua interpretazione come termine di mediazione e connessione tra 'architettura' e 'statica', più in generale tra le sfere di 'realtà' e 'significato'.

Le riflessioni sul tema hanno esplicitato in più riprese un pensiero di disvelamento della realtà fenomenica come Forma attraverso la cristallizzazione di *medium* visibili, a partire dal rapporto tra *ratiocinatio* e *fabrica*¹³ per arrivare alla corrispondenza di *Vorstellung*, come struttura concettuale e formale, e *Darstellung*, anche intesa come 'disegno' in senso di dispositivo grafico di percezione visuale¹⁴. Il tentativo di consolidare un criterio espressivo di *Weltanschauung*¹⁵, ordinata visione del mondo come metodo di conoscenza, è proseguito designando la Forma come mezzo per la produzione di verità a partire dal disvelamento della percezione, un 'dispositivo tecnico' che illustri la struttura come "ciò che non si produce spontaneamente e non è ancora davanti a noi, ciò che può dunque assumere questa o quella forma."¹⁶

Nell'eccessiva fiducia della tecnica di soddisfare tutte le necessità cognitive del "fondo collettivo", operato con l' 'imposizione' della *Ge-stell*¹⁷, si è andata sempre più perdendo quella qualità aristotelica della Forma come necessaria trasposizione dell'entità fenomenica, intrinseca, che trova nella materia la possibilità di estrinsecarsi e manifestarsi.

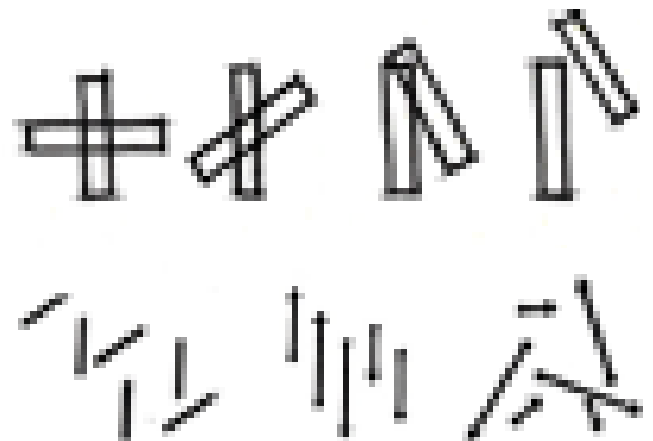
La visualità morfologica dell'apparato resistente indirizza così il problema della rappresentazione di una forma che è processo mnemonico della sua storia statica, e pone nell'elaborazione dell'immagine il problema della relatività dell'informazione trasmessa, tra osservazione diretta e fenomeno interpretato. Una considerazione che ha condotto i prodotti della documentazione strutturale a declinarsi secondo due approcci alternativi: la rappresentazione e verifica della forma rispetto a parametri esterni delle finalità tensionali dell'apparato, o l'orientamento su codici interni che interpretano la struttura attraverso simboli, tematizzazioni e forme



"Somiglianza e segmentazione sono ai poli opposti: mentre la segmentazione è uno dei requisiti della vista, la somiglianza può rendere le cose invisibili [...] Il raggruppamento, o meglio l'unificazione per somiglianza, avviene nel tempo oltre che nello spazio. Per dimostrare la somiglianza indipendentemente da altri fattori, bisogna scegliere i pattern dove l'influenza della struttura globale è debole, o almeno non agisce direttamente sulla particolare regola dell'unificazione formale che si vuole dimostrare." (Arnheim 1954, pp. 80-81)

Forma, orientamento spaziale e chiarezza legano le entità di modulazione della superficie. L'orientamento spaziale in particolare introduce i concetti di 'direzione' e 'velocità', anche intesa come 'densità' nella distanza di passaggio da un'entità all'altra. Nella semplicità dell'intero in relazione alle parti è così possibile studiare la relazione tra forme e variazioni nelle loro combinazioni, come indipendenza e connessione con il campo circostante.

Rudolf Arnheim, studio di manipolazioni formali per (3.5) Somiglianza, (3.6) Suddivisione, (3.7) Orientamento, 1954.



standardizzate¹⁸. Nel secondo caso, alla possibilità di una forma 'entelechica'¹⁹, perenne fonte interiore di attività dinamica della materia, è sostituita la variante di una morfologia compatta, dall'iconicità sintetica combinata per addizione, accostamento e frazionamento di parti costituenti geometricamente regolarizzate²⁰.

*“Ne risulta la trasposizione di una forma strutturale intesa come semplice somma di parti, riconducibili agli elementi semantici dell'apparato strutturale in maniera associazionistica, perdendo quell'entità organico-unitaria da cui le parti non sono separabili per una loro vita autonoma senza modificare e distruggere, anzi, l'entità stessa, cioè la struttura”*²¹.

Il concetto di Forma è così cognitivamente riabilitato ricongiungendo una 'forma della funzione', predominante la rappresentazione attuale, ad una tralasciata 'forma dell'espressione', ricollocando la centralità delle variabili morfologiche come primarie caratteristiche di interazione

alla configurazione strutturale, dimostrando e prevedendo la statica dei corpi nella sua natura di informazione sia come segno che in qualità calcolo. *“La forma risulta allora istantanea e consecutiva, diretta e indiretta (mediata), istintiva e riflessiva (meditata), parziale e totale, libera e concatenata”*²², prestandosi a misurare e rappresentare realtà spaziali e strutturali con una congruenza di gran lunga maggiore di quella dei modelli analitici.

La precisione nel dettaglio e nell'imperfezione formale diviene un'esigenza epistemologica, indissolubilmente legata alla matematizzazione regolata del mondo fisico che ha nella misura puntuale e densa il più incisivo strumento critico e di verifica²³. La coerenza e costanza di una forma

Mimesis e minimalismo di rappresentazione.

(3.8) Albrecht Dürer, La grande zolla erbosa, 1503; (3.9) Li K'An, Bambù, Dinastia Yuan (1260-1368).

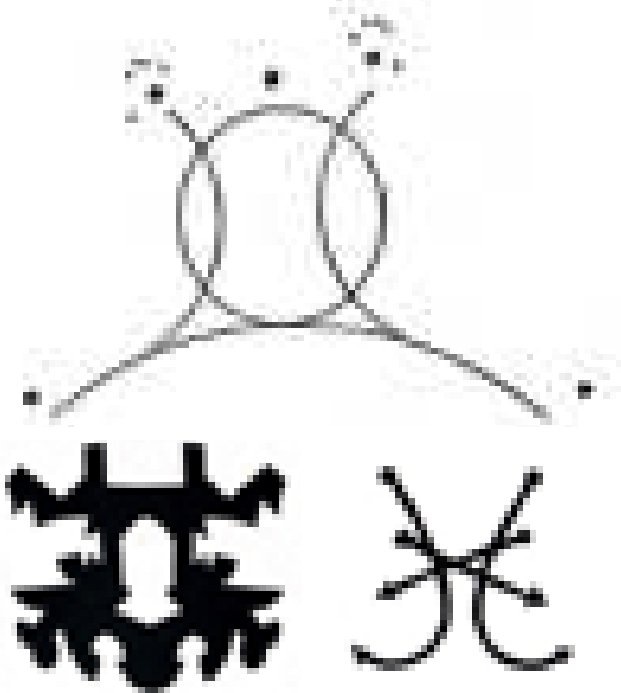




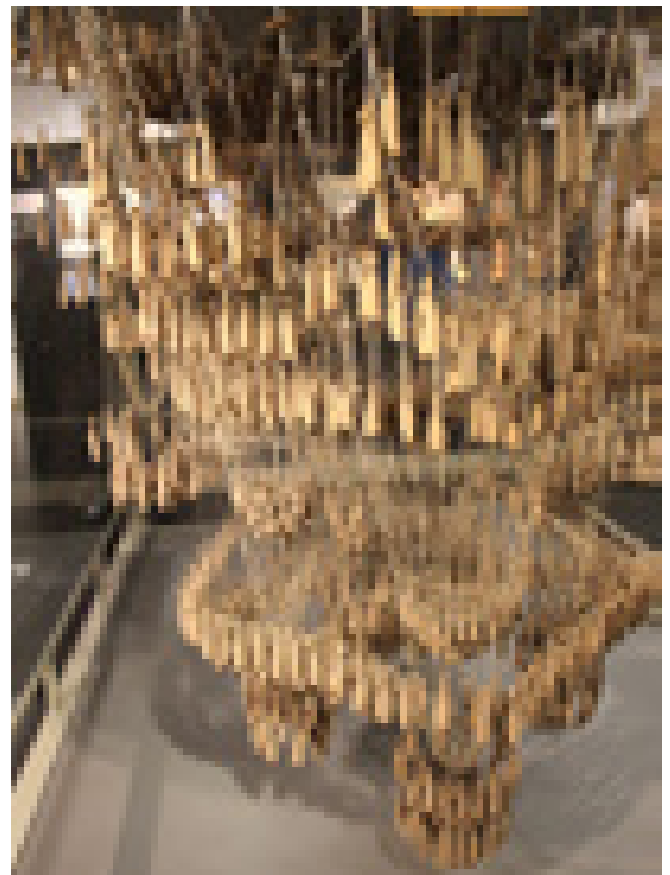
“Nella plastica e nell’architettura, il punto è il risultato dall’intersezioni di più superfici, il nucleo da cui nascono queste superfici. Le superfici debbono volgersi verso il punto e dal punto svilupparsi.”
(Kandinsky 1968, p. 37)

Sono le forze esterne, agenti sul punto, a trasformare il punto in linea. Dal numero di queste forze e dalle loro combinazioni, dipende la diversità delle linee. Una volta definiti punti e forze, dalla loro caratterizzazione scaturisce la superficie.

Dall’alto: Wassily Kandinsky (3.10) un salto della danzatrice Palucca, e (3.11) il suo schema; Arnheim (3.12) simmetria e movimento di danzatori; Antoni Gaudì (3.13) catenarie in tensione per lo schema strutturale.



dal carattere ‘modale’ è così chiamata a garantire una continuità quantitativa e qualitativa di dati conosciuti, mantenuta indipendentemente dalla scala di osservazione e trasposizione, organizzando un’iterativa ed omogenea distribuzione delle unità di modellazione e declinando la loro composizione alla descrizione dell’*unicum* strutturale. La disposizione dell’immagine ‘modale’ diviene così ‘composta’, formulata sulla componente visiva ma risultato di una percezione sostanzialmente intellettuale, e la necessità di procedere con una modellazione astratta si aggrappa ad un approccio di scomposizione per definire e caratterizzare ciascuna delle componenti. L’immagine come struttura visibile in configurazione modale e la forma come espressione percettiva del dettaglio riassumono la consistenza spaziale e storica della struttura architettonica, e si declinano in suddivisioni grafico-spaziali e modulazioni geometriche per giungere alla configurazione di specifici prodotti descrittivi.

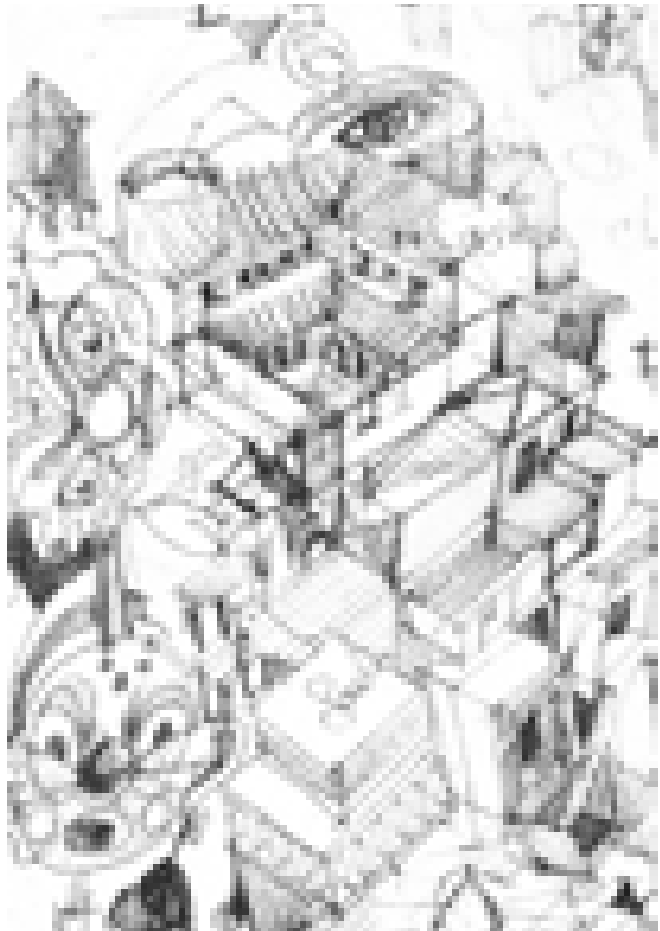


3.2 LA SUPERFICIE MORFOLOGICA COME ESITO FORMALE DELLA STATICA STRUTTURALE.

“La forma non è il tutto della percezione, ma un tutto delimitato.”²⁴

La declinazione della forma in termini strutturali individua un oggetto complesso che risente di modalità di esistenza della materia sia temporale che fisica. Tali modalità risiedono in primo luogo nella *tékhnè* che ne ha orientato la genesi²⁵, e sono successivamente implementate in funzione di fattori e variabili di carattere storico e funzionale, accidentali o di azione antropica. La struttura avvia così la propria forma impostando un sistema tettonico, sintattico, che riveste e finalizza il contenuto materico e di articolazione raccogliendolo nel dominio visibile dell'unità. Così l'unità non si qualifica in soli termini percettivi del limite costitutivo, ma approfondisce il dettaglio morfologico esterno come espressione sensibile dei suoi caratteri di influenza, tra i quali *“l'assunzione materica è appena un fattore”²⁶*.

La costituzione della forma dell'apparato strutturale diviene in tal modo un'azione 'a priori', che dalla connessione dei componenti meccanici sviluppa la modellazione di una 'pelle' morfologica, quale risultato di limite della composizione, della loro plasticità, delle relazioni interne, delle configurazioni contestuali e persino della loro materialità. La sua conformazione particolare, appartenente al campo delle possibilità statiche e dell'imperfetto materico, classifica la forma dell'involucro strutturale tramite un metodo di composizione poligonale, a sua volta soggetto ad un processo di modifica sulle variabili dell'esperienza fisica da potenze in astratto ed in divenire. La traduzione tecnica e statica della forma si concretizza in un atto non più tettonico ma di involuppo, concentrando l'espressione tensionale e deformativa della struttura nella morfologia della sua superficie al contorno²⁷. L'identità della superficie di involuppo della struttura,

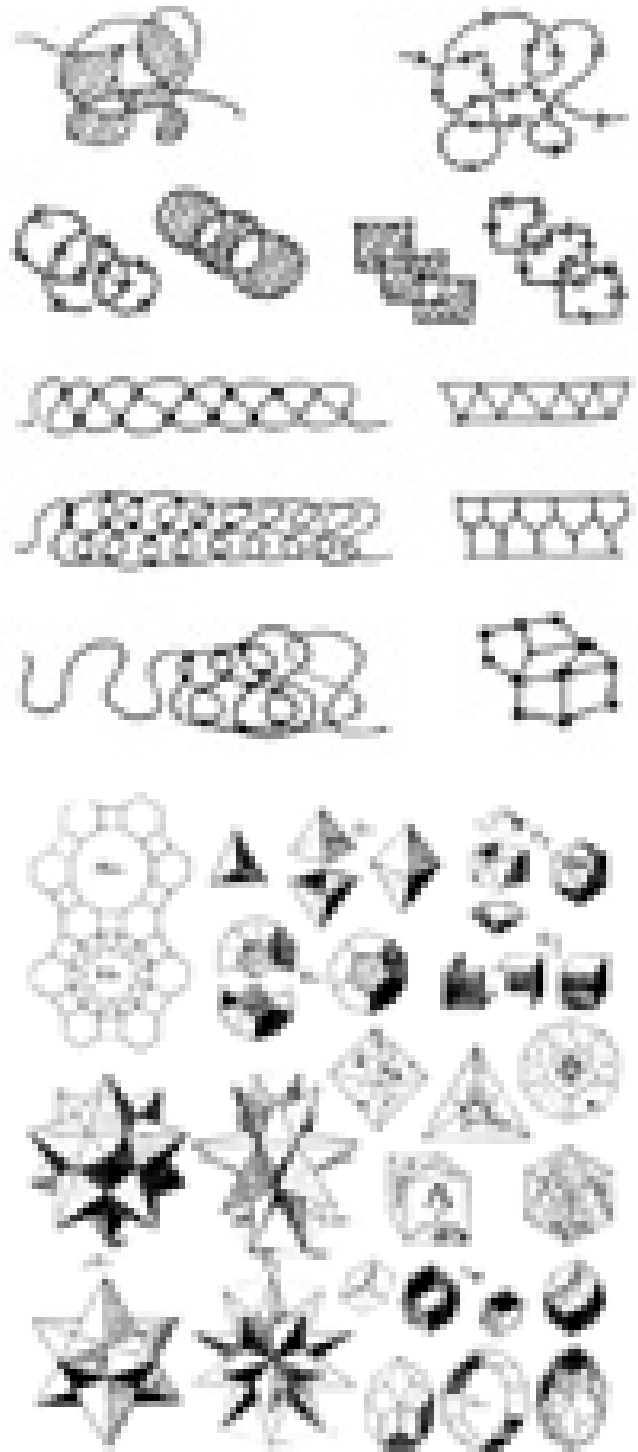


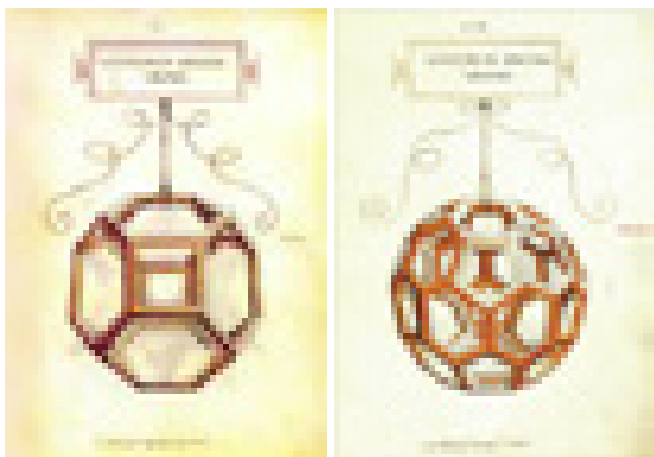
(3.14) Sandro Parrinello, *strutture di pensiero*, 2019. In modo spontaneo ed intuitivo, gli schizzi eseguiti quasi inconsciamente mentre si parla al telefono tentano di dare una struttura di linguaggio grafico ai pensieri in corso, astratta e materialmente incoerente all'ordine fisico della realtà eppur dotata di significato.

pur conformata in cellule unitarie e soluzioni di connessione, relaziona la molteplicità di forme ad una forza organizzativa appartenente alla *Gestalt*, derivandone l'*unicum* di una forma 'integrale'. In tal modo, l'espressione comportamentale non è più determinata direttamente dalla somma fenomenica dei singoli elementi o parti che compongono la struttura, ma è comunicata attraverso un'entità superficiale correlata e interdependente all'insieme. La superficie di involuppo viene legata all'equilibrio delle variabili di manipolazione plastica intrinseche ed estrinseche di unità, limite e sistema, e riscontra coerenza descrittiva fra l'organizzazione della forma dell'unità e la tensione espressa dal sistema statico. "Volendo, semmai, è possibile distinguere una forma atta prevalentemente all'uso interno [...] e una forma atta prevalentemente all'uso esterno [...], l'una e l'altra, però, concepibili in un unicum poliedrico cui concorrono anche elementi di natura statica e materica."²⁸ La superficie morfologica visiva non rappresenta così solo l'aspetto estetico della struttura, ma è anche un'intuizione e una raffigurazione dei legami interni delle parti costituenti l'oggetto, che ne rendono possibile il riconoscimento. Ne consegue che l'essenza della forma per l'analisi degli equilibri meccanici non è soltanto nella costruzione dello spazio e nell'uso della materia, figurale o ideale, ma può essere rappresentata dall'inviluppo singolare di una superficie speculativa, logica e dinamica, che genera un assunto morfologico per la quale, in termini sia cognitivi che analitici, la struttura si configura come un tutto.

Lo stesso concetto si ritrova alla base del processo di sviluppo di un modulo geometrico, come atto forzato di ordine e struttura dello spazio attraverso il rapporto tra punto (vertici) e linea (spigoli). Dai tentativi di suddivisione, collegamento, partizione e rapporto tra spazio e segno grafico, già orientato verso una continuità assimilabile all'inviluppo del tratto, si originano soluzioni signiche capaci non solo di definire una qualità visuale dello spazio ma anche di dotarla di un significato, di una struttura della sua realtà oltre il segno.

Dall'alto: (3.15) Cecile Balmond, Pattern come linea generativa che si ripiega su se stessa sintetizzando diverse situazioni strutturali. (3.16) Johannes Kepler, poliedri dalla modulazione geometrica della spazio, XVI secolo.



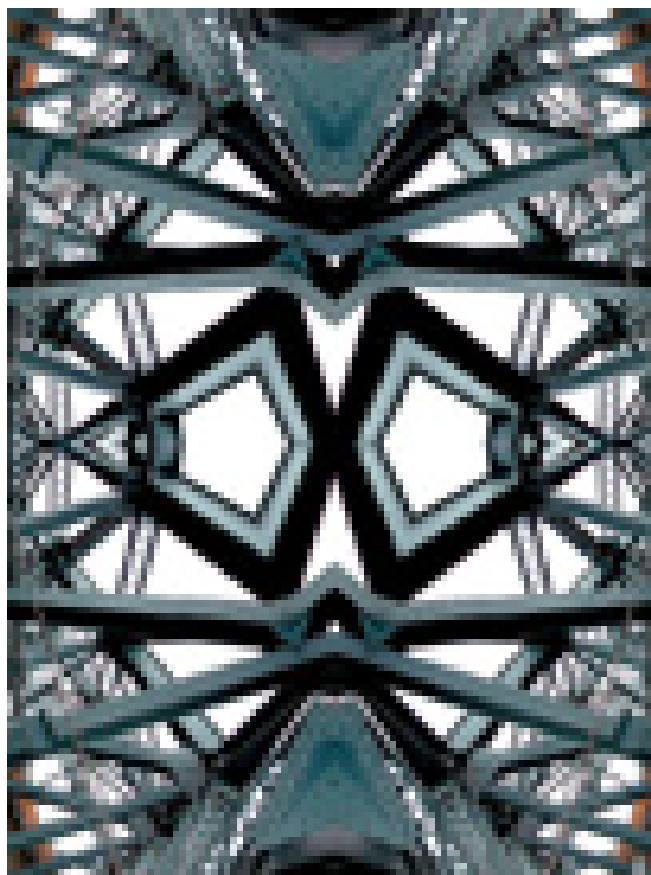
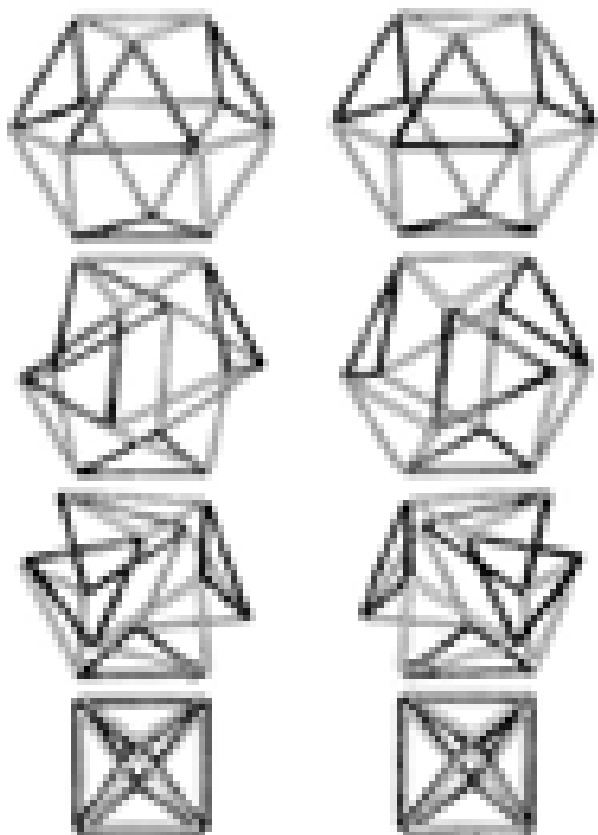


Strutture geometriche di controllo spaziale

(3.17) Leonardo da Vinci, *Ycocedron abscisus solidus e Septuaginta duarum basium vacum, solidi platonici*, dal *De Divina proportione* di Luca Pacioli, 1509; (3.18) Buckminster Fuller, *Jitterbug*, trasformazioni geometriche di un cubottaedro di aste rigide e vertici flessibili; (3.19) struttura caleidoscopica di travature in acciaio.

La forma, quindi, viene condensata nella pelle strutturale quale oggetto di studio unitario, fisico e costitutivo, risultato diretto di stimoli comportamentali suscitati dalla relazione posizionale e dimensionale sia degli elementi costitutivi e della loro unità, che della struttura stessa nei confronti delle sue condizioni di campo.

*“Shape is disposition. Stimulatory resolution, or decision. Spatial-temporal distribution, or deployment. And extrovert attitude, or will, vis-à-vis reality. Shape is capable of expressing, and communicate, the interior movements, logics and tensions, that configure it (its topology) and of reacting and mutating in response to the demands of exterior stimuli.”*²⁹



3.3 MANIPOLAZIONI DI ATRAZIONE DELLA FORMA PER LA CONFIGURAZIONE DELLA SUPERFICIE RESISTENTE.

Se l'imprecisione della forma, dalla configurazione materica delle strutture storiche, tenta di essere elusa dal rischio di intersezione interna e contraddizione tecnica con un approccio cognitivo mantenuto al contorno della superficie di involuppo, al contempo la variazione indefinita degli schemi di forma 'minima' rischia di giungere ad un'estrema innaturalità di astrazione. La trasposizione in forme astratte trova così forza e profondità con il supporto del criterio razionale e del metodo geometrico in un'inevitabile schematizzazione e, con l'aiuto delle pratiche di misurazione ed osservazione scientifica, le variabili di forma vengono semplificate ed elaborate in termini geometrici di ragione fisica, rendendo l'espressione numerica inevitabile.

Il processo rappresentativo della struttura architettonica deve prendere quindi avvio proprio dalla selezione critica della sua componente formale ermeneutica³⁰, schierando un metodo di composizione dell'immagine declinabile in 'campi di possibilità' che colui che opera sulla rappresentazione morfologica può selezionare, densificare o sintetizzare, giostrandosi tra mimesi ed astrazione per mantenere, oltrepassare, forzare o modificare la superficie di involuppo all'interno dei suoi limiti stessi.

Il significato tensionale e dei rapporti visibili della forma strutturale, data dalla superficie di contorno, indirizza ad una determinazione dei gradi di dettaglio e semplificazione applicabili nella rappresentazione del suo involuppo. Se la percezione, in sé assai semplice, può giungere ad esprimere configurazioni morfologiche complesse, a volte

"A sign-system cannot be analysed without a strict demarcation of its limits. [...] Although movement introduces only one additional variable; it so dominates perception that it severely limits the attention which can be given to the meaning of the other variables. Furthermore, it is almost certain that the real time is not quantitative; it is 'elastic'."

(3.20) Jacques Bertin, *Variabili visuali per il controllo dell'elaborazione signica dell'immagine: dimensione, valore, texture, colore, orientamento e forma*, da *Semiology of Graphics*, 1967.

in contraddizione tra la forma trasposta e la variabile statica che si vorrebbe comunicasse, è vero che anche la discrepanza tra un significato complesso e una forma semplice impedisce l'efficacia della comunicazione meccanica affidata al disegno della struttura.

La forma 'efficace' della struttura, per la sua documentazione e analisi, risulta così discutibile attraverso le ragioni del conseguimento di gradi di astrazione o aderenza per le sue configurazioni spaziali essenziali³¹, semplici ma anche di natura composta. In tal modo l'aspirazione a adeguate forme 'minime' di modulazione della superficie accresce la possibilità di coordinamento dei componenti formali assieme ai corrispondenti processi fisici, producendo unità visive identificabili ed univocamente manipolabili, indipendenti nella loro tassonomia di analisi ma raggruppate nella conoscenza dell'unità dal contorno strutturale.

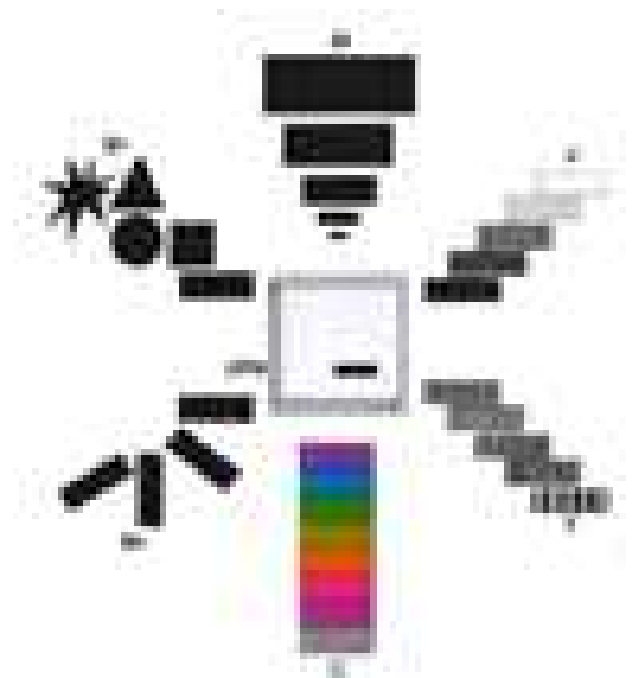
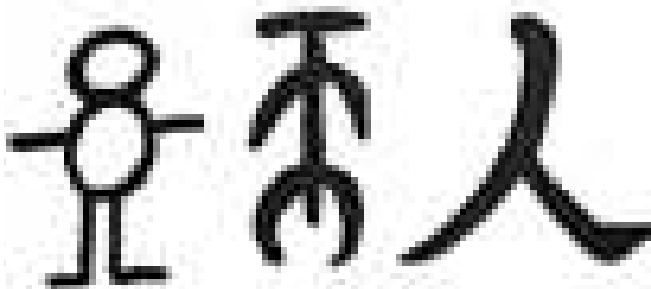




Figura Umana, dalla mimesi all'astrazione: (3.21) Pierre-August Renoir; 1874; (3.22) Torii Kiyotada, 1723-1750.



(3.23) teatro d'ombre egiziano; (3.24) raffigurazione maya; (3.25) disegno infantile; (3.26) pittogramma rupestre delle caverne mesolitiche; (3.27) ideogramma cinese "uomo".



3.3.1. L'assetto delle variabili, tra iconicità e segno.

L'idea della scomponibilità della raffigurazione della forma in un fascio di variabili, sistematicamente manipolabili da un massimo ad un minimo di interazione astrattiva rispetto al loro effetto sul contenuto semantico, richiama i concetti di 'somiglianza primaria' e di 'segno iconico'³². La prima per relazionare i caratteri di paragone del riferimento alla forma di somiglianza, il secondo come classe di valori di sintesi grafica sulla quale giudicare la somiglianza formale stessa³³. In tal modo, l'atto di rappresentazione non si limita alla produzione di immagini e figure, ma si confronta anche con il problema del rinvio del segno e della sua legittimità nella rappresentazione.

Le rappresentazioni schematiche nascono da un'operazione di tassonomia, con la suddivisione delle caratteristiche formali di trasposizione in sottogruppi di variabili, poi convergenti in tratti essenziali del linguaggio espressivo e grafico. Questi raggruppamenti sono ordinati secondo un criterio unificante individuato nell'asse oppositivo iconico-astratto, generando una 'scala di iconicità'³⁴. Tale scala fissa i suoi estremi ponendo al primo posto (per l'alto grado d'iconicità che riveste) l'oggetto reale stesso, mentre colloca all'estremo opposto la parola che designa l'oggetto, considerandola come il più alto grado di astrazione. In posizione intermedia, è collocata una serie di valori controbilanciati al tempo stesso tra iconicità decrescente ed astrazione crescente, tra i quali figurano campi come forma, dimensione, orientamento, valore, grana, colore³⁵.

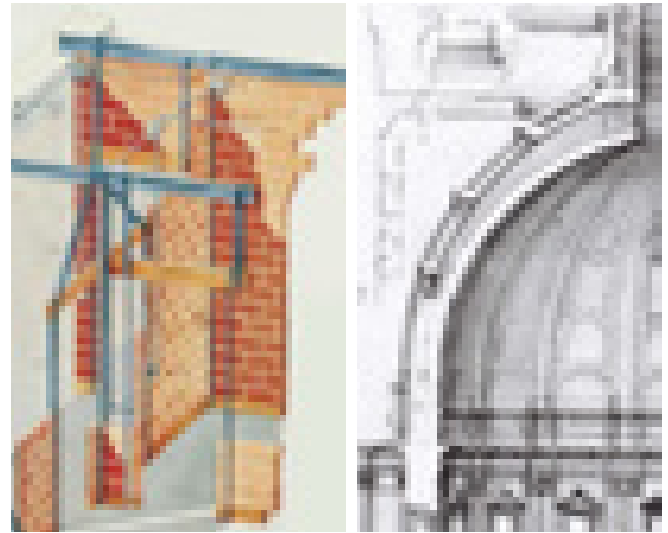
Per la figura umana, dalla più complessa mimesi al segno è raggiunta una forma di rappresentazione che rassomiglia da vicino, nella 'struttura', all'immagine normale che ci si crea nella mente.

"Questa immagine normale serve da 'nota fondamentale' nella sovrapposizione, che implica una duplice deviazione dallo schema base. [...] Questa trasformazione è inevitabile ogni qualvolta l'artista desidera presentare qualcosa di più della semplice esistenza d'un oggetto nel suo permanere. In secondo luogo il corpo è soggetto alla deformazione risultante dalla sua proiezione sopra una superficie; è appunto questa trasformazione a richiedere una giustificazione un po' più dettagliata." (Arnheim 1954, p. 112)

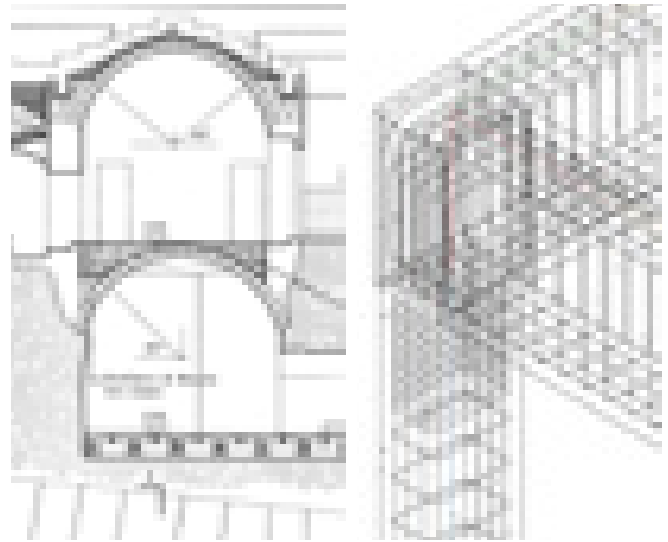
Il procedimento di manipolazione della superficie formale può così avvenire, attraverso la manipolazione di tali valori, con un progressivo aumento del grado di astrazione e un conseguente decremento del livello di iconicità, ma anche di un progressivo aumento del grado di istituzionalizzazione, cioè di normatività convenzionale, al quale associare un progressivo decremento della immediatezza interpretativa, anche letto come un progressivo aumento della dipendenza dal contesto³⁶.

Il numero aleatorio di tali variabili concorda in modo costante sull'inclusione di 'forma', 'direzione' e 'collocazione' relazionale come valori fissi di comunicazione e manipolazione della struttura percepita. A loro volta, essi possono detagliarsi e caratterizzarsi nelle qualità di posizione spaziale, impianto (modalità di posizionamento) e variabile retinica (proprietà visuale), definendosi come caratteri fondamentali atti all'istituzione della forma 'semplice' ricercata.

Tra gli ultimi stadi, i più astratti, è infine collocata la 'semplificazione al tratto', adottata in modo lineare e ridotta all'essenzialità della linea di contorno, il cui isolamento automatizza l'effetto di semplificazione³⁷. Fino a questo grado di schematizzazione, è ancora possibile parlare di un aspetto, di una componente iconica della rappresentazione³⁸. Oltre a questo, rimane l' 'astrazione', dove l'oggetto è rappresentato tramite segni, sistemi di segni e regole di combinazione totalmente convenzionali, come nel linguaggio di formulazione matematica.



(3.28) Carlo Formenti, 1895; (3.29) Carlo Fontana, 1964.



(3.30) Codice di pratica di Matera, 1980; (3.31) progetto di armatura per trane in cemento armato, 2001. (3.32) Schema modulare per struttura iperstatica, 2019.

Analogamente, anche nella pratica del disegno strutturale è possibile riscontrare un progressivo percorso grafico di cambiamento delle soluzioni tecniche di rappresentazione, dalla verosimiglianza dei manuali edilizi alla maggiore praticità del figurato e del tratto per elaborati tecnici e schemi di progetto delle componenti resistenti.

Lo stadio signico è raggiunto quando la struttura perde le caratteristiche formali che le sono proprie dalla costituzione materica e conserva solo la configurazione fisica di monodimensionalità elastico-plastica. La dimensione fisico-fenomenica del contesto di calcolo è massima, la contestualizzazione alla specifica forma reale invece è assente.



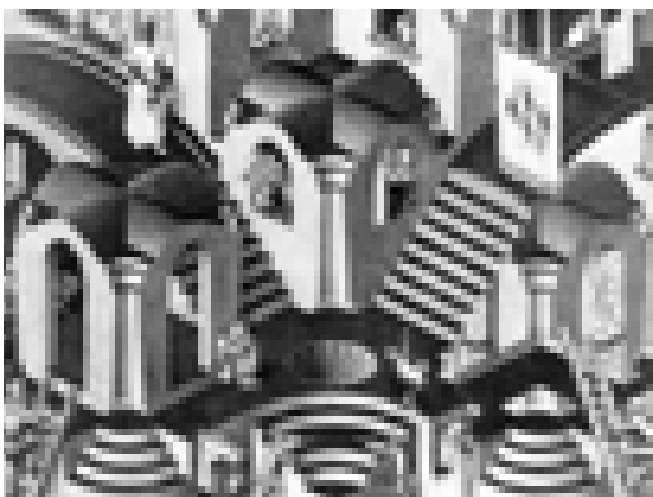
3.3.2. Il conseguimento della 'forma semplice'.

Per una rappresentazione della struttura come 'disegno costruttivo', con funzione comunicativa, analitica e operativa, l'atto di schematizzazione non può prescindere dalla matrice di impostazione geometrica, irrinunciabile per una forma normalizzata con un vocabolario di unità e regole di combinazione che colleghino il segno alla maglia complessiva della superficie, e da essa al suo significato meccanico.

L'orientamento verso una teoria di 'analoghi figurali'³⁹ è impostato su forme superficiali controllabili con variabili parametriche, le quali caratterizzano le scelte grafiche in funzione dei livelli di astrazione del disegno. Dalla totale figuratività delle repliche alle forme non mimetiche, si collocano a metà strada i gradi combinati di stilizzazione della struttura. La corrispondenza a livelli di astrazione formale permette inoltre di classificare l'oggetto della rappresentazione in termini di *clustering* (sola forma e localizzazione), *topological* (connessione relativa tra le forme) e *metric* (occupazione metrica dello spazio euclideo da parte della forma)⁴⁰. Tale processo enfatizza le possibilità di gestione della complessità formale in entità che operino una separazione di tratti distintivi, dove l'unità espressiva, per quanto segmentabile e articolabile, consegue infine una visione integrale correlata al proprio contenuto fenomenico.

Si conferma così un'idea di manipolazione e gestione della forma attraverso componenti geometriche libere collegate tramite soluzioni di connessione, costituendo uno schema visuale rappresentato da campi, porzioni ed entità dove il disegnatore ha un'idea morfologica precisa sia delle singole cellule, nella loro regolarità individuale, che della superficie di involuppo finale, dove la cognizione del sistema unitario è consolidata. Si intendono sistemi di segni che in base alla loro struttura interna sono in primo luogo e soprattutto figure 'semplici', usate a loro volta per la costruzione di moduli formali⁴¹. L'idea di copia è quindi abbandonata a favore di quella di rappresentazione, e l'applicazione di manipolazioni morfologiche, relazionate con il modo in cui la struttura è modellata in superficie, portano a raffigurazioni identitariamente morfologiche e, solo secondariamente, di aspetto visuale.

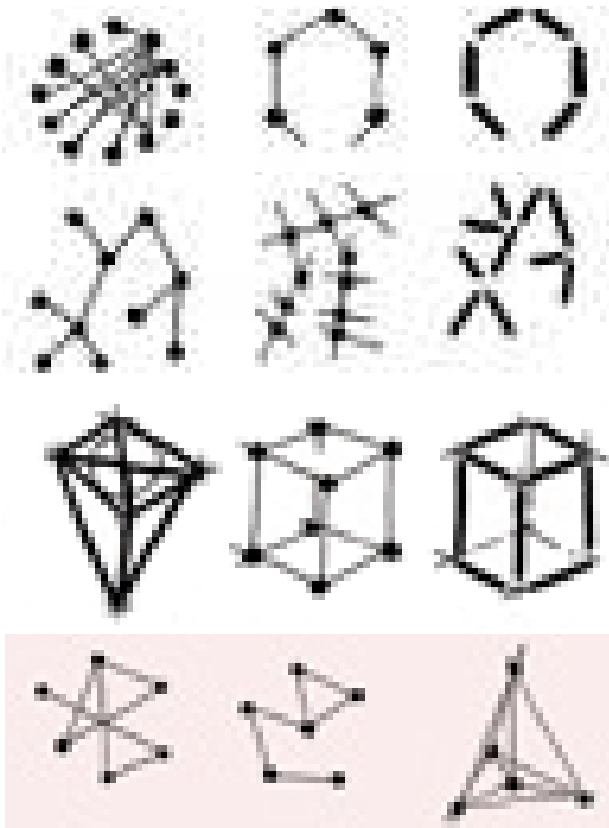
La semplicità della forma vuole essere quindi intesa in una corrispondenza strutturata tra *pattern* tangibile ed il suo significato di modulazione⁴² tra struttura reale e sua rappresentazione. Per quanto le pratiche attuali di disegno rivelino un'azione volta alla riduzione della quantità di caratteristiche visive strutturali, la semplificazione di tale *pattern* può comunque risolversi nella manipolazione di moduli geometrici dalla struttura signfica più semplice. La scomposizione della superficie formale in *pattern* caratteristici è solo un principio di avvio che orienta il



La ricerca di forme semplici per la descrizione della struttura è applicata non solo in termini 'figurati' dei singoli moduli, ma anche riguardo le relazioni fisiche che tali moduli possono instaurare.

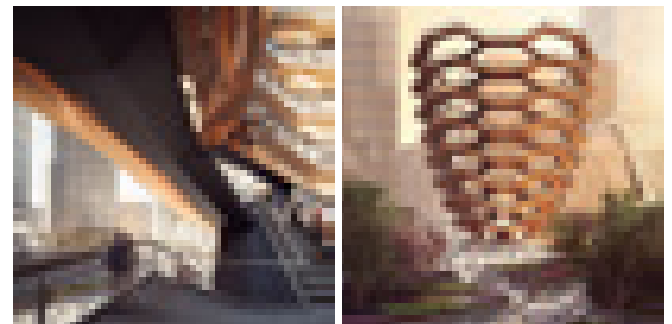
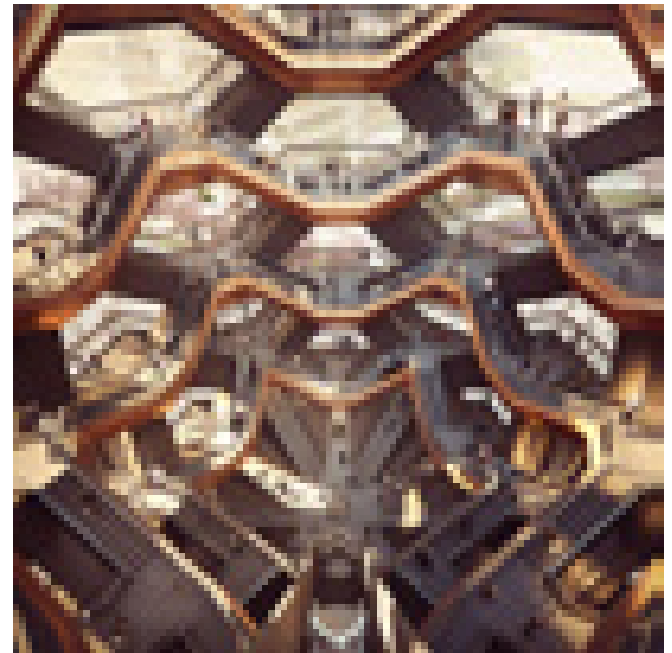
M. C. Escher: (3.33) *Convesso e concavo*, 1955; (3.34) *Relatività*, 1953.





“When the correspondences can be established among all the elements of the same component, the graphic is a network. The net, pertinent information systems from the ‘observed correspondences’, which must trace the ‘simplest and most efficient image possible’. Accordingly, each set of information poses a particular problem and entails a process of construction which distinguishes a network from a diagram. [...] In a network, one can plot the figures on a plane which has no meaning, and then look for the arrangement which produces the minimum number of intersections, or the simplest figure. After this transformation, the graphic will yield maximum efficiency, based on the discovery of a meaningful order. In a network, the size of the points, the length and width of the lines, the size and shape of the areas, theoretically have no meaning on the plane. Their presence merely signifies presence.” (J. Bertin)

(3.35) Jacques Bertin, *relazioni di impianto ed imposizione*, da *Semiology of Graphics*, 1967; (3.36) Thomas Heatherwick, *Vessel (TKA) structure*, Hudson Yards Redevelopment Project, Manhattan, 2019.

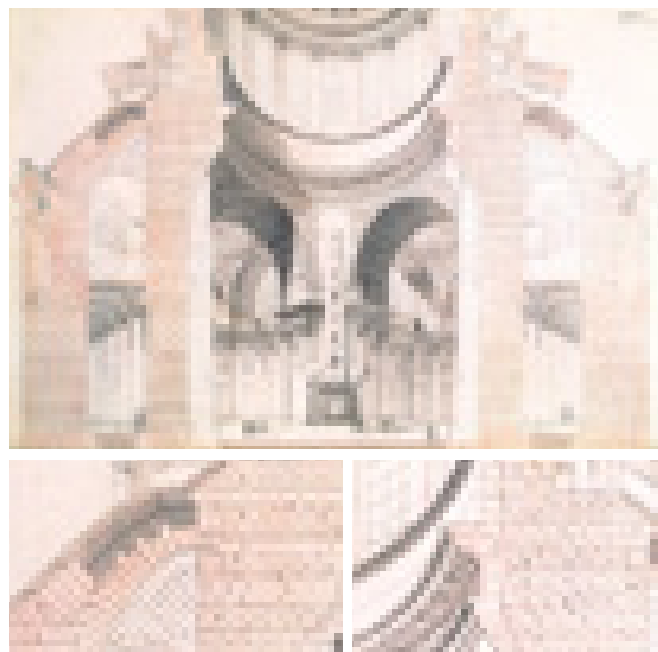


metodo grafico ad un accrescimento dinamico ma strutturato della trasposizione del significato meccanico, permettendo di raggiungere con un essenzialismo geometrico di base anche la composizione di configurazioni più complesse. Tali *pattern* sono intesi in perfetta proporzione di forza fra l'intero e le parti, così che l'unità prevalga senza correre il rischio di una frattura, mentre le parti conservano comunque autonomia di rappresentazione. Alla pari, l'applicazione del *pattern* non prevede ambiguità, configurando la superficie strutturale in un involuppo unico di semplificazione della sua tettonica. La duplice tendenza possibile al 'livellamento' e all' 'accentuazione'⁴³ del *pattern* è mantenuta nella sua libera possibilità di declinazione per la funzionalità di lettura della struttura percepita. Il livellamento si risolve con l'unificazione, riduzione delle caratteristiche di forma strutturale, l'omissione di particolari insignificanti, l'eliminazione dell'obliquità. L'accentuazione invece porta all'accrescimento delle differenze e delle tensioni inerenti il *pattern* visivo, e significative della corrispondenza meccanica.

3.4. Sviluppi e frontiere di mimetica ed astrazione, per una declinazione formale del disegno.

“La semplificazione della forma impoverirebbe la comunicazione, per non parlare dell’impoverimento del mondo visivo.”⁴⁴

L'ampia variabilità dei gradi di manipolazione e livelli di sintesi della forma strutturale dimostra l'estrema complessità di significato e di senso legata alla sua nozione, elaborazione e seguente trasposizione in immagine, con la volontà di tradurre molteplici sfumature del suo carattere visuale. In particolare, il connubio più evidente risiede nel confronto tra la sua declinazione mimetica, di aderenza al reale, e la variazione schematica, di sintesi critica, valutate specificatamente nella richiesta di attinenza del prodotto della rappresentazione alla descrizione dell'apparato strutturale.



(3.37) Alexandre Théodore Brongniart, cupola del Pantheon, sezione e disegno del dettaglio strutturale interno, 1790-1813.

3.4.1. Strutturare la forma tra *mimesis* e *skhêma*.

Il carattere di *mimesis* consolida una definizione di forma che la rende riconoscibile quale elaborazione della struttura in termini di imitazione⁴⁵, riprodotte in modo fedele la fonte reale attraverso le caratteristiche comunicative di un'immagine aderente. Nonostante la derivazione diretta del significato culturale della 'rappresentazione' (*miméomai*), la forma che maggiormente interessa oggi il disegno in relazione al campo scientifico dell'indagine strutturale è lo *skhêma*. Questo è riferito all'organizzazione dell'entità percepita secondo le specifiche proprietà e tratti essenziali che la individuano compiutamente, sintetizzandone ma anche focalizzandone la dimensione comunicativa. Un approccio di manipolazione della forma, dall'osservazione degli apparati strutturali storici, che si è sviluppato legando sempre di più il concetto di schema alla parallela trasposizione nella sfera matematica, dove è applicato per generalizzare con una gerarchia simbolica l'espressione sintetica di un'ampia variabilità geometrico-algebrica, quale spettro di unità spaziali prime e componenti commutative⁴⁶.

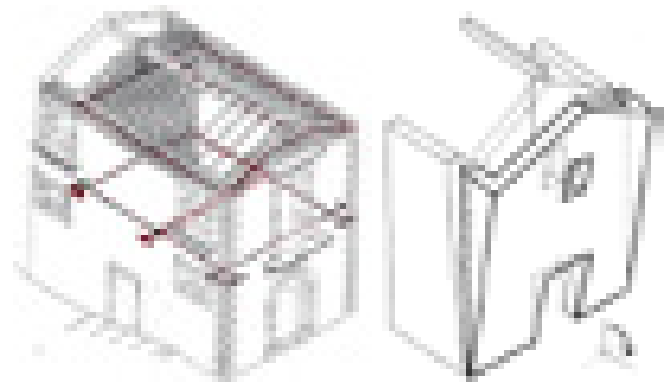
La pratica grafica legata alla rappresentazione dell'apparato strutturale ha alternato nel corso della storia la declinazione dei suoi prodotti tra le due differenti configurazioni, partendo da una situazione mediata (le figure allegoriche di Honnecourt e le geometrie resistenti del Rinascimento) per poi svilupparsi in modo sbilanciato prima verso l'aderenza di perfetta mimesi (i moduli scientifico-costruttivi di Durand e Rondelet) e successivamente su una estremizzante schematizzazione degli apparati (riconoscibile nel disegno info-grafico ed autografico dei progettisti contemporanei). La ricerca di

un giudizio sulla preferibile correttezza e prevalenza di una delle due configurazioni sull'altra, non enunciabile in modo assoluto ma sempre in relazione al contesto di studio del disegno per la meccanica architettonica, può essere condotta solo se focalizzata sul ruolo concesso alla forma ed ai suoi gradi di dettaglio nella descrizione e comunicazione dell'apparato strutturale.

Se le finalità scientifiche della rappresentazione strutturale individuavano nella *mimesis* figurativa l'espressione unificata di conoscenza tecnica e costruttiva, la ragione teorica della manipolazione della sua immagine era giustamente portata a richiedere una base di equivalenza e sostituibilità tra la 'struttura reale', la 'struttura percepita' e la 'struttura trasposta'. Tale approccio è derivato in una produzione grafica focalizzata sull'analogia e simmetria tra realtà e sua rappresentazione, quest'ultima strutturata e regolata secondo istanze geometriche applicate proprio per coordinare l'imperfezione formale e la densità di dettaglio dell'opera. Ne è seguita una pratica grafica valorizzata dalla fedeltà di rappresentazione in termini visuali, ma che non comunica le ragioni fisiche sottese alla forma architettonica.

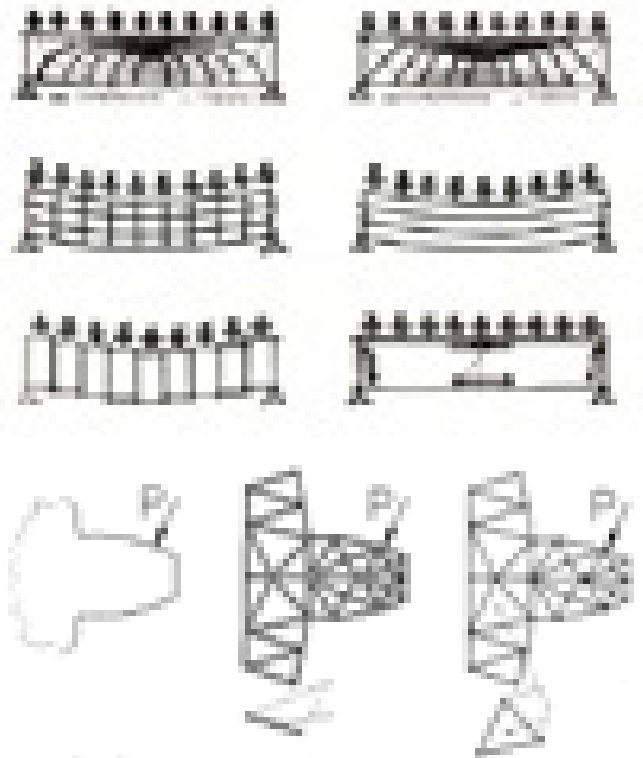
L'attenzione verso le variabili meccaniche e comportamentali dell'immagine per la descrizione statica delle configurazioni strutturali ha introdotto, all'opposto, una differente distinzione tra 'struttura grafica' e 'struttura tensionale', concentrandosi sulla rappresentazione della tensione vivente nella forma e declinando quest'ultima in una configurazione astratta di supporto cognitivo, lo schema, svincolata dall'aderenza reale. Si è attuato un processo di astrazione della forma, recuperano il principio per il quale "l'elemento non è quella forma stessa, bensì è la tensione interna che vive in essa"⁴⁷, revisionando le ragioni della densità di segno grafico in funzione di un significato analitico, di convenzione e codifica simbolica, ed alienando la forma ai suoi assunti di identificazione schematica. In tale contesto, l'identità della struttura è stata sintetizzata volumicamente fino a raggiungere la monodimensionalità lineare delle aste in equilibrio, perdendo la diretta corrispondenza con la realtà costruttiva e, per conseguenza, con la singolare realtà storico-materica della specifica opera.

La conclusione per cui "non è possibile o utile documentare e rappresentare "tutto" senza che la forma si affievolisca in un neutro indistinto"⁴⁸ mira ad un processo rappresentativo atto a trarre dalla massima potenza comunicativa della rappresentazione il più completo contenuto teorico. Per



Sopra (3.38) Stadi di sintesi della rappresentazione logica per il fenomeno di dissesto meccanico.

Il linguaggio grafico del disegno è chiamato a declinarsi in funzione delle diverse scale di osservazione dell'evento meccanico: come descrizione puntuale dei dispositivi o componenti che ne influenzano la crisi, o come macro-scenario dell'episodio dinamico su una configurazione semplificatamente omogenea. Il passaggio dalla mimesi allo schema si concentra proprio sull'assunto di omogeneità del sistema.



Dall'alto (3.39-3.40) stati di tensione e rapporti materico-formali di scomposizione dei sistemi strutturali per la descrizione tensionale.

tale ragione, il disegno deve convogliare la mimesi ad assumere un carattere specificatamente strutturale, e non genericamente pittorico-figurativo, prefissando un obiettivo in termini di forma e campo visibile di natura strumentale e/o consequenziale, mai essenziale o costitutivo. Alla pari, lo schema denota una semplificazione eccessivamente rigida ed estrema, con la perdita della quasi totalità di dati grafici tali da assimilare il disegno ad un diagramma codificato di componenti, cedendo la 'forma strutturale' in cambio di un 'dispositivo strutturale' adibito al processo di calcolo.

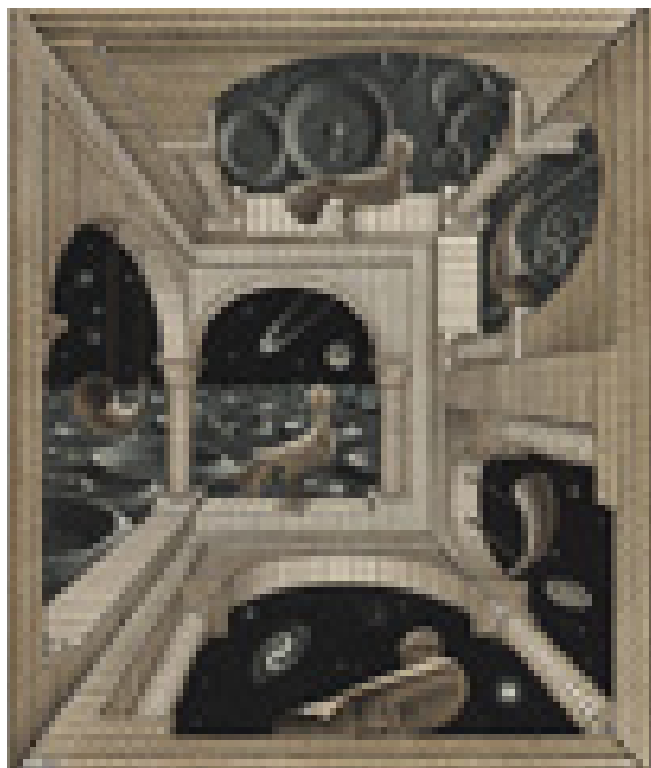
*“Tanto la mimesis che la rappresentazione sono dunque forme: hanno una forma, si attuano in una forma.”*⁴⁹ In tal modo, ogni rappresentazione autentica deve procedere in modo altamente critico, selettivo ed elettivo. Le forme della rappresentazione devono servirsi della *mimesis* come mezzo, producendola a sua volta con metodi e strumenti diversi. L'obiettivo della sua declinazione al disegno strutturale deve essere quello di affidarla alla geometria numerica per modellarla, razionalizzarla e codificarla, svincolando la produzione di immagini dalla ri-produzione aprioristica del visibile ma conservando l'identità del disegno nel nuovo ruolo di *“calcolatore analogico”*⁵⁰.



Nel rapporto di interpretazione tra mimesis e schema, la descrizione dell'apparato strutturale può adottare un approccio che alla semplificazione “della” forma preferisca un pratica di semplificazione del controllo “sulla” forma. Quest'ultima, inquadrata in opportune modularità costitutive del pattern, che circoscrivono limite e connessioni delle figure strutturali, può introdurre un metodo di scomposizione e disposizione delle sue unità indipendente dalla scala di dettaglio applicata, ma ad essa relazionabile in infinite qualità di affidabilità e ricostruzione dell'imperfezione formale.

(3.41) Konrad Wachsmann, *Simbolo the struttura tridimensionale interamente subordinata alla funzione*, 1961.

(3.42) Maurits Cornelis Escher, *Altro Mondo II*, 1947.



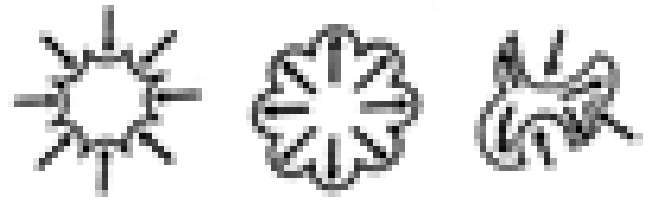
3.4.2. L'adattamento del pattern ed il geometry processing.

La ricerca di una morfologia bilanciata sull'adozione del *pattern* di scomposizione superficiale indirizza la rappresentazione strutturale verso reticoli e maglie di gestione delle superfici plastiche. Tali entità, valutate in termini di densità tra gli obiettivi di schema e mimesi della struttura, introducono la definizione di entità morfologiche qualitative sulle quali valutare la correttezza ed efficacia della trasposizione formale.

Se "vedere significa afferrare alcune caratteristiche preminenti di un oggetto"⁵¹, l'istituzione di facce e vertici di forma sui quali orientare la qualità del disegno può costituire una guida allo sviluppo di un'immagine strutturale che, attraverso la completezza ed il realismo della sua rappresentazione, conferisca una superficie morfologica al tempo stesso riconoscibile, univocamente caratteristica dell'imperfezione tecnica, ed uniforme, oggettivamente interpretabile e manipolabile per l'interpretazione quantitativa. Il dettaglio mimetico è così conservato e riprodotto attraverso l'applicazione del *pattern*, garantendo un'integrità della superficie strutturale capace di gestirlo nella resa cognitiva dell'intero sistema, impedendo che la densità di informazioni grafiche si presenti come un agglomerato di frammenti, dove i particolari perdano significato e l'unità diventi irriconoscibile.

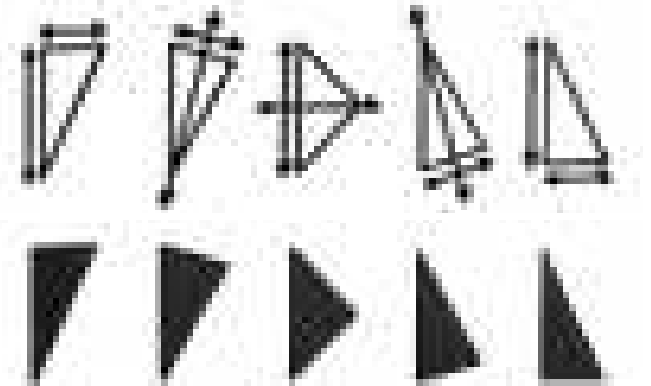
Risulta evidente la necessità di adottare proprio tramite il *pattern* una 'scomposizione geometrica essenziale' delle forme percepite, così che la rappresentazione della struttura architettonica non sia il prodotto di un processo astrattivo intellettuale, ma un'esperienza diretta di registrazione e coordinamento grafico del particolare costruttivo. La scomposizione della forma in *pattern* elementari, come poligoni geometrici, è avanzata per operare un ordine del materiale immediato fornito dall'esperienza visuale e creare uno schema corrispondente di forme composte, instaurando un metodo applicabile non solo ad un singolo livello di dettaglio, ma declinabile a differenti densità e dimensioni della maglia superficiale.

Se correlato al livello di semplicità del *pattern* percepito, il poligono stesso può essere scelto come medium per la scomposizione geometrica e numerica della forma strutturale, e caratterizzarla in modo sufficiente per la misurazione scientifica. "Le figure geometriche semplici



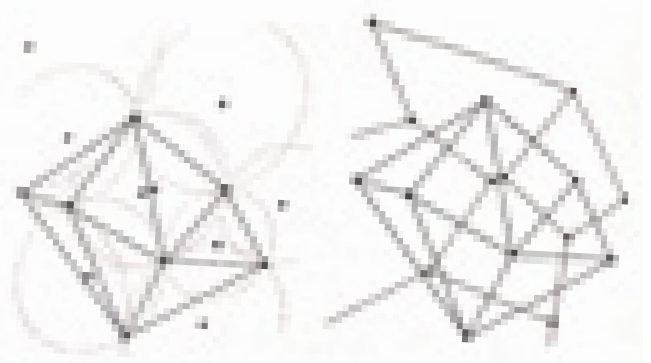
Rapporti semplici di manipolazione della forma sottoposta a stati di tensione. Possono essere considerate due diverse influenze, dall'esterno e dall'interno dell'oggetto sulla sua forma, entrambe agenti sull'involuppo superficiale del suo limite. E' da tali tensioni che il sistema plasma una forma base capace di descriverle sia essa stessa che in modo composto, come entità del geometry processing.

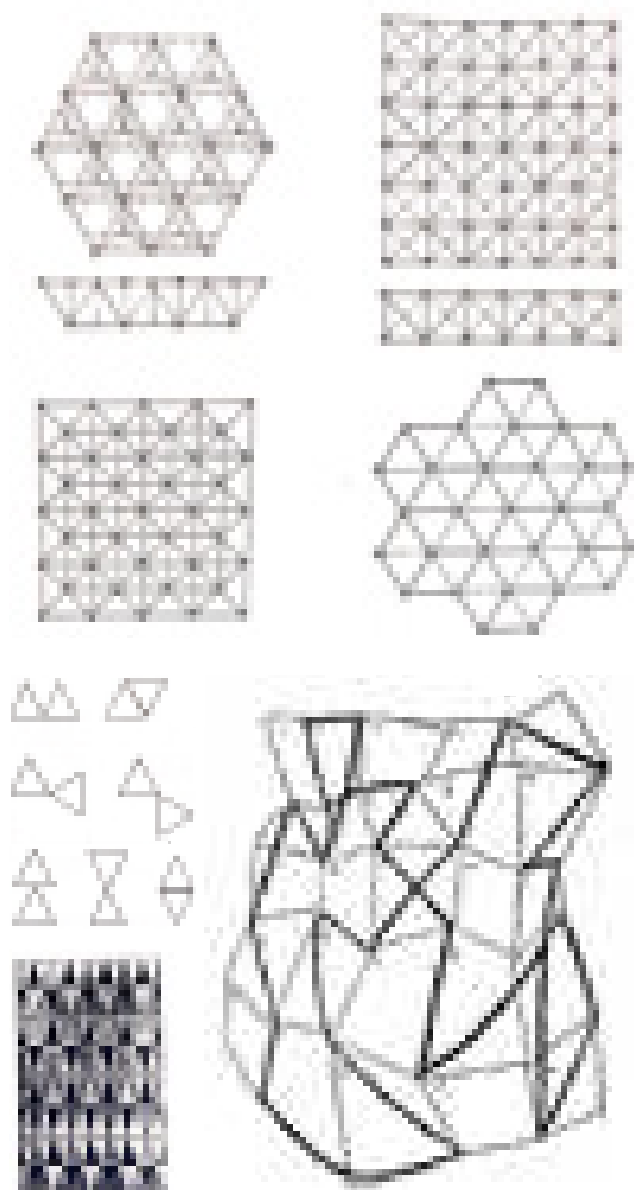
Arnheim, da Arte e Percezione Visiva: sopra (3.43) Interazione della forma con i fenomeni spaziali; sotto (3.44) lo scheletro strutturale della forma e le sue composizioni base.



"Lo scheletro strutturale di ogni triangolo deriva dal suo contorno grazie alla legge della semplicità: ne risulta la figura più semplice ottenibile in base alla forma data." (Arnheim 1954, p. 91)

Dal rapporto tra vertici, interpretato come un moto reciproco che plasma il modulo stesso del triangolo, ne risulta che uno scheletro strutturale composto può essere rivestito da una grande varietà di forme. Sotto (3.45) Diagramma di Delaunay e poligono di Voronoi.





Sopra: (3.46) Esempi di applicazione di moduli-forma a base triangolare per la composizione di involucri complessi di cupole reticolari.

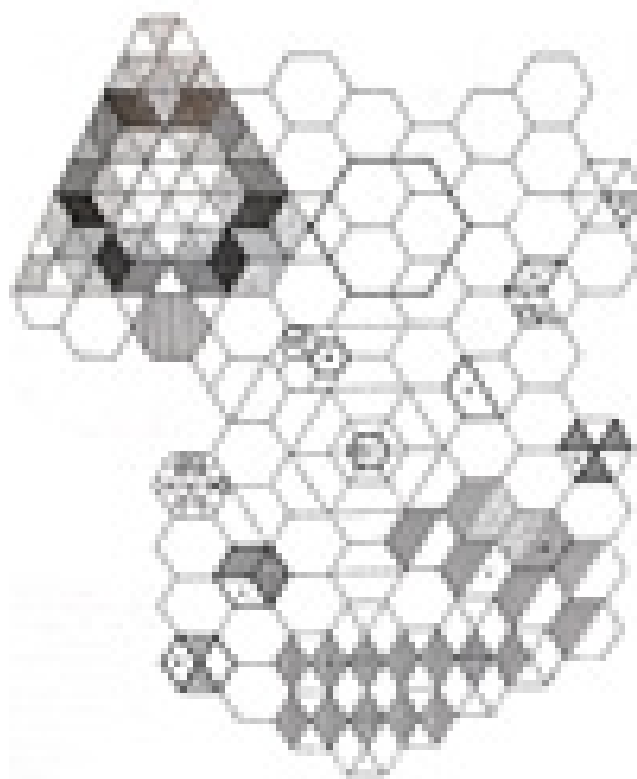
Sotto: (3.47) Aggregazione di due moduli triangolari equilateri; (3.48) composizione di Balla, 1912; (3.49) composizione spaziale di Paul Klee a base di quadrati e triangoli. A destra; (3.50) Composizione di pattern.

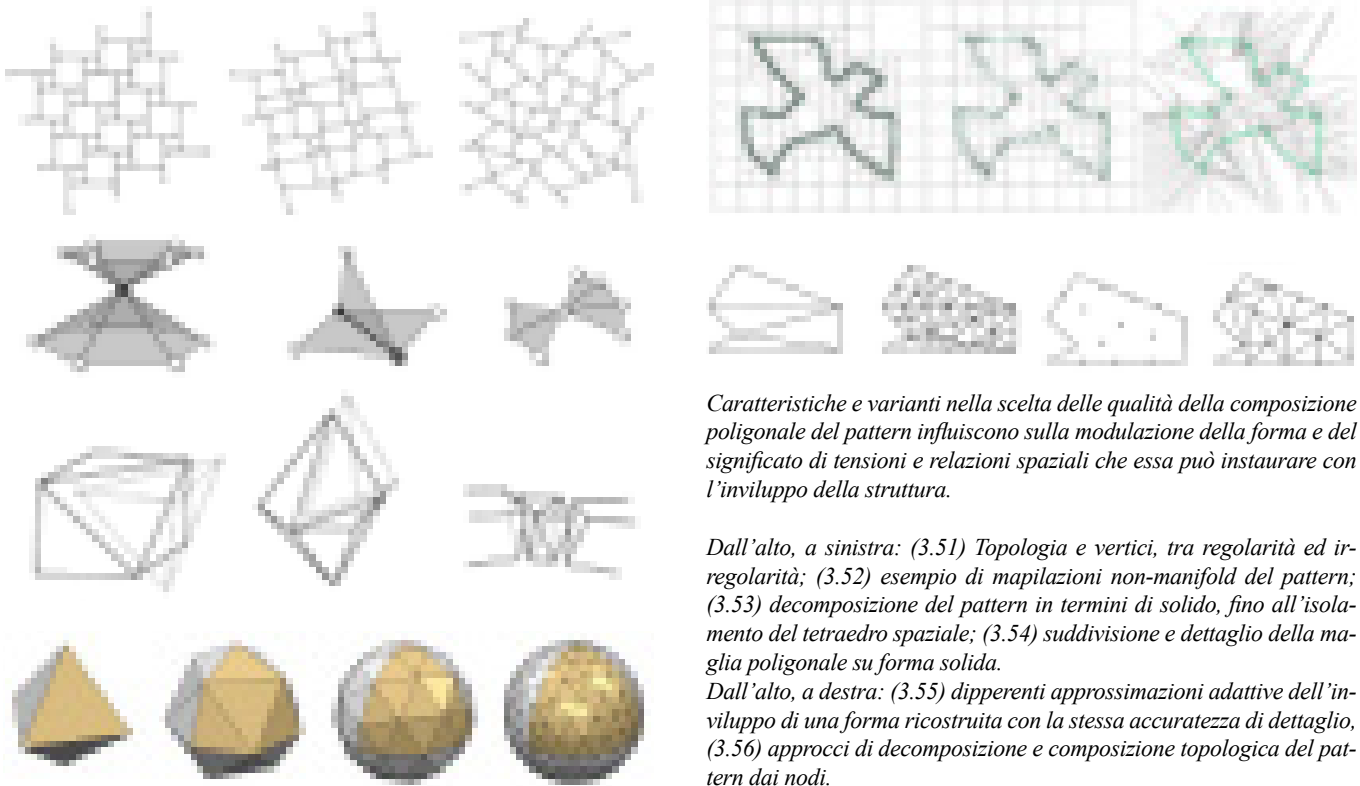
L'applicazione del modulo base triangolare avvia un campo di possibilità che concretizzano il *geometry processing* nella capacità di adattarsi alle descrizioni di più varietà formali. La scelta compositiva per tale descrizione, libera come ordinata, è determinante del carattere visuale.

sono ben lontane dalle complicate tipologie strutturali”⁵², e proprio nel potenziale della loro semplicità si offrono ad un processo elaborativo, il *geometry processing*⁵³, che le manipola e adatta per conseguire la completezza dei gradi di astrazione della forma strutturale.

“Avevano considerato come pacifico che la percezione stessa non fosse in grado di fare nulla di meglio che registrare meccanicamente le stimolazioni del mondo esterno. Sembra invece, ora, che uno stesso meccanismo operi a entrambi i livelli: quello percettivo e quello intellettuale”⁵⁴ cosicché, nell'isomorfismo della *pattern* poligonale⁵⁵, termini quali astrazione e calcolo trovano il ruolo anche all'interno dell'immagine restituita.

Il modulo astratto (di funzione quasi signica) appare dunque come la punta emergente e riconoscibile di un reticolo di aggregazioni e disgregazioni sempre aperto ad ulteriori combinazioni, costruendo forme attraverso triangolazioni ricorsive di unità poligonali⁵⁶ che relazionano la lettura dei segni permanenti sulla fabbrica architettonica.

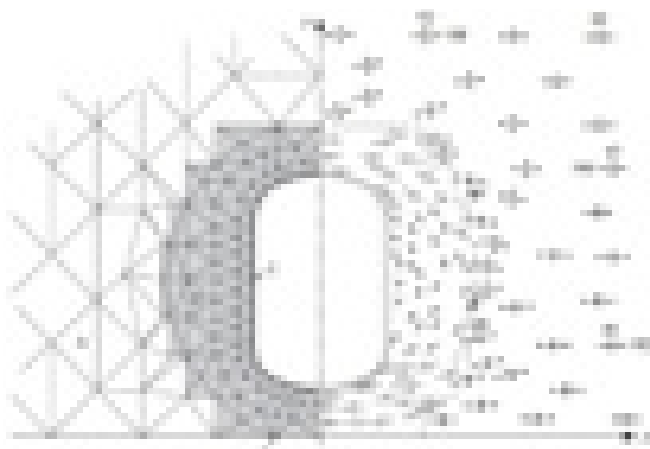




Caratteristiche e varianti nella scelta delle qualità della composizione poligonale del pattern influiscono sulla modulazione della forma e del significato di tensioni e relazioni spaziali che essa può instaurare con l'involuppo della struttura.

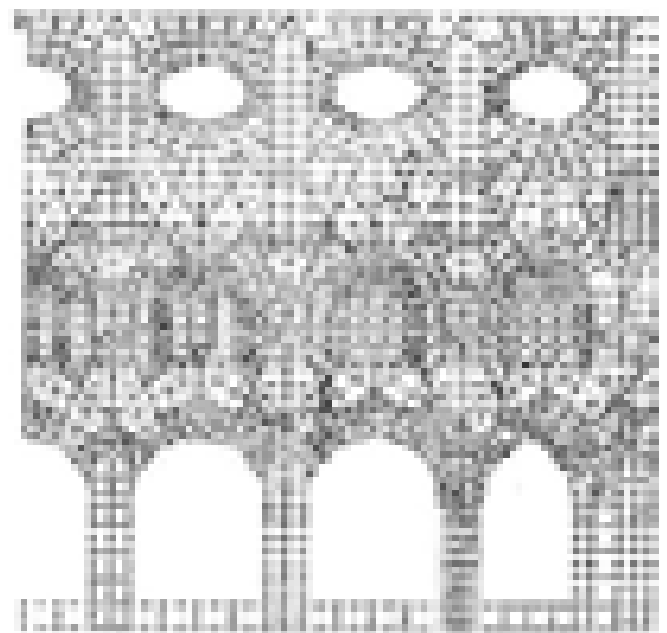
Dall'alto, a sinistra: (3.51) Topologia e vertici, tra regolarità ed irregolarità; (3.52) esempio di mapilazioni non-manifold del pattern; (3.53) decomposizione del pattern in termini di solido, fino all'isolamento del tetraedro spaziale; (3.54) suddivisione e dettaglio della maglia poligonale su forma solida.

Dall'alto, a destra: (3.55) dipperenti approssimazioni adattive dell'involuppo di una forma ricostruita con la stessa accuratezza di dettaglio, (3.56) approcci di decomposizione e composizione topologica del pattern dai nodi.



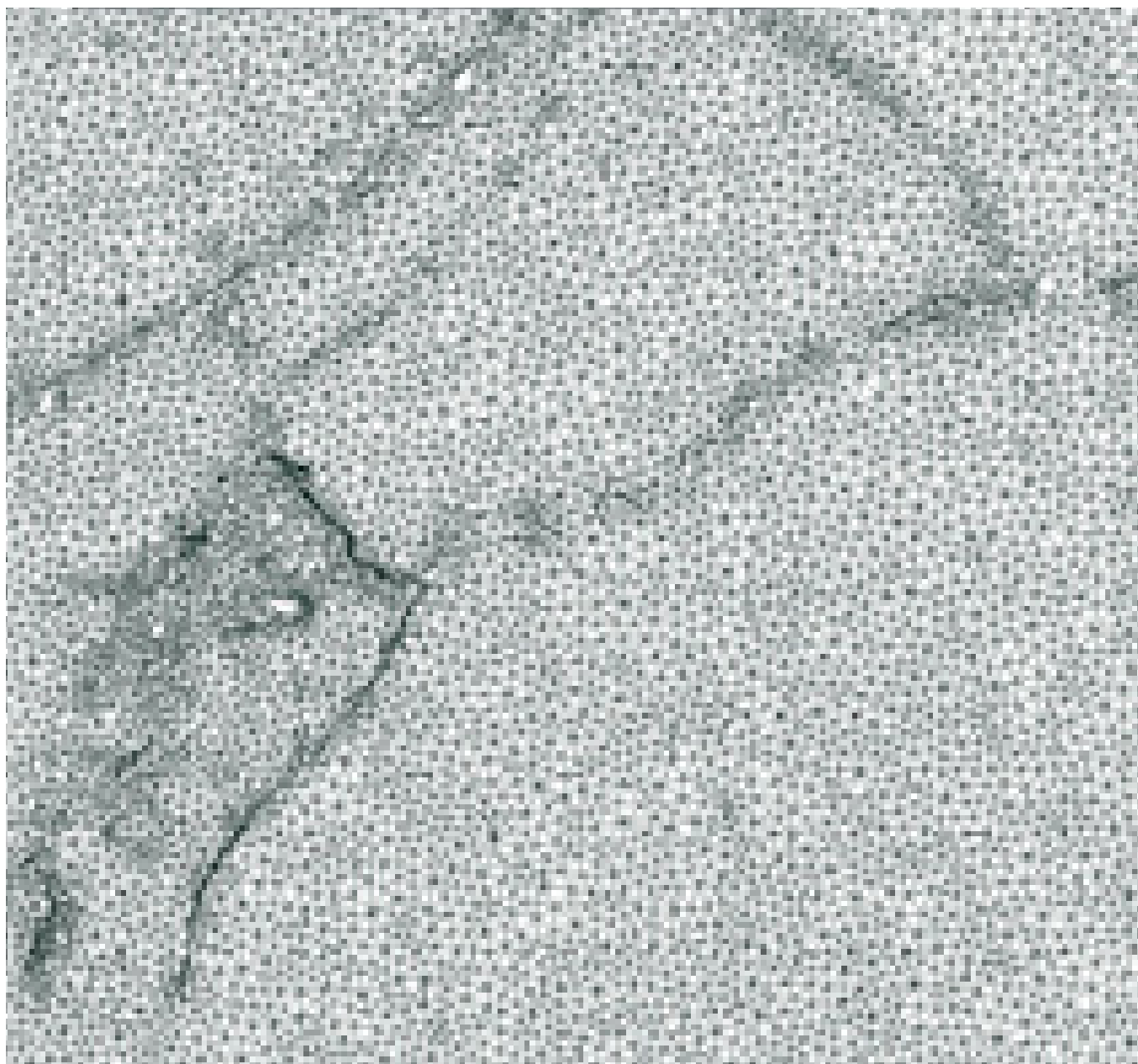
Sopra (3.57) Morfologia struttura, elaborazione dell'involuppo come mesh poligonale e campo di tensione meccanica sviluppato corrispondente al pattern applicato.

A fianco (3.58) Lorenzo Jurina, modello ad elementi finiti di una parte del Palazzo della Ragione di Milano, 1982. Il modello include nella scomposizione della maglia le faglie delle principali lesioni passanti.



Se la conformazione del patternn istituisce un valido metodo di scomposizione per la gestione della rappresentazione della forma strutturale, in tutte le sue singolarità morfologiche, allora la sua riapplicazione si orienta verso le modalità di discretizzazione dei vertici e generazione dei poligoni congiungenti, affrontando una revisione delle possibilità vettoriali e digitali che permettano tale passaggio dal contesto reale alla sua trasposizione in superficie geometrizzata.

(3.59) Geometry processing applicato da algoritmo automatico di modellazione mesh su una porzione muraria interessata da lesioni superficiali e area di distacco.



NOTE

1 Cit. Wittgenstein L. (2016). *“Tractatus Logico-Philosophicus.”* [S.l.]: Chiron Academic Press.

2 I significati assegnati al termine 'forma' sono molteplici, spesso legati a sfumature puramente linguistiche. Arnheim, in particolare, individua la duplice accezione di 'shape' e 'form': la prima con valenza di 'configurazione', legata alle caratteristiche preminenti di un oggetto (intese come *contorni*) tali da consentirne un'identificazione anche con pochi segni selezionati, già appartenenti ad un processo di semantizzazione; la seconda come 'forma', dove il collegamento all'identità dell'oggetto è già relazionato ad aspetti di matericità, concretezza della struttura, orientamento ed espressione in funzione dello specifico messaggio da comunicare. Per una trattazione più estesa, cfr "Configurazione" (pp. 55-92) e "Forma" (pp. 93-141) in Arnheim R. (1965) *“Arte e percezione visiva”*. Milano: Feltrinelli.

3 Cit. Porrás-Isla F., "Form" in Gausa M., Guallart V., Muller W., *op. cit.*, p. 237

4 *“Si è già molto insistito sulla distinzione tra l'immagine come dato essenzialmente percettivo e la forma come struttura che trascende il mero visibile e riassume la consistenza spaziale e storica dell'architettura. E se l'immagine viene innanzi tutto presa in considerazione per ottenere un modello geometrico che costituisca l'oggetto del procedimento proiettivo, nella forma risiede ciò che in primo luogo la rappresentazione deve tendere a registrare ed esprimere. [...] Vi è pertanto una componente che si riferisce sempre alla visione, ma che implica una percezione sostanzialmente intellettuale, una modellizzazione astratta del dato contingente, il riferimento a una 'idea' [...] la morphé denota piuttosto un'apparenza non perfettamente distinta che cela una più concreta realtà, un'apparizione che si avvicina al phántasma dalla consistenza essenzialmente luminosa, quindi anch'essa visiva”*. Cit. Ugo V., *op. cit.*, p. 76

5 Si intende, in particolare, l'ambito della Gestaltpsychologie, 'psicologia della forma', sviluppata attorno al 1912 sulla percezione dell'unità nella forma degli elementi, e nella sua strutturazione globale dall'osservazione diretta e fenomenologica. Per un approfondimento ed una trattazione più estesa del tema, cfr. Köhler W. (1961) *“La psicologia della Gestalt”*, Milano: Feltrinelli; Koffka K. (1970) *“Principi di psicologia della forma.”* Torino: Boringhieri; Katz D. (1950) *“La psicologia della forma”*. Torino: Boringhieri; Arnheim R. (1965) *“Arte e percezione visiva”*. Milano: Feltrinelli.

6 Per una trattazione più ampia sulle declinazioni della Gestaltpsychologie e dei suoi processi percettivi in termini di rappresentazione e disegno di architettura e paesaggio, cfr. Parrinello S. (2013) *“Disegnare il paesaggio”*. Firenze: Edifir, p. 35-52.

7 Cit. Ugo V., *op. cit.*, p. 75

8 *“La forma diventa un sistema simbolico, come vuole Norberg-Schulz. E si consacra uno stile, che non riguarda solo l'ornamento, il dettaglio, l'elemento costruttivo, ma l'intera*

costruzione nell'armonico rapporto fra le sue parti, nella codificazione della forma esteriore, e delle misure di insieme. [...] lo stile è un assoluto, esempio e fissità valevole per sempre, insieme coerente di forme la cui armonia si cerca, si fa e si disfà in diverse maniere senza però alterarne la struttura di base.” Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p. 25

9 Cit. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, p. 25. Le riflessioni dell'artista nel suo scritto sono qui concentrate sul timore dell'occultamento del significato della rappresentazione nell'imprecisione della forma del soggetto, da un lato sbilanciata verso l'innaturalità dell'astrazione, dall'altro nel rischio di un'eccessiva complessità della sua forma minima.

10 Ibidem.

11 Ivi, p.24.

12 Cfr. Stern W. (1938). *“General psychology from a personalistic standpoint”* (trans: Spoerl, H. D.). New York: Macmillan.

13 Vitruvio nel suo *“De architectura”* (I sec. a.C.) imposta il binomio per analizzare ed interpretare le forme dell'architettura come 'fabbriche' costruttive e 'raziocinio' progettuale, connubio di materia e schema meccanico.

14 Cfr. Schopenhauer A. (1985). *“Il mondo come volontà e rappresentazione”*. Milano: Mondadori. (Die Welt als Wille und Vorstellung, prima edizione 1819). Vorstellung è usato per indicare la percezione cognitiva, come struttura di elaborazione, mentre Darstellung è definita come riduzione al sensibile dei prodotti della percezione, rappresentazione esibitiva.

15 Tra le varie definizioni, si rimanda a quella del filosofo Kant come ordinata visione del mondo, strutturata nelle sue parti. Cfr. Kant I. (1984). *“Critica del giudizio”*. Bari: Laterza. (ed. originale 1790).

16 Cit. Heidegger M. (1954) *“La questione della tecnica”*, p.10, in Heidegger M. *“Saggi e discorsi”*. Milano: Mursia, 1991, pp. 5-27.

17 È la Ge-stell come “imposizione” a indicare quella provocazione dell'uomo a richiedere una spiegazione, una disvelazione, del reale, per trarne conoscenze da applicare nella pratica, raccogliendole in un “fondo comune” a disposizione della comunità del sapere. Cfr. Heidegger M., *op. cit.*, 1991, pp. 5-27.

18 Ivi, p. 14

19 La concezione dell'architettura oltre la natura di “macchina” di corpi bruti le assegna una forza formatrice e regolatrice, una *entelechia*, che ne dà ragione della forma e quindi della coerenza organizzativa della struttura. Il funzionamento delle opere statiche che la definiscono è spiegato in termini di peso e di movimento, coinvolgendo un principio attivo interno, una forma sostanziale o forza primitiva, quale “attività originaria” o entelechia, in grado di dare una risposta alla differenza specifica esistente tra la fabbrica artificiale nel momento della sua osservazione ed il suo schema originale. Cfr. Leibniz G. W. (1988) *“Nuovi saggi sull'intelletto umano”*, in Bianca D. O. (1988) *“Scritti filosofici”*, Torino: UTET, vol. II, p. 358.

20 *“È iconico, quindi, il segno che ha sembianze morfologiche somiglianti visivamente a ciò che rappresenta,*

ovvero che può essere interpretato o codificato secondo schemi e configurazioni aventi forma apparente simile alla forma apparente della realtà.” Cfr. De Rubertis Roberto (1994). *“Il disegno dell'architettura”*. Roma: La Nuova Italia Scientifica, p. 44

21 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, pp. 40-41.

22 Ivi, pp. 38-39

23 “[...] fare della fisica nel nostro senso del termine [...] vuol dire applicare al reale le nozioni rigide, esatte e precise della matematica e, in primo luogo, della geometria. Impresa paradossale, se mai ve ne furono, poiché la realtà, quella della vita quotidiana in mezzo alla quale viviamo e stiamo, non è matematica. [...] Ne risulta che volere applicare la matematica allo studio della natura è commettere un errore e un controsenso. Nella natura non ci sono cerchi, ellissi, linee rette. È ridicolo voler misurare con esattezza le dimensioni di un essere naturale: il cavallo è senza dubbio più grande del cane e più piccolo dell'elefante, ma né il cane, né il cavallo, né l'elefante hanno dimensioni strettamente e rigidamente determinate: c'è dovunque un margine di imprecisione, di “giuoco”, di “più o meno”, di “pressappoco”. [...] Ora è attraverso lo strumento di misura che l'idea dell'esattezza prende possesso di questo mondo e che il mondo della precisione arriva a sostituirsi al mondo del “pressappoco”. Cfr. Koyrè A. (1967). *“Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione”*. Torino: Einaudi. Ed. originale “Du monde de l'”à-peu-près” à l'univers de la précision”. Paris: Armand Colin, 1961.

24 Cit. Köhler W. (1961) *“La psicologia della Gestalt”*. Milano: Feltrinelli.

25 La forma della struttura, per sua determinazione semantica e logica, ne motiva l'apertura ad una pluralità di usi in architettura senza che essa ne perda di identità. Quella che viene richiamata non è la forma aristotelica, opposta alla materia, ma *“una forma come modalità di esistenza (temporale e storica) della materia, che la tékhne realizza, analogamente a quanto avviene per le strutture naturali come alcune foglie o artificiali come i paraboloidi iperbolici.”* Cfr. Ugo V., *op. cit.*, p. 26

26 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p.27

27 Non c'è altro modo, per descrivere l'interno di una struttura muraria, che disegnarne le sezioni più significative, portando così ad apparire in superficie ciò che nella realtà non è visibile. Il variare continuo delle forme tridimensionali all'interno di un corpo non è comunque illustrabile, solo le forme visibili sono rappresentabili.

28 Cit. Tagliaventi G., *op. cit.*, p.27

29 Cit. Gausa M., “Form”, in Gausa M., Guallart V., Muller W., *op. cit.*, p. 237

30 Cfr. Ugo V., *op. cit.*, p. 75

31 “[...] quando si esegue una raffigurazione di una cosa già sperimentata, si può scegliere quanta parte della sua forma vi si vuole includere. [...] Quando un individuo, a cui sia stato chiesto come appare una scala a chiocciola, descrive con il dito una spirale ascendente, egli non rappresenta il contorno ma l'asse principale caratteristico (in realtà inesistente) dell'oggetto. Possiamo dunque

affermare che la vera forma d'un oggetto è costituita dalle sue essenziali configurazioni spaziali.” Cit Arnheim R., *op. cit.*, p. 60

32 Per una trattazione più estesa, cfr. Maldonado T. “Appunti sull'iconicità”, in Maldonado T. (1993) *“Reale e virtuale”*. Milano: Feltrinelli.; Sanders Peirce C. (2005) *“Scritti scelti”* (a cura di Giovanni M.). Torino: UTET.

33 “Il codice iconico sia avvale di tutto l'insieme di somiglianze che è possibile stabilire tra realtà e immagine conformemente alle modalità con cui i fenomeni si presentano visivamente all'osservatore. Si tratta di un codice di riconoscibilità immediata che non richiede alcun precedente accordo per essere compreso.” In tal senso, la corrispondenza è immediata proprio sulla base di una similitudine, tra cui quella morfologica, ma la categoria tassonomica di trasposizione è, come sottolineato, quella del codice, non della mimesi. Cfr. De Rubertis Roberto (1994), *op.cit.*, p. 15; de Rubertis R., Soletti A., Ugo V. (1992). *“Temi e codici del disegno di architettura”*. Roma: Officina.

34 Si fa riferimento all'opera e agli studi di Adam Moles, per il quale codificare la lettura di sistemi statici e dinamici delle strutture storiche coinvolge la valutazione di opportuni gradi di iconicità dell'immagine che possano permetterne la comunicazione senza comprometterne l'identità. Per una trattazione più estesa, cfr. Moles A. A. (1972), *“Teoria informazionale dello schema”*. VS, n.2 (marzo), 1972.

35 Cfr. Cardone, *op. cit.*, pp. 302-311. In ogni caso, i pensieri di diversi autori si sono concentrati su questo tema (Arnheim, Baker, Goodman, Gombrich, Morris, Wollheim), sviluppando ciascuno una propria scala di variabili, dove assieme alle principali mantenute fisse è possibile ritrovarne anche altre di maggior dettaglio e specifica.

36 Su Abraham Moles, cfr. Anceschi G., *op. cit.*, p.27

37 La predisposizione fisiologica dell'occhio supporta il peso percettivo delle forme affidato al contorno. L'apparato visivo occhio-cervello risponde con maggiore efficacia alle brusche variazioni di informazione condensate nel contorno grafico rispetto alla continuità di segno. Il disegno eseguito per linee approfitta così di un meccanismo percettivo già naturalmente operante, per scoprire e valorizzare il potere significativo dei contorni, e attraverso la sua modulazione *“gli infiniti dosaggi del livello di schematizzazione che possono essere attribuiti alla linea originano la varietà illimitata di disegni che è possibile realizzare e il parimenti illimitato campo di espressioni grafiche che ne consegue.”* Cit. De Rubertis R. (1994), *op.cit.*, p. 33. Per una trattazione più estesa, cfr. De Rubertis R. (1971). *“Progetto e percezione.”* Roma: Officina.

38 I segni iconici, pur non avendo le stesse proprietà fisiche dell'oggetto, *“stimolano una natura percettiva ‘simile’ a quella che sarebbe stimolata dall'oggetto imitato”*, e mantengono una corrispondenza tra forma ed aspetto della struttura che, modulata in grado di astrazione, calibra anche la quantità di informazioni trasposte per l'analisi morfologica. Cfr. Eco U. (1975). *“Trattato di semiotica generale.”* Milano: Bompiani.

39 Una riflessione sulle differenze e analogie che possono intercorrere tra segni e moduli di scomposizione e comprensione

della forma è approfondita in Arnheim R. (1969). “*Il pensiero visivo*”. Torino: Einaudi, p. 181

40 Cfr. Tzonis A., Oorschot Frames L. (1987) “*Plans, Representation Concept dicta at Inleiding Programmatische en Functionele*” Analyse Technical Report, Delft: University of Technology.

41 Cfr. Hjelmslev L. (1943), trad. it. “*I fondamenti della teoria del linguaggio*”. Torino: Einaudi.

42 Cfr. Arnheim R. (2004), *op. cit.*, p.70

43 Gli psicologi della Gestalt hanno definito “Legge della Prägnanz” l’attitudine ad interpretare forme ambigue nel modo più semplice, ovvero con meno elementi, più sintetici, e con composizioni più regolari. Si assume così che esistano forme base che vengono riconosciute velocemente a livello subconscio, chiamate *geometric icons*, dei pattern semplici e noti.

44 Su ‘configurazione’ o ‘shape’, cit. Arnheim R. (2004), *op. cit.*, p.70

45 Cfr. Ugo V., *op. cit.*, p. 19

46 Approfondito nei campi di geometria algebrica, algebra commutativa e teoria dei numeri, lo schema è introdotto da Alexander Grothendieck con l’obiettivo di generalizzare un concetto di varietà per renderlo idoneo alla formulazione teorica. Cfr. Harris J. (1998) “*The Geometry of Schemes*”. Verlag: Springer.

47 Cit. Kandinskij V. V. (1968), *op. cit.*, p. 28

48 Cit. Ugo V., *op. cit.*, p. 34

49 Ivi, p. 76

50 Ivi, p. 103

51 Cit. Arnheim R. (2004), *op. cit.*, p. 57.

52 Ivi, p. 67

53 Il *geometry processing* (“elaborazione della geometria”) è un campo dell’informatica che concerne algoritmi e modelli matematici per l’analisi e la manipolazione di dati geometrici. Per una più estesa trattazione, cfr. Baerentzen J. A., Gravesen J., Anton F., Aanæs, H. (2012). “*Guide to Computational Geometry Processing: Foundations, Algorithms, and Methods*”. New York: Springer-Verlag.

54 Cit. Arnheim R. (2004), *op. cit.*, p. 59.

55 Cfr. Botsch M., Kobbelt L., Pauly M. (2010) “*Polygon Mesh Processing*”, 1ª ed.. Natick, MA: A. K. Peters.

56 Cfr. Stiny G. (1980) “Introduction to shape and shape grammar”. *Environment and Planning B*, volume 7, pp. 343-351



Capitolo 4

Qualità infografica della forma per la rappresentazione strutturale

“Il solo valore estetico dell’architettura sta nel rendere visibile la lotta fra il peso e la rigidità e nel trovare la ricerca di vie contorte che consentano al peso di insinuarsi fra le colonne, tra gli archi, per giungere al suolo.”¹

L’assunzione della forma quale soggetto della rappresentazione per l’istituzione di un protocollo di analisi delle strutture storiche indirizza la ricerca ad una fase di revisione ed identificazione delle caratteristiche geometriche e qualitative proprie della morfologia strutturale. In merito alle riflessioni sui gradi di iconicità ed espressione formale², ne deriva un necessario confronto con il panorama delle realtà costruttive appartenenti nel patrimonio storico architettonico.

Il riconoscimento di ‘costanti’ costruttive³, dal carattere mediato tra tecnologia e forma, ha indotto nel tempo la fiduciosa derivazione di leggi meccaniche per descrivere l’esperienza statica delle strutture. Tali assunti in parallelo ad una classificazione tipologica e semantica degli schemi di resistenza e dei loro componenti di vincolo. Un rilevante peso di giudizio nella deduzione dei quadri sollecitativi è stato posto dall’estrema varietà costitutiva delle configurazioni strutturali applicate nell’edilizia storica. Lo studio sul patrimonio architettonico esistente evidenzia un ampio catalogo sia materico che tecnologico nella tipologia e composizione di unità e sistemi, e rende difficile sviluppare una corrispondenza biunivoca tra il quadro ‘reale’ di strutture esistenti ed un unico schema statico ‘ideale’ di progetto⁴.

Il frutto dell’evoluzione e stratificazione degli edifici storici, per forma o funzione, caratterizza un quadro complesso di analisi dove ricercare l’effettivo involucro resistente. In tali termini l’apparato strutturale, una volta individuato ed isolato all’interno di tali apparati, induce ad una doppia considerazione sulla sua natura morfologica. Da un lato la riscoperta del suo ‘limite’ effettivo, della reale estensione del volume resistente, ripulito dal ‘rumore’

apportato dalla stratificazione di livelli dell’organismo architettonico; dall’altro la scelta di qualità della ‘forma’ trasposta nei possibili modi di ‘discretizzazione’ del suo dettaglio e, conseguentemente, dei segni apportati dall’influenza statica sull’involucro sollecitato.

L’azione di percezione si concentra così sull’atto di “osservare i disordini della struttura”⁵ per conferirgli significato, identificando ogni variabile della superficie di involuppo e collegandola al contesto statico di corrispondenza. In questa trasposizione formale tra realtà ed immagine ogni segno, per quanto tipologico, è conferito di informazioni atte a renderlo unico, individuato ed univocamente significante, come nel caso di una differente corrispondenza per la medesima forma di lesione tra un’incrinatura ed una frattura di separazione.

Il panorama delle identità morfo-visive dell’apparato strutturale suggerisce così aspetti di classificazione meccanica delle qualità formali della struttura architettonica, orientandone la sensibilità di percezione e la scelta di rappresentazione, e garantendo quella necessaria attenzione verso la specifica imperfezione morfologica.

“Perché la documentazione sia significativa, è necessario capire ciò che si rileva, o meglio rilevare ciò che si è capito, altrimenti l’informazione può risultare fuorviante.”⁶

Nella pagina a fianco, Castillo de Santa Barbara, Alicante, 2017.

La fortezza è fondata sul rilievo montuoso, compenetrando in diverse porzioni ed ambienti, ed integrando la struttura antropica con le forme della roccia e le grotte naturali. La classificazione distinta tra i componenti della struttura fortificata risulta complessa, impossibile senza una corretta definizione della singola forma.

4.1 IL SIGNIFICATO DELL'IMPERFEZIONE FORMALE NELLA NOMOGRAFIA DELL'IMMAGINE STATICA

*“We have entered into a vortex of definition and consumption.
But what does a form become when it does not have to be the spokesperson of its contents, when it is silent?
[...] Neutral forms, insignificant, silent.”⁷*

L'analisi degli apparati strutturali adotta oggi schemi tipologici di strutture numeriche, scelte per essere meccanicamente controllabili in più definiti livelli di regolarizzazione ed astrazione della struttura effettiva. Parallelamente, l'affinamento della tecnica costruttiva nell'edilizia storica ha indirizzato la documentazione verso la sintesi di classi tipologiche ben definite delle componenti strutturali, avvicinandole di più alla corrispondente rigidità di classificazione statica.

La normalizzazione prestazionale per la produzione di blocchi murari, profilati metallici, sezioni lignee e nervature cementizie ha avvicinato la natura morfologica delle componenti di connessione all'analogo schema statico di aste, bielle plastiche, telai di sistema e corpi rigidi. In tal modo, l'analisi delle sollecitazioni statiche si è trasformata da osservazione a conclusione, dedotta dai corrispondenti schemi funzionali, e la centralità della qualità morfologica

è stata sostituita dalla sufficiente padronanza di una configurazione meccanica di funzione tematica.

Con il dibattito francese del XVIII secolo, la corrispondenza tra schema e struttura ha iniziato ad imporsi come metodo sia di progetto che di documentazione delle fabbriche architettoniche, sviluppando una pratica basata sulla comparazione tra la 'forma fissa' dei manuali e la 'forma variabile' riscontrabile nella realtà. Quest'ultima ha iniziato ad essere forzata per aderire a quella istituzionalizzata con l'astrazione del sistema di forma, meccanica e funzione⁸, scontrandosi con l'aspetto pratico della 'regola dell'arte'. Questo duplice aspetto ha consolidato un metodo di confronto integrato tra le singole costruzioni, finalizzato a controllarne la coerenza statico-formale tramite un codice tecnico sufficiente a limitare, entro confini accettabili, sia la forma specifica dell'unità strutturale che l'effetto tensionale rilevato sul suo sistema.



(4.1) Strutture contemporanee in telai di profili prefabbricati. La standardizzazione degli elementi comporta una prevedibilità delle prestazioni meccaniche tale da rendere superflue analisi formali delle imperfezioni.



(4.2) Centro storico post-sisma in Italia. La variabilità delle strutture stratificate e composte dei centri storici genera soluzioni particolari di danno meccanico, dove l'imperfezione formale è segno distintivo.

La fiducia nella sperimentazione scientifica e nella standardizzazione della statica strutturale ha portato a sottovalutare l'“esperienza”⁹ dell'edificio, intesa come quel sistema di eventi che nel tempo vi hanno sviluppato sollecitazioni e tensioni tali da definire una specifica capacità di risposta, oltre alla disomogeneità costitutiva propria. La ricerca della singolarità del dettaglio strutturale, rintracciabile oltre che nei moduli costitutivi anche nella tessitura e nelle componenti di connessione, è impostata oltre il controllo dei dettagli costruttivi come paradigma di concentrazione delle qualità formali¹⁰.

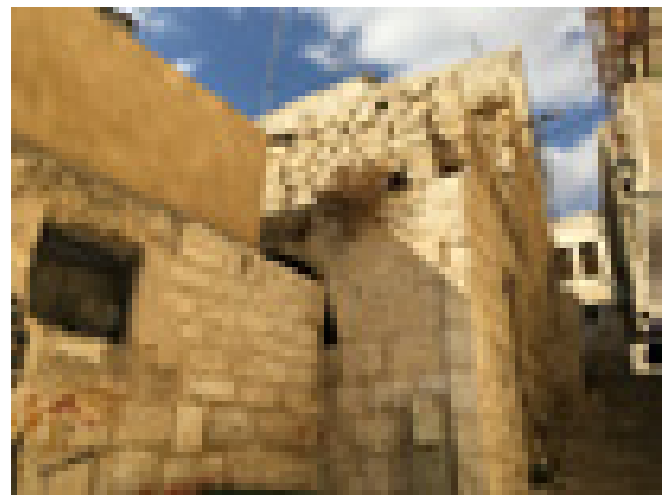
Con l'obiettivo di percepire e trasmettere, in modalità e strumenti utili, le finalità di analisi ed intervento, la produzione di immagini sull'apparato strutturale è chiamata non solo a delineare un quadro geometrico generico, ma anche a condurre un'introspezione diretta e focalizzata su segni della forma strutturale, comprensibili nel disegno in termini di “correttezza di trasposizione formale che unisce, all'affidabilità geometrica, anche la conoscenza del processo costruttivo”¹¹.

*“Anche quando il disegno sembra non avere altro obiettivo che la semplice raffigurazione di un aspetto della realtà, tuttavia orienta sempre l'attenzione su quell'aspetto, o propone un modo soggettivo di intenderlo, o lo descrive indirizzandone l'interpretazione e condizionandone il giudizio; in ogni caso sostituisce al fenomeno una sua sintesi interpretativa.”*¹²

In tal senso, il disegno è ricondotto ad una duplice scala di analisi dell'apparato strutturale: come costruzione sintetica dello schema logico dell'intero impianto e quale strumento di osservazione e approfondimento del dettaglio formale costitutivo. Tale pratica, in un dialogo tra simbolica e rappresentativa, intende quindi dare un significato all'insieme complesso di ipotesi interpretative su fenomeni ed influenze dell'esperienza strutturale.

La lettura meccanica è calibrata in maniera specifica a seconda del tipo di anatomia strutturale considerata, e su di essa individua specifici “target” di forma tramite i quali orientare la sensibilità del segno nella corrispondente immagine diagnostica. Ne è un esempio l'analisi delle strutture murarie storiche, dove i sistemi di tessitura delle pietre, nel profilo, disposizione e lavorazione dei conci, condensano sull'involucro di superficie delle informazioni interpretabili alle diverse scale come degrado, irregolarità tipologica e fenomeno deformativo della fabbrica.

La dinamicità di costruzione e rimaneggiamento delle strutture storiche, leggibile sia nelle singole unità paramentali che alla dimensione degli aggregati nei centri urbani, rimanda così ad un complesso di trasformazioni tipologiche, modifiche tecniche costruttive e riorganizzazione dei moduli unitari in un più comune quadro di ‘permanenza’ degli impianti principali. La documentazione è intesa al contempo come ‘comparata’, in riferimento agli archetipi, e ‘approfondita’, evidenziando le varianti rispetto alla definizione tipologica.



Alterazioni formali distintive di instabilità della fabbrica costruttiva, evidenziati segni nitidi di demarcazione del fenomeno meccanico. (4.3) Faglie di frattura e cedimento strutturale nel sotto in laterizio nel complesso di Rubezhskaya in Usolye, Russia; (4.4) decoesione di paramento strutturale in pietra nelle unità edilizie di Betlemme, Palestina.

4.2. SVILUPPI DELL'INFORMAZIONE GRAFICA STRUTTURALE DALLA MANIPOLAZIONE DEL PATTERN VISUALE.

L'osservazione delle strutture storiche fornisce un ampio repertorio di schemi statici ricorrenti applicati alle fabbriche costruttive, tale da coprire, attraverso le qualità principali di tipo geometrico, materico e strutturale¹³, i molteplici livelli di scala architettonica dalla pietra alla città. In tale quadro, la forma del segno statico è presentata attraverso diverse articolazioni atte a costituire il linguaggio comunicativo dell'immagine strutturale, per una rappresentazione bilanciata tra l'enfatizzazione del dettaglio e la convenzione sintattica.

Valutando le disposizioni formali legate alla meccanica del sistema strutturale, la scala del dettaglio morfologico rappresenta con certezza uno dei principali fattori di orientamento dello sguardo e del significato dell'immagine prodotta. Essa stabilisce una relazione in termini di macro o micro-rappresentazione, afferibile alle modalità

di discretizzazione e conseguimento del *pattern* di superficie, scelto come *target* morfologico di revisione nella comunicazione grafica degli apparati strutturali. In tale contesto, le singolarità morfologiche divengono punti di distinzione all'interno dell'uniformità del *pattern* dell'involucro superficiale, e guidano la ricerca delle cause di influenza dell'alterazione statica nelle variazioni puntuali di deviazione dal sistema istituito. L'alterazione del *pattern* è così indicata in termini spaziali sia di distanziamento delle coordinate di controllo del suo limite, che nell'addensamento delle componenti geometriche di scomposizione della sua forma.

Il conseguimento dell'immagine di descrizione statica si orienta, alle diverse scale, su una sequenza logica di interpretazione di forma e modulo, attuata nei principali processi di 'astrazione', 'selezione' e 'associazione'¹⁴, proprio attuando un percorso di *geometry processing*. Il processo prevede così l'individuazione dei tratti morfologici di distinzione, con il conseguimento del modulo geometrico di base che istituisce una relazione di conoscenza qualitativa dell'involucro strutturale, fino all'elaborazione del dato quantitativo del *continuum* conseguito nella misurabilità e natura numerica del *pattern* superficiale.

4.2.1. Il componente paramentale

Il modulo geometrico di base dell'apparato strutturale deriva dall'orditura dei paramenti storici, dove i piccoli dettagli formali, sia propri della tecnica costruttiva che come singolarità introdotte, contribuiscono all'influenza statica dell'intero sistema.

La qualità di tessitura, con un'attenzione stereotomica e di relazione con il sistema continuo, indirizza la rappresentazione conoscitiva a non limitarsi all'uniformità di insieme della superficie, ma a concentrare il dettaglio formale sulla natura geometrica di ogni spigolo, faccia, concio e blocco, pervenendo dall'incrocio delle informazioni bidimensionali visibili anche al suggerimento grafico della "terza dimensione" della materia¹⁵.

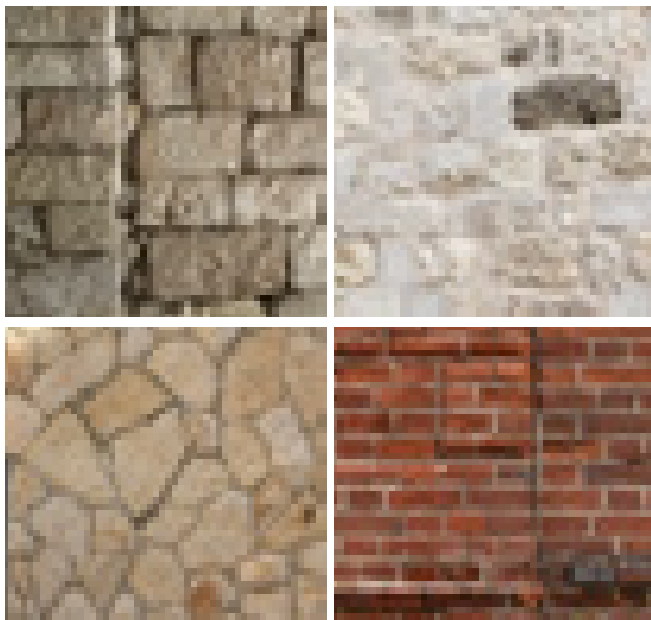


L'interpretazione delle strutture storiche richiama spesso una lettura integrata tra i segni formali dei paramenti murari, che identificano in modo combinato anche unità resistenti ed innesti edilizi.

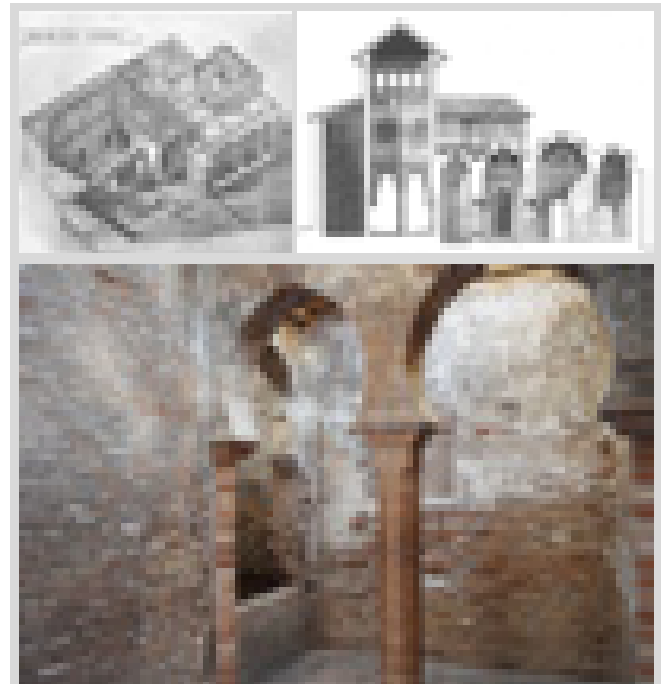
(4.5) Betlemme, forme e segni di trasformazioni costruttive, 2019.

Il “tratto” geometrico del modulo costituente¹⁶ si configura così come una ‘cellula’ contenente il patrimonio genetico dell’intera opera strutturale, similmente ad un ‘algoritmo’, e declina la rappresentazione nella determinazione di forma e dimensioni di murature, archi, volte e cupole. Non si tratta così di una semplice proiezione di concetti, ma di una procedura codificata di identificazione per parti degli ordini dimensionali di segno nella tessitura dell’involuppo strutturale, relazionando la trama morfologica di superficie alle modalità di carico attese ed alla resistenza statica richiesta¹⁷.

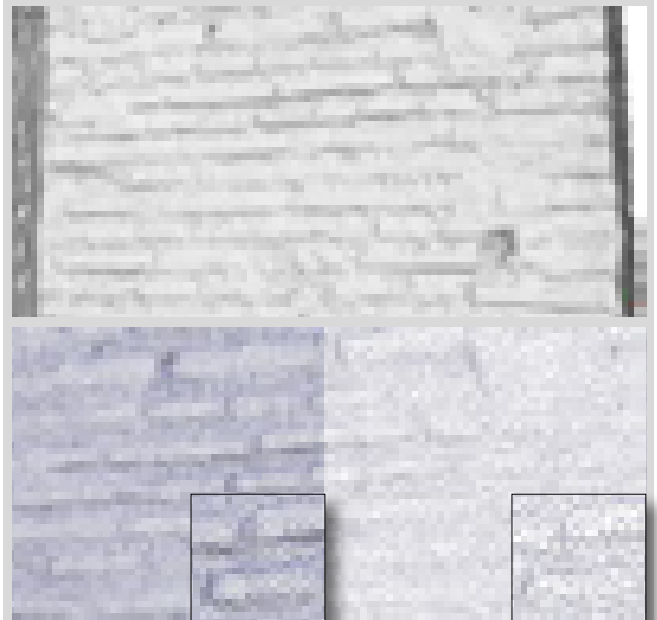
Il *target* dell’informazione grafica è impostato sul *pattern* di scomposizione della superficie di tessitura, il quale è comparato con l’archetipo tipologico in termini di frazionamento superficiale e orditura costruttiva. Le diverse relazioni in proporzioni e profili di giunzione tra blocchi e malta si assimilano alla composizione costruttiva dei moduli lignei, sagomati nell’intaglio a diversi gradi di sbazzatura e lisciatura. Ugualmente, la maglia tecnica dei telai predimensionati concentra la complessità di forma nell’incernierarsi di profili, nodi e bullonature.



Le trame consentite dalla forma singola dei blocchi e composta dei paramenti generano soluzioni singolari sia di texture che di plasticità superficiale. (4.6) Esempi di tipologie tessutarie in pietra e laterizio nelle strutture storiche documentate tra Medio Oriente e Russia.



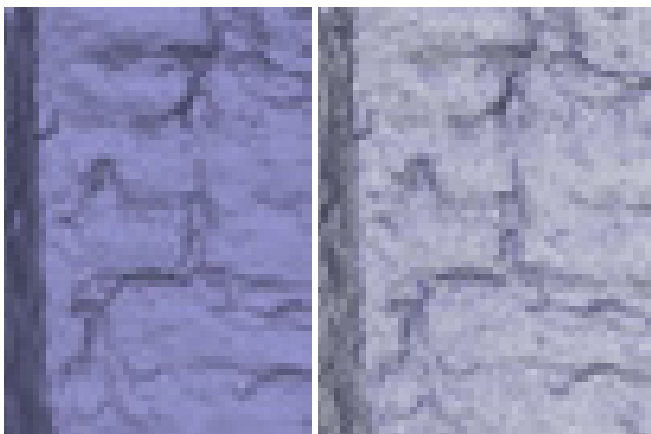
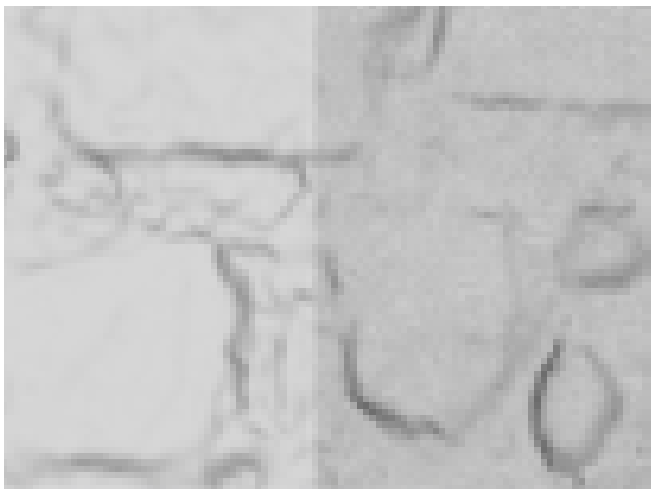
Le murature storiche nei Bagnos della Mesquita dell’Alhambra. (4.7) Disegni storici ed interni con stratificazioni murarie, 2017.



I gradi di semplificazione attuati con il *geometry processing* possono indurre a differenti interpretazioni della forma strutturale. Oltre una certa soglia l’astrattizzazione del *pattern* è assimilabile al piano. (4.8) Scomposizione a diverse densità di poligoni dei paramenti.

Alterazioni tessuarie, segni di tracciamento della pietra, intagli di giunzione, chiodature e ganci metallici si configurano in tal modo come componenti plastici della forma strutturale, che generano una variazione superficiale associata, nell'idea di *unicum* limitato, allo schema di nodi e vincoli di rigidità ed incastro geometrico nell'ideale uniformità del paramento e, graficamente, come una manipolazione del *continuum* superficiale per estrusione e penetrazione di forma.

L'impatto del grado di mimesi della scomposizione poligonale risultando tanto più influente sulla leggibilità della struttura attraverso il pattern, quanto più la superficie presenta ricchezza di irregolarità ed alterazioni. Quando la morfologia dell'involuppo si avvicina all'ideale di ordine geometrico di progetto (come forma, integrità, disposizione), la descrizione rappresentativa si riavvicina al disegno bidimensionale. Esempi di geometry processing nella scomposizione poligonale di (4.9) muratura conservata, (4.10) muratura degradata.



4.2.2. L'unità resistente

Il componente unitario introduce, oltre ad una maggiore complessità costruttiva, un salto di scala di percezione in termini sia dimensionali che formali. Tale osservazione è legata da un lato alla geometria degli elementi paramentali che ne compongono l'involuppo architettonico, dall'altro alle relazioni tensionali generate nei punti di contatto tra i singoli componenti resistenti, con la definizione di una più ampia geometria statica del sistema.

La forma strutturale dell'unità, spesso prodotto di sistemi eterogenei, è resa dalla composizione di setti, orizzontamenti e coperture giuntate attraverso elementi di blocco, listelli, fasce ed agganci tra porzioni, interpretabili come innesti morfologici nello schema compiuto della fabbrica. Tale varietà produce un quadro frammentato di distribuzioni statiche nella struttura, a sua volta soggetta a processi di invecchiamento differenziati, più complessi ed imprevedibili nella dinamica degli equilibri tensionali rispetto alle singole porzioni omogenee.

La relazione tra gli elementi costitutivi dell'unità è assimilabile alla concatenazione di 'scatole' o 'gusci' statici, con soluzioni di insieme che vincolano moduli alternamente separati, accostati o compenetranti nelle configurazioni interne o di contorno. L'influenza del peso proprio della struttura e dei pesi portati, diversamente gravanti, si unisce al rilascio di vincoli interni ed al contorno, generando un complesso schema plastico modulato per direzioni ed intensità di tensione.

Si arriva presto a comprendere come tra la condizione geometrica del modello ideale ed il contesto reale persista un ampio intervallo di variazione qualitativa della forma strutturale, legato alla regola costruttiva ed allo stato di degrado e conservazione della fabbrica. La deformazione delle unità, per influenza della materia o di patine sovrapposte, introduce fattori di imperfezione¹⁸ che vanno costituendo, per il modulo geometrico di scomposizione, parametri di alterazione sia superficiale che volumica.

Dove la superficie strutturale segue curvature, strozzature o variazioni tali da identificare elementi che non solo morfologicamente ma anche meccanicamente si comportano come entità omogenee diversificate, la scala dell'unità resistente prende il sopravvento.

Nella pagina a fianco: (4.11) portico della Moschea di Al Jazaar, San Giovanni d'Acri, Israele, 2017, unità strutturali delle campate voltate.

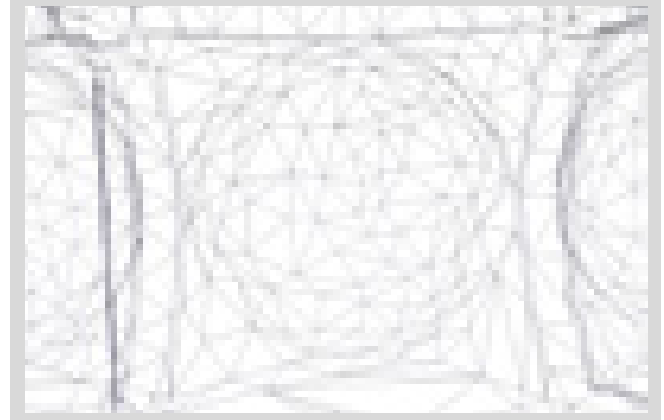
La differenza di scala, rispetto al componente paramentale, implica così da parte del modulo del *pattern* la gestione di una porzione superficiale interpretata sulla riconoscibilità di curve di livello e direttrici di sforzo influenzanti la variazione della forma, le quali si sbilanciano dalla singolarità della cellula costruttiva verso una macro-visione dell'unità. La forma strutturale è derivata come superficie a più curvatures, con un'entità di involuppo che connette gli elementi della struttura in una maglia, geometrica e tensionale, di azioni meccaniche agenti a plasmare il *pattern*, che giace in equilibrio per controbilanciate reazioni vincolari interne al contorno. In tale quadro, ogni sconnessione, cerniera, lesione o espulsione di un componente o di una sua parte, sia essa tessuaria (come un blocco murario) o unitaria (come un fuso voltato), costituisce un segnale di insufficienza nell'integrità del *continuum*, anticipando in termini formali il fenomeno di collasso con la frammentazione dell'unitarietà superficiale, prima in continuità poi in distacco ed infine espulsione dal dominio strutturale.

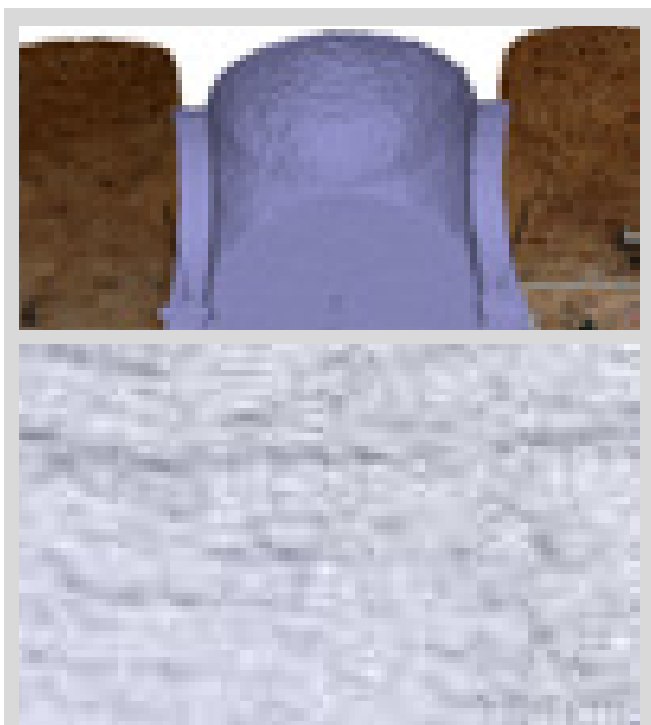


(4.12) Volte ottomane presso la Moschea di Al Jazar ad Acri, Israele
L'integrità dell'unità resistente introduce diverse scale di lettura della sua entità: quella unitaria, di sistema rigido, quella per componenti, come macro-blocchi di interazione statico-costruttiva, e quella paramentale, per elementi di tessitura.

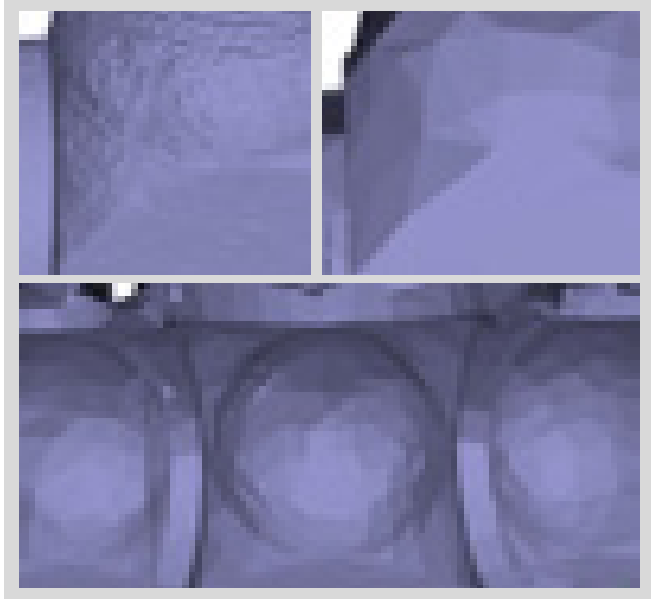
Il grado di mimesi applicato dal *geometry processing*, come densità del modulo di *pattern*, aiuta a visualizzare questa distinzione, e ne orienta il fine computazionale di meccanica della struttura.

(4.13-4.14) scomposizione poligonale applicata alla tessitura di intradosso delle campate di Al Jazar; verso la sintesi geometrica.





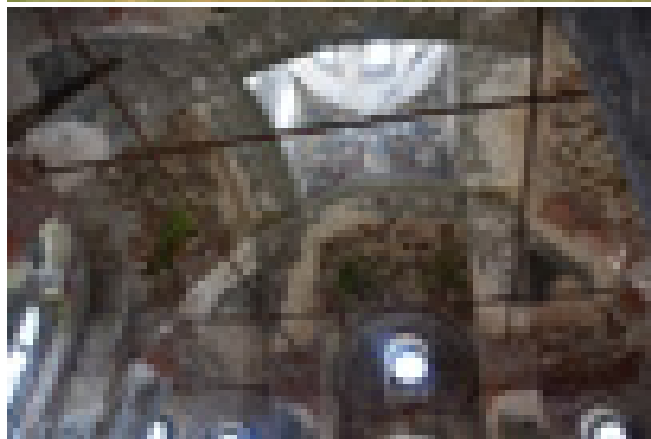
Se la consapevolezza della morfologia strutturale è portata al livello dell'orditura dei singoli elementi, allora l'analisi delle instabilità meccaniche può definire con più precisione le cause del fenomeno. La semplificazione del pattern non sempre causa un'approssimazione nella diagnosi, quanto più con la causa ed entità di tale diagnosi. (4.15-4.19) gradi di astrazione nel geometry processing dell'unità resistente.



4.2.3. Il complesso storico

Il complesso storico declina l'imperfezione morfologica alla scala di stratificazione unitaria delle fasi evolutive fisiche e meccaniche dell'edificio.

Le vicissitudini costruttive vedono una profonda e reciproca influenza tra forma e struttura, in un percorso di cambiamento e adattamento delle unità resistenti tra episodi di rifunzionalizzazione e ricostruzione, sia integrativa che sostitutiva. Il segno formale di tali azioni sul sistema strutturale è da intendersi non solo nelle variazioni di distribuzione spaziale e connessione di ambienti per lo sviluppo del comparto, ma anche rimarcando la scala del dettaglio paramentale, nella quale risulta più evidente, anche se a volte inaccessibile¹⁹, osservare soluzioni di incastro e continuità, o la loro assenza, operate tra i diversi comparti stratificati.



Chiesa di St. Peter e Paul a Taman, Russia.

(4.20) Documentazione del complesso e delle sue strutture, 2018.

La varietà dell'impianto strutturale nella composizione stratificata applica un processo di penetrazione ed estrusione della forma, risolvendo attraverso blocchi spaziali ed ambienti innestati la conformazione statica di progetto e gli schemi parziali di redistribuzione dei carichi. È il caso di porzioni edificate aggiunte al complesso principale in soluzione di continuità, interventi di connessione distributiva tra fabbricati indipendenti, rimaneggiamenti e variazioni funzionali e spaziali, fino a raggiungere il limite dell'aggregato urbano. Sono da considerare anche modifiche di sopraelevazione e interrimento di livelli costruiti, influenzanti la statica del complesso sia nei vincoli al terreno che nella distribuzione di masse in sommità.²⁰

Il complesso architettonico si configura così come un modello composto di caratteristiche formali, funzionali/distributive e statiche, che coinvolgono una suddivisione logica in unità di connessione, preesistenze, ammorsature ed innesti, nel duplice carattere di ammorsamento o tamponamento²¹. In tale aspetto risiede la chiave di lettura ed interpretazione delle variazioni morfologiche osservabili sulla superficie strutturale, spesso celate all'interno di spessori murari di giunzione, ma rintracciabili come alterazione statica sui paramenti connessi.

Il target di rappresentazione è così quello di far emergere tratti e qualità formali delle stratificazioni esistenti, deducibili in modo puntuale nell'affidabilità del dettaglio di imperfezione locale ma comprensibili alla scala globale solo attraverso opportune discretizzazioni della forma. L'azione di rappresentazione è chiamata ad interpretare rapporti geometrici relativi tra elementi di connessione, ammorsature e cavità, classificando la presenza di unità di trasformazione, sostituzione, aggiunta e sovrapposizione per individuare i componenti con funzione statica portante. Il *pattern* superficiale, sagomato e curvato a raggiungere una natura caratteristicamente volumetrica, affida in modo crescente l'analisi statica non solo all'informazione di contorno della maglia superficiale, o al suo modulo costituente, ma più propriamente alla qualità dello spazio compreso tra le delimitazioni del *continuum* in corrispondenza dello spessore strutturale. L'identità del *pattern* si declina così in termini di estensione e connessione, e la richiesta di completezza della conoscenza spaziale è indirizzata verso la garanzia di una 'tenuta stagna' del limite morfologico.



Oltre le finiture (spesso illusorie) delle superfici, il rapporto formale tra unità, connessioni e componenti rimane il target del pattern nel geometry processing applicato al complesso strutturale. (4.21-4.25) geometry processing su un nodo strutturale nella chiesa di Taman.



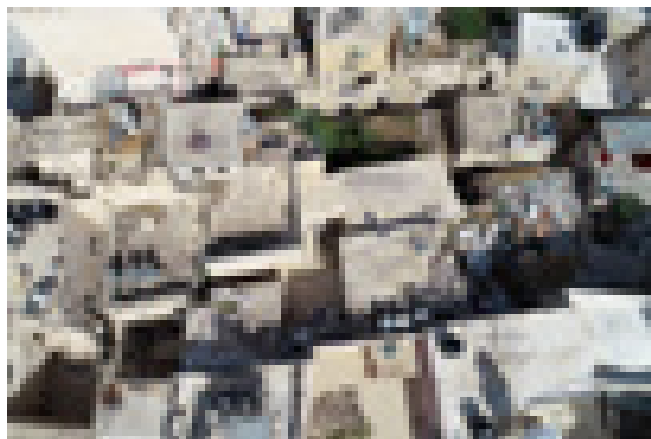
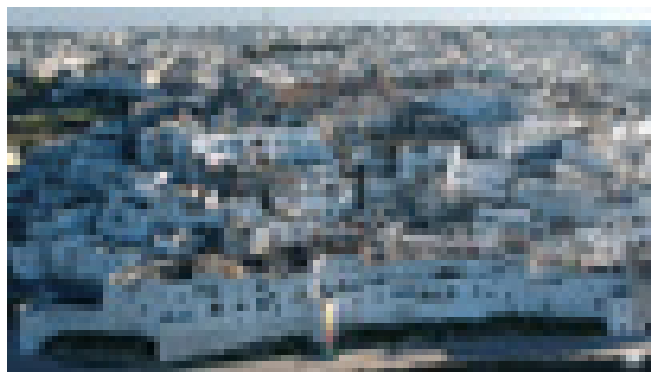


(4.26-4.28) Rapporti tra struttura e forma, con correlazione statica, nelle unità di scomposizione del complesso storico.

4.2.4. L'aggregato urbano

L'aggregato urbano istituisce l'estensione più complessa di indagine strutturale, identificando un insieme non omogeneo di unità interconnesse alla scala insediativa con ripartizione statica variabilmente efficace²².

La connessione tra unità è data dall'evoluzione del tessuto urbano per successivo intasamento degli spazi liberi, sfruttando i muri di confine tra più costruzioni per la chiusura di scatole murarie non sempre originariamente concluse. Si identifica in tal modo un processo organico di aggregazione dove lo schema strutturale si espande ad una interpretazione estensiva del costruito, analizzato in termini formali e meccanici in virtù delle varianti tipologiche stratificatevisi.

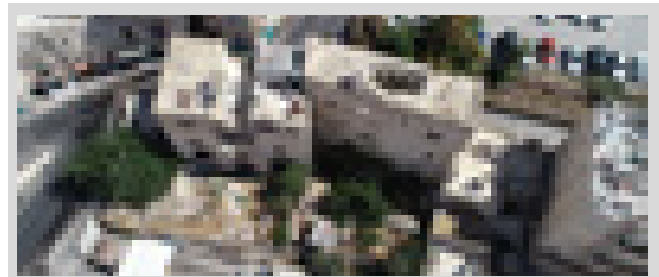


Dimensioni di interconnessione alla scala urbana tra unità strutturali. Dall'alto (4.29) Ostuni, Italia; (4.30) Betlemme, Palestina.

Nell'identità della città storica, l'espansione della singola unità edilizia è la premessa all'intero tessuto insediativo, con la pratica di istituire morse sporgenti, paramentali o di blocco, lasciate ad accogliere innesti successivi. Il sistema di vincolo risulta così soggetto a continue variazioni, modificando ed includendo caratteri al contorno in nuove giunzioni interne, e continuando ad aggiornare la gerarchia strutturale tra elementi primari di supporto ed elementi supportati. La macrostruttura della città si accresce con la composizione di strutture contigue e continuità del sistema, sviluppando dallo schema monolitico della scatola muraria il rapporto tra l'unità formale ed il tessuto edilizio²³.

Il target di rappresentazione, oltre alle qualità formali delle unità resistenti, viene ad includere il dettaglio di sistemi di connessione, cantonali, traverse lignee ed incatenamenti, come dato di informazione puntuale a sua volta indice di una più estesa comprensione statica globale dell'aggregato. L'identificazione di elementi di collegamento e ammorsamenti di continuità guida la mappatura degli episodi di vulnerabilità, in corrispondenza di superfetazioni di saturazione, aderenze ed irrigidimenti non complanari. Allo stesso modo, la presenza di entità di connessione tridimensionali, come diaframmi, archi di scarico, soprastrutture edilizie, ponti ed elementi trasversali, diviene dichiarazione morfologica esplicita della non autonomia strutturale delle unità²⁴.

La manipolazione del *pattern* superficiale combina così una conformazione al contempo bidimensionale e a 3 dimensioni. L'estensione dell'aggregato riporta l'analisi del continuum superficiale come involuppo identitario unificato, sul quale si rispecchiano localmente le influenze formali generate dalla combinata relazione tra differenti unità strutturali del tessuto. La forma della 'pelle urbana', filtrata del rumore di infrastrutture ed impianti antropici, traspone in un unico atto rappresentativo un insieme combinato di caratteristiche dove la lettura dell'imperfezione morfologica è tanto più espressiva della ragione statica quanto più restano codificate le sue cause di degenerazione. L'involucro, carico dei segni meccanici dalla scala costruttiva alla definizione dei blocchi rigidi cinematici relaziona la qualità bidimensionale della superficie strutturale all'influenza tridimensionale delle soluzioni di connessione. Tale forma consolida un processo di analisi della meccanica strutturale urbana al contempo concentrato su una scomposizione semantica delle superfici e sulla suddivisione modulare del suo *continuum*.

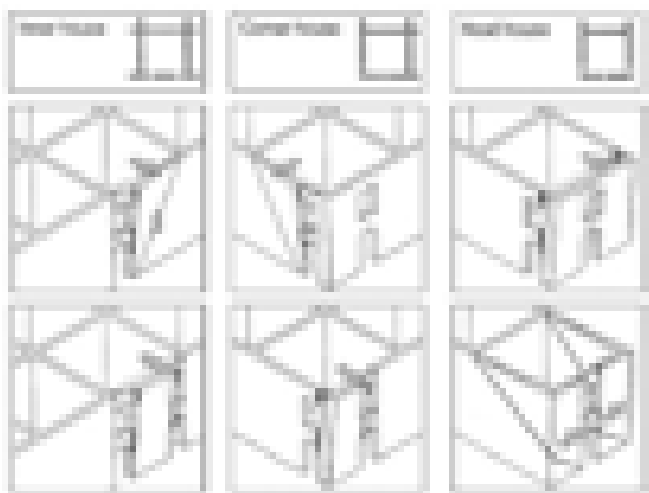
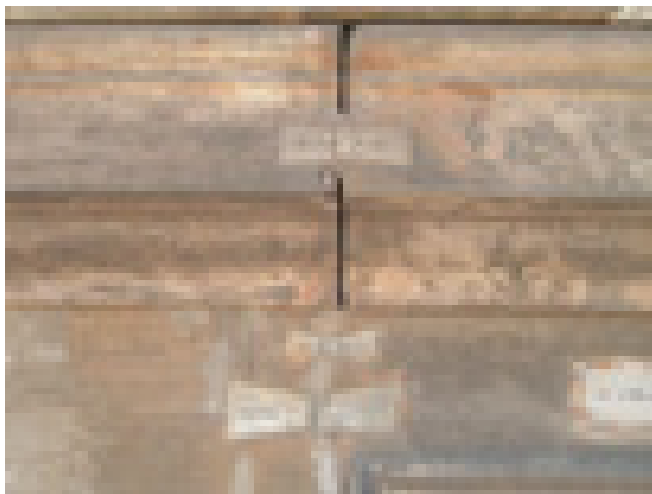


Modulazione del geometry processing sull'aggregato urbano, dalla riconoscibilità delle unità edilizie assemblate alla semplificazione volumica. Sopra: Betlemme, (4.31) complessità urbana e (4.32) modulazione estensiva del pattern. Sotto (4.33) densità per la riconoscibilità tessuaria, e (4.34) astrazione verso la componente unitaria.



4.2.5. Tipologie e scale formali del dissesto deformativo

L'impronta fisica di eventi statici e cinematici sull'architettura permette di riscontrare aspetti tensionali e fenomeni meccanici in caratteri di complessiva natura morfologica. Lo sviluppo di tensioni interne all'involucro strutturale del sistema, per definizione inferiori a quelle ammesse per geometria e materiali utilizzati²⁵, garantisce la coesistenza di una 'forma' integra quale soggetto di indagine per le sue qualità misurabili di stabilità.



Scale di lettura del dissesto meccanico sulle fabbriche costruttive.
(4.35) Spie e fessurimetri per la valutazione locale di estensione del ciglio di fessurazione; (4.36) lesioni passanti influenzanti il distacco alla scala dell'unità strutturale.

La forma, quale integrale delle ragioni tecniche del corpo architettonico²⁶, concretizza la memoria fisica di deformazioni e spostamenti subiti dalle strutture resistenti, sia per porzioni estese di paramenti che in danni puntuali su blocchi murari. In tal modo, la sua analisi si pone come chiave di lettura analitica per la configurazione tematica di fratture, *drifts*, centri di rotazione e tensioni, espressi in meccanismi di rottura e di collasso. La conseguenza è che l'alterazione del regime di equilibrio della struttura genera in prima istanza variazioni plastiche della forma geometrica, come spostamenti verticali, di rotazione o loro combinazioni, fino all'insorgere di fessurazioni e *crack*, come interruzioni nella continuità materica della struttura.

Una volta avvenuta un'alterazione nell'equilibrio elastico, la struttura inizia a deformarsi alla ricerca di una nuova condizione di equilibrio, e se questa non risulta più compatibile con i limiti di resistenza dei materiali di cui è costituita si innesca la comparsa di lesioni e dissesti della struttura²⁷, fino al completo distacco di componenti e la corrispondente perdita di forma. La deformazione, principale parametro diagnostico, si presenta al momento del collasso dei vicoli interni per il mantenimento dell'integrità di contorno, con sconnessioni che assumono forme differenti (cerniere cilindriche, lesioni, scivolamento, espulsione) in rapporto alla differente azione cinematica in atto (spingente, carico di punta, martellamento, vibrazioni asincrone)²⁸.

La conoscenza dell'opera architettonica per caratteri 'formali', interagenti ed indirizzanti quelli 'strutturali' e 'costruttivi', indirizza l'osservazione di meccanismi strutturali sia nel complesso che per parti, incoraggiando il confronto delle influenze nella modellazione superficiale dell'involucro per vicissitudini costruttive, fasi di evoluzione storica e danni di debolezza intrinseca. È la premessa alla derivazione di 'prototipi' di danno relativi alle 'tipologie di collasso', dove la conoscenza di dimensioni e disposizioni di tessiture parziali, nelle soluzioni di angolo o di facciata, ha sviluppato lo studio di quadri di frattura e porzioni di ribaltamento macroscopicamente standardizzate²⁹. Sono così istituiti modi primari di danno, nel ribaltamento di pareti esterne, e modi secondari di danno, con lesioni che tagliano diagonalmente il pieno dei paramenti, amplificate dal 'meccanismo duttile' del materiale senza perdita di equilibrio locale.

4.3. LIVELLI DI CONOSCENZA E LINEE DI INDIRIZZO PER L'APPROCCIO COGNITIVO ALL'IMMAGINE STRUTTURALE

L'applicazione di pratiche di tutela al patrimonio storico architettonico, sia nell'ambito di interventi di conservazione che nel caso di progetti di riuso e riabilitazione funzionale, pone in evidenza la necessità di supporti dettagliati per l'analisi dei complessi strutturali, in particolare all'interno di contesti consolidati e nuclei storici urbani.

Nell'ampia cornice dei piani di documentazione per la gestione, la crescente frequenza ed impatto sul patrimonio costruito delle azioni di carattere strutturale, in particolare eventi tellurici, attiva concretamente, in brevi tempi, percorsi di evoluzione tensionale altrimenti distribuiti nel tempo tanto da passare inosservati, pur se presenti. Terremoti e calamità naturali in Europa rinnovano con continuità la sensibilità dell'opinione pubblica e delle amministrazioni nei confronti del valore del patrimonio costruito e dell'assenza di sistemi e prodotti di documentazione adeguati che ne permettano interventi di restauro o ricostruzione, in particolare a seguito di fenomeni di collasso di monumenti o intere porzioni di città.

La complessità compositiva e la stratificazione sia formale-storica che costruttiva-tecnologica, riportano il problema conoscitivo a livelli di analisi dai quali organizzare una struttura dell'indagine fondata sull'oggetto del rilievo³⁰ e alla quale poter associare livelli di conoscenza³¹ necessari per lo sviluppo di attività progettuali e di riabilitazione sul patrimonio. In tal modo, l'analisi istituita configura un insieme di pratiche conoscitive e di metodologie finalizzate alla misurazione e al dimensionamento delle porzioni morfologiche della 'pelle resistente' per dedurre le forze che agiscono su un determinato sistema. Tale approccio favorisce valutazioni mirate allo studio della vulnerabilità e della resistenza dei materiali, dove alla disciplina della rappresentazione viene sempre più richiesto l'importante compito di governare la complessità del reale per fornire strumenti di controllo sui quali fondare l'intero apparato di studio.

La capacità di controllare la complessità morfologica e di definire configurazioni rappresentative che comunichino i fenomeni reali, associando a forme e modelli descrittivi dei contenuti sulle caratteristiche fisiche di ciascun

elemento resistente, pone il rilievo architettonico in un ruolo privilegiato, in un contesto di tangenza a numerose discipline che devono oggi confrontarsi con una rinnovata rappresentazione dei meccanismi architettonici. Dal disegno si fondano osservazioni e considerazioni sui comportamenti statici e dinamici degli apparati murari e sempre più è il disegno a qualificare l'identità di qualunque apparato fisico presente in un contesto architettonico.

Le tradizionali pratiche di intervento per la prevenzione sismica³², ad esempio, prevedono la computazione di indici quantitativi e la redazione di "schede di vulnerabilità" degli edifici, ma tali operazioni sono solite produrre elaborati codificati, di carattere preferenzialmente numerico e diagrammatico che, pur definendo puntualmente parametri cinematici univoci, manifestano difficoltà nella comunicazione anche dei soli dati strutturali. In questo senso il disegno e il rilievo si affermano qualificando graficamente il dato per una coerente trasmissione critica e funzionale all'intervento.

Il controllo della complessità è centrale e il disegno, contenitore di dati, descrittori e valori associati a ciascun segno, si qualifica nell'affidabilità, sviluppata a partire dalla forma per trarre da essa una corrispondenza meccanica. Le diverse procedure di trasformazione dell'informazione, fondate sulla manipolazione dell'immagine, consentono così al disegnatore-rilevatore di mantenere il controllo, in modo discreto, sulla complessità del reale, e di strutturare una realtà 'trasposta', simulata attraverso il disegno e quindi virtualmente ma illimitatamente manipolabile.

*"Se il disegno è dunque un contenitore di molteplici contenitori, corrispondenti alle diverse applicazioni [...] ecco che il limite verticale tra l'approfondimento tra le diverse aree di interesse che riguardano una scena diventa oggetto di indagine e riflessione. Il limite tutto estetico tra rappresentazione realistica e sintesi astratta dovrà cercare di formularsi in modo da consentire al meglio una rappresentazione dei tanti frammenti che compongono la scena e il disegno architettonico, ai fini documentali, dovrà cercare di descrivere fin nel dettaglio lo stato reale dei luoghi."*³³

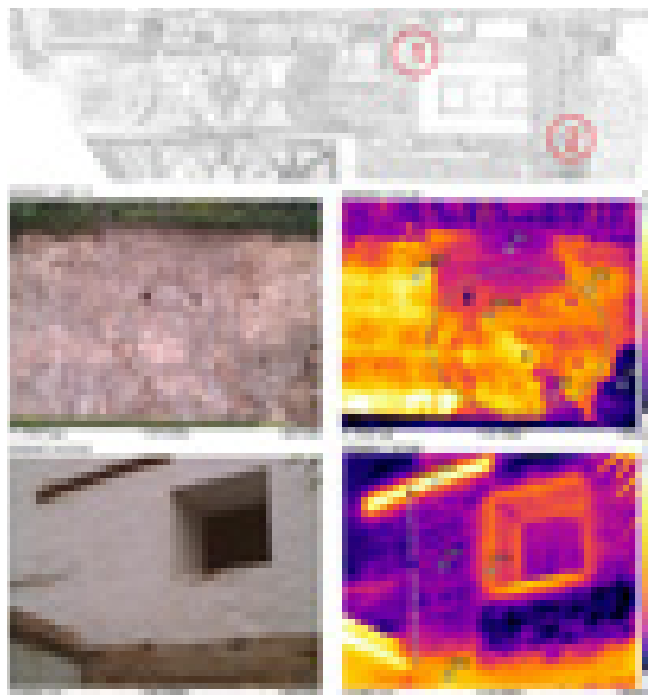
4.3.1. La discretizzazione dell'informazione morfologica dalle indagini non invasive.

La disponibilità di informazioni di documentazione sull'apparato strutturale è influenzata dalla differente applicazione di strumenti e pratiche di discretizzazione del dato sull'informazione morfologica³⁴, che in funzione del rarefatto valore attribuito coinvolgono in misura maggiore il rischio di un'interpretazione meccanica aprioristica.

Le procedure di indagine conoscitiva³⁵ sui sistemi di carattere storico coinvolgono in primo luogo azioni legate ad un'osservazione 'diretta' e 'superficiale' degli apparati, intesa come limitata alla superficie esterna direttamente osservabile della struttura. Il coinvolgimento dell'operatore rilevatore è condotto in termini non solo oggettivi, di identificazione 'a vista' delle irregolarità morfologiche, ma con un'attività in sito declinata all'elaborazione logico-grafica della conoscenza acquisita. La mappatura di quadri fessurativi e *frame* di lesione, così come la lettura di inclinometri, barre estensimetriche e misuratori di giunto, applica una sequenza di atti di 'selezione' e 'associazione' tra identità morfologiche rilevate e schemi di interpretazione statica, con un percorso in tutto simile a quello della rappresentazione³⁶. Non è casuale, quindi, che il prodotto preliminare di tali approcci risulti proprio quello della 'rappresentazione' degli stati di danno, intendendo ogni prodotto info-grafico di carattere cartaceo, fotografico o digitale.

Lo stato dell'arte nel campo della documentazione dispone anche di una discreta revisione di strumenti non invasivi che consentono di andare oltre la superficie dell'involucro resistente, fornendo così indicazioni sulla sua consistenza materica e di alterazione. Tali pratiche basano il loro funzionamento nella misurazione di parametri fisici 'quantitativi', quali temperatura e rifrazione acustica, acquisiti in modo automatico ed algoritmico e solo successivamente interpretati e restituiti in termini 'qualitativi' attraverso diagrammi lineari o parametri RGB nella forma di *colormaps*.

La principale applicazione riguarda indagini di tipo 'termografico', condotte con termocamere sulle superfici architettoniche, evidenziando innesti, preesistenze strutturali ed eventuali anomalie costruttive, lesioni o cavità, attraverso la misurazione dell'energia elettromagnetica emessa dall'organismo edilizio nella banda dell'infrarosso. Con analogo principio, è possibile affiancare le indagini soniche ed ultrasoniche, pacometriche, tomografiche o



Lettura delle stratificazioni strutturali tramite mappatura termografica. (4.37-4.38) applicazione nel complesso del Generalife dell'Alhambra (prof. Rafael Garcia Quesada, all'interno del progetto congiunto tra Università di Pavia e Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Granada).

con radar, dove la propagazione di impulsi sonori emessi da sonde può qualificare, nel grado di discontinuità, le caratteristiche morfologiche della sezione trasversale, individuando la presenza di cavità, vuoti, componenti disomogenei, difetti o lesioni.³⁷

La riflessione sul dato derivante da tali sistemi si presenta così in un duplice aspetto: come parzializzazione referenziata dell'informazione morfologica acquisita, frammentata per porzioni contenute di paramento gestibili dal supporto camera degli strumenti, e per le modalità di sua trasposizione grafica, mai direttamente tridimensionale ma per piani di inquadratura piana. La natura di tali prodotti, di necessaria integrazione per una lettura referenziata ed estesa al *continuum*, sopperisce così spesso alla precisione scientifica della misurazione fisica conseguita dagli strumenti, generando approssimazioni e scarti geometrici nella loro ricomposizione combinata.

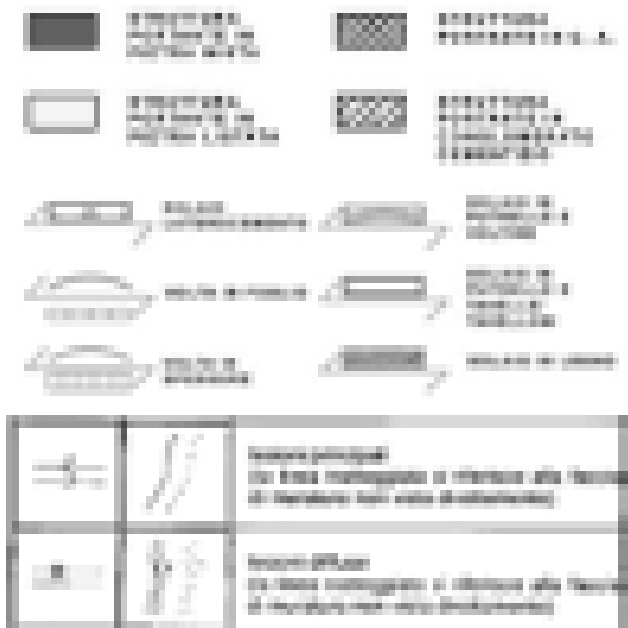
4.3.2. Indicatori e convenzioni di normalizzazione nella grafica del rilievo strutturale

Il rilievo del sistema strutturale concentra le necessità comunicative del disegno sulla rappresentazione degli elementi nelle combinate valenze morfologiche-tecnologiche-costruttive, secondo relazioni spaziali e funzionali di gerarchia costruttiva, geometria di impianto ed articolazione plano-altimetrica. Tali requisiti, condensati di una sempre maggiore consapevolezza cognitiva, sono stati orientati nel tempo verso uno sviluppo grafico uniformemente standardizzato.

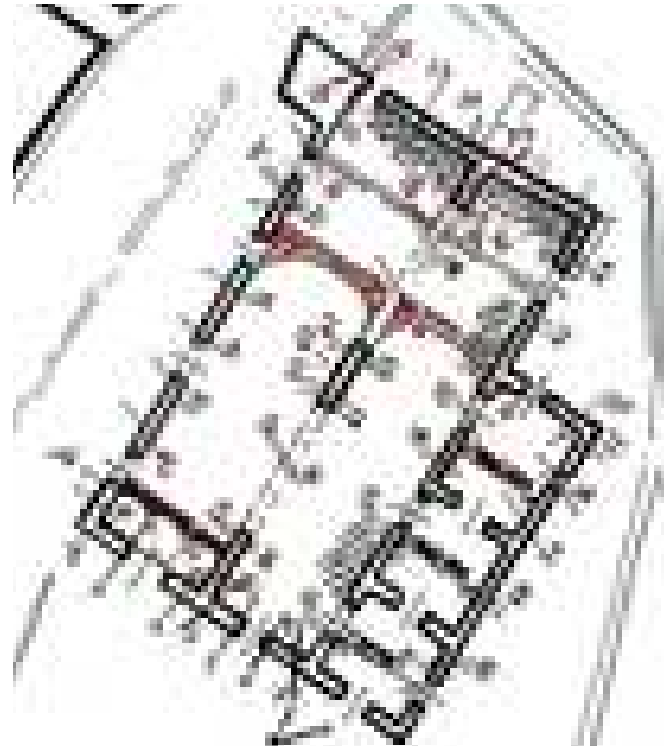
La pratica rappresentativa ha integrato tali informazioni agli elaborati standard del disegno, planimetrie e sezioni, con l'obiettivo di indicizzare tecnicamente le informazioni sulle tipologie di strutture prevalenti, palinsesti murari e discontinuità. Riguardo agli impalcati, orditure, coperture, materiali e loro dimensioni sono stati graficizzati cercando soluzioni più dense ma altrettanto leggibili rispetto alle impostazioni assonometriche di spaccati e sfogliati,

chiaramente ordinati e più chiari ma privi di possibilità complessive di dimensionamento. Le volte, in termini di informazione tipologica fortemente supportata dal dato geometrico, hanno invece condotto ad un'attenzione maggiore verso la qualità di curvatura e imposta, per derivare la massa e le modalità di spinta di scarico tensionale.

In tale contesto, l'affermazione di segni grafici, simboli e legende tecniche ha impostato il linguaggio della rappresentazione strutturale verso un vocabolario standardizzato di icone e rimandi grafici universalmente riconoscibili, carenti però nella ricchezza descrittiva sul significato conoscitivo dell'immagine, la cui precisione identificativa è accennata in soli termini quantitativi³⁸. Partendo dalla normalizzazione di quotatura, è possibile riscontrare l'uso di retini applicati su campiture più o meno sagomate: rettangolari per indicare in modo generico una corrispondente tipologia materica già declinata in termini tecnologici (struttura portante in pietra, pietra mista, pietra listata, laterizio, c.a., conglomerato cementizio, ecc...), o applicati a forme iconiche come arcate e listature orizzontali



Nella pagina seguente, da sinistra: (4.39) Simbologia codificata di informazione geometrico-costruttiva per la rappresentazione strutturale. Sotto (4.40) Caso di mappatura ed identificazione dei quadri di lesione.



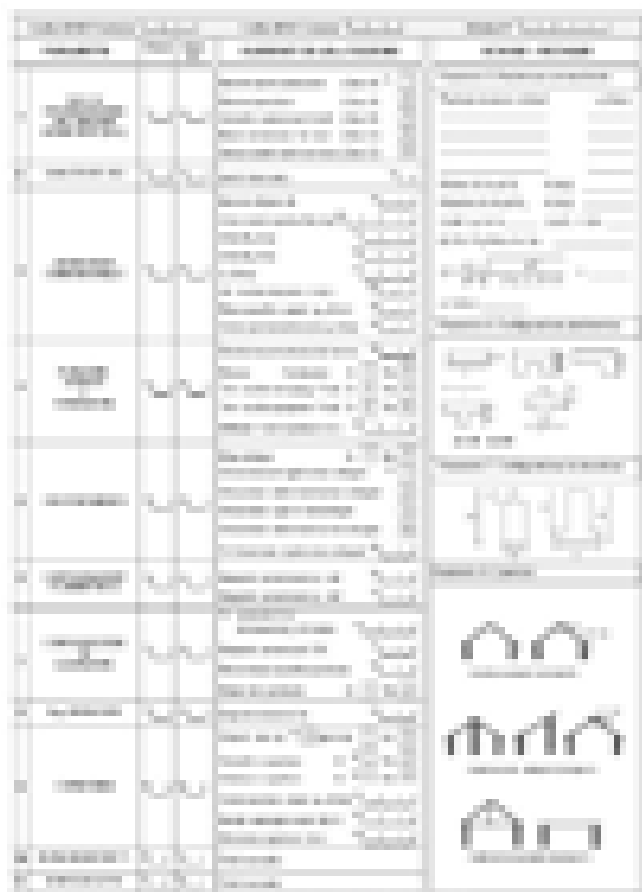
per indicare oltre al materiale una particolare soluzione costruttiva di base (volte in muratura, mattoni di taglio o di foglio, o solai in latero cemento, putrelle, voltine, tavelle/tavelloni, lignei o voltati in foglio o in spessore, ecc...).

Anche in termini di dissesti, la rappresentazione delle lesioni è ricondotta ad una sintesi di segno come segmento lineare, su singola o doppia estremità a seconda della natura superficiale o passante della lesione, o riproposta a sagoma multipla per indicarne un fenomeno di diffusione; l'aggiunta di soluzioni grafiche di apporto 'vettoriale' recanti un'ulteriore informazione di direzione e verso, come frecce, è applicata nel caso di un senso riconosciuto di propagazione.

L'istituzione di tali 'indicatori' evidenzia la volontà di rappresentare il sistema strutturale con modalità di consapevoli ed intenzionali, ricercate in un repertorio di qualità sintetica per comunicare altrettante definite denotazioni³⁹. In tal modo, le soluzioni grafiche adottate aggiungono integrazioni conoscitive più particolareggiate rispetto al dato geometrico già espresso dagli elaborati del rilievo, ma risultano ancora non abbastanza definite e personalizzate rispetto alla dimensione ed incisione di dati fisico-meccanici e di univoca identificazione del dissesto.

Se è riconosciuto che *"un rilievo può essere realizzato e graficizzato correttamente ma può [comunque] non contenere al suo interno le informazioni necessarie tecniche a redigere le verifiche richieste dalla normativa"*⁴⁰, allora diviene necessario che esso sia corredato da ulteriori dati difficilmente esprimibili nelle pratiche tradizionali del disegno, e fino ad oggi allegati nella forma di testi e schedature di sintesi. L'attuale panorama ne fornisce un ampio e puntuale catalogo, derivato dalla sperimentazione di iniziative di ricerca scientifica sulla valutazione di vulnerabilità strutturali⁴¹. Tra le molte tipologie di scheda, si richiamano AeDES, CNR-GNDT, FaMIVE, MEDEA, oltre a quelle appositamente istituite da organi operanti in condizioni di emergenza quali la Protezione Civile, che raccolgono in sezioni e descrittori rigidamente definiti la variabile classificazione di stati di danno, dissesti, instabilità, lesioni (classificate uniformemente su andamento, entità, estensione, sviluppo, ampiezza e profondità), deformazioni e infine cinematismi (riconosciuti nell'apertura di cigli, direzione delle fratture, centri di rotazione, e correlati a meccanismi di collasso e di rottura).

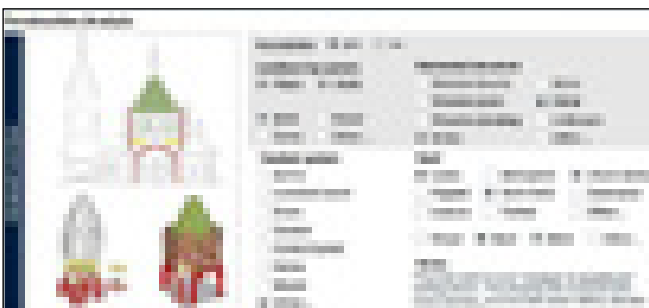
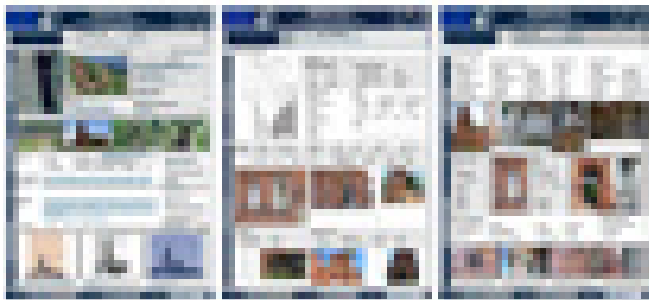
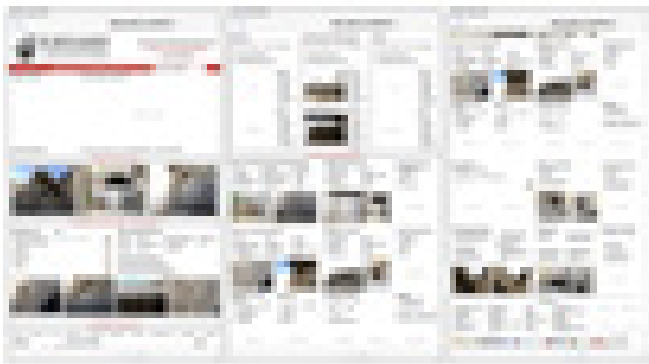
Tali procedure hanno instaurato un percorso conoscitivo orientato versol'integrazione del disegno con settori coesistenti



Le definizioni di schede di instabilità strutturale è molteplice, e frammenta il linguaggio della loro descrizione tra i diversi operatori. Sopra Dall'alto (4.40) Scheda di Vulnerabilità di II livello GNDT. A lato, dall'alto: (4.41) Scheda AeDES per unità strutturale.

Nella pagina seguente: Schede di censimento e valutazione strutturale progettate all'interno di progetti di ricerca internazionali. (4.42) Scheda per gli aggregati del centro storico di Betlemme (in collaborazione con l'amministrazione territoriale locale); (4.43) (4.44) scheda censuaria per complessi monumentali dell'Upper Kama (progettata all'interno del progetto PROMETHEUS in collaborazione con gli esperti in tecnologie strutturali dell'Universitat Politècnica de Valencia).

di informazioni, in particolar modo reperite dall'osservazione diretta della struttura ma collocate in dimensioni geometriche ed informative di complessa combinazione. Questa riflessione affaccia l'ipotesi che l'inadeguatezza grafica riscontrata non sia imputabile tanto al disegno stesso, quanto alle modalità di elaborazione ed interazione con le sue forme, ancora non adeguatamente applicate e conseguite per un grado di informazione completo.



4.3.3. Disposizioni e richieste conoscitive in materia strutturale nella pratica normativa

La Normativa Tecnica Italiana⁴² ha da tempo posto in evidenza il problema della documentazione architettonica per la valutazione strutturale, sviluppando sistemi di Fattori di Confidenza e Livelli di Conoscenza⁴³ che a partire dal grado di affidabilità delle indagini di rilevamento permettessero un'opportuna valutazione dei parametri ingegneristici utilizzati nei calcoli strutturali e nelle simulazioni dinamiche. Questa corretta richiesta legislativa si scontra però con una criticità documentativa nella capacità di fornire sistemi di rappresentazione delle realtà strutturali, e sembra rafforzare l'erronea convinzione che limitate valutazioni puntuali estese poi in modo omogeneo agli interi sistemi di unità possano essere sufficienti ad un quadro complessivo dell'opera strutturale. Ne è conferma l'uniformità della 'Richiesta Geometrica' sul rilievo di muratura, volte, solai, scale, quadro fessurativo e deformativo, applicata in maniera non discriminante nella differenziazione tra i tre diversi Livelli di Conoscenza. Tali considerazioni rappresentano un anello critico del processo di analisi, che rischia di compromettere le valutazioni cautelative fatte in normativa proprio per l'eccessiva generalizzazione delle morfologie strutturali.

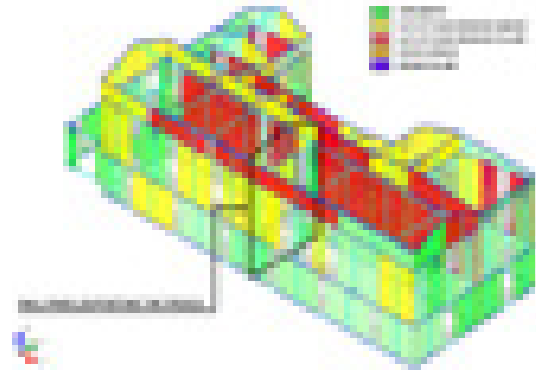
Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)⁴⁴, prevalentemente declinate su disposizioni e richieste progettuali in termini sia morfologici che materici delle nuove costruzioni, includono nel capitolo 8 – *Costruzioni esistenti* una trattazione anche circa la documentazione del patrimonio architettonico strutturale. Tali indicazioni sono fornite nell'obiettivo di stabilire “*i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti*”⁴⁵, e quest'ultime sono a loro volta intese come strutture già completamente realizzate alla data della valutazione o del progetto di intervento, senza specifiche differenziazioni in termini di ruolo e carattere storico-tipologico tra paramento, complesso monumentale o scala edilizia urbana.

La normativa introduce inoltre il tema del 'modello strutturale' definendolo attraverso le disposizioni richieste a tale prodotto, in termini di geometria e particolari costruttivi, proprietà meccaniche dei materiali e carichi: tali direttive legislative sono mantenute solo al livello di

definizioni attese dallo sviluppo di un processo conoscitivo su documenti disponibili ed indagini introdotte, senza la specifica di consapevoli parametri di controllo⁴⁶. Il conseguimento di tale modello, inoltre, è richiesto solo in presenza di definiti quadri di dissesto già in essere sulla fabbrica strutturale, senza includere una strategia di monitoraggio attivata a priori per la prevenzione al danno. È la normativa stessa a giustificare la mancanza di disposizioni più dettagliate sulle procedure di documentazione strutturale, proprio in funzione del fatto per il quale *“nelle costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi”*⁴⁷.

Dal caso della fabbrica edilizia al centro storico è possibile riscontrare una collezione di tipologie strutturali, interventi storici e meccanismi di carico ampiamente estesa, nella compresenza di manufatti (chiese, complessi religiosi, palazzi storici, attività commerciali, monumenti, ecc...) spesso riadattati a destinazioni d'uso diverse dalle originali, che sono interessati da comportamenti e caratteristiche diverse fortemente interagenti all'interno dei complessi aggregati edilizi. *“Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal progettista, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale atteso.”*⁴⁸

Di fronte a tali realtà di particolarità ed estensione, l'azione di un operatore tecnico, nonostante le competenze scientifiche, può facilmente perdere di vista le particolarità di ogni manufatto e non riuscire a controllare complessivamente la globalità delle realtà architettoniche, rischiando di non conferire loro l'adeguato grado di dettaglio che invece richiedono. La disponibilità di uno strumento documentativo unico di segnalazione delle condizioni di deformazione strutturale, in maniera globale, affidabile e referenziata, predispone invece già la possibilità di gradi di approfondimento puntuale, auspicando l'integrazione delle figure tecniche nella gestione di queste realtà. Si tratta di un primo riferimento, pur consapevole, verso il riconoscimento della necessità di protocolli di analisi finalizzati ad una 'carta del rischio', dove la sistematizzazione di una metodologia di rilevamento ed elaborazione dei dati è auspicata come criterio di valutazione oggettivo per l'indagine mirata di fragilità intrinseche ed esplicite dello scheletro strutturale⁴⁹.



Strutture morfologiche a supporto del software di calcolo strutturale, modellata direttamente sul software da profili standard di progetto. (4.45) Studio di vulnerabilità sismica del Museo Civico di Sansepolcro (Università degli studi di Perugia, 2017); (4.46) progetto di studio della vulnerabilità sismica degli edifici nel comune di Settimo torinese, (Politecnico di Torino, 2019).

4.4. STRUTTURE REALI E MODELLI RAPPRESENTATIVI: LA DIREZIONE DEL DISEGNO

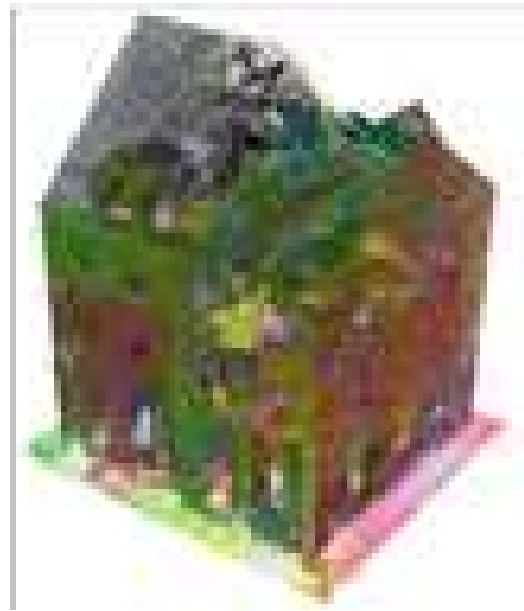
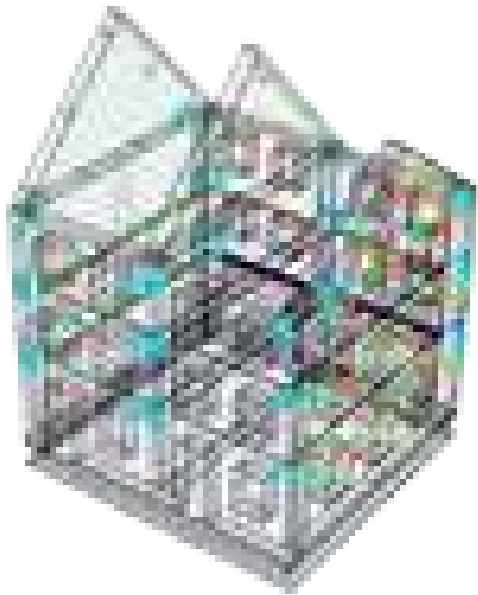
La diagnostica strutturale, sviluppata dalle fasi di sopralluogo per la percezione dell'opera alla restituzione di prodotti utili alla sua descrizione meccanica, concretizza nell'individuazione sistematica dei parametri di variazione formale il fattore centrale dell'indagine sui fenomeni di collasso in atto nei fabbricati edilizi. Le deformazioni enfatizzate dai cedimenti strutturali, riconducibili alle conseguenze di un evento sismico o a debolezze costruttive e di fasi di intervento successive, divengono a loro volta causa generatrice di cinematismi che solo raramente riescono ad equilibrarsi, avviando fenomeni auto-incrementanti di estensione del danno. In tal senso, monitoraggio, acquisizione e gestione del dato morfologico mediante strumenti di rappresentazione consoni si configurano come azioni chiave per individuare e quantificare questi eventi.

La corretta interpretazione del comportamento strutturale di un edificio è quindi uno dei prerequisiti fondamentali per la progettazione di un intervento di consolidamento. Questa procedura è subordinata da una parte ad una adeguata conoscenza della struttura come 'forma propria', dall'altra alla possibilità di riconoscere con precisione il ruolo svolto dalla 'forma relativa' dei diversi elementi dell'unità all'interno del sistema di involucro. In tali termini, la definizione di una strategia di analisi globale mantenuta al dettaglio morfologico, soprattutto se implementabile in modo speditivo, può auspicare la valutazione di diversi livelli di forma e struttura del patrimonio costruito, dalle singole fabbriche agli aggregati che caratterizzano il contesto urbano. La possibilità di individuare prodotti per la valutazione delle condizioni di pericolosità e la gestione delle emergenze si collega al tema della conoscenza strutturale per la pianificazione consapevole degli interventi, e richiama attraverso lo strumento del disegno, al contempo conoscitivo e comunicativo, l'evoluzione di prodotti grafici capaci di consolidare un quadro di informazioni alla base di indagini più approfondite, ripetibile ed aggiornabile per monitorare le condizioni effettive delle strutture nel tempo e predisporre

progetti di consolidamento e restauro puntuali e chirurgici. *"In un certo senso allora, come la storia, la teoria e la tecnica, anche la rappresentazione dovrà avere una funzione veritativa: non solo non le è concesso di tradire la "verità" dell'opera, ma deve anche rivelarcela."*⁵⁰ Ed in tale rivelazione, pianificata nella procedura e mantenuta il più possibile oggettiva in termini di risultato di "immagine", risiede la riflessione sulle differenti pratiche di espressione grafica dedicate alla rappresentazione strutturale, affinché il 'modello strutturale' risultante, seppur inevitabilmente personalizzato, non perda di obiettività.



(4.47) modello strutturale per piani medi della Chiesa di S. Margherita a Bagnasco (CN) (Enarch S.r.l., Harpaceas, 2016, (4.48) Modello strutturale del complesso di San Lorenzo a Sansepolcro per analisi FEA (Harpaceas, 2018).



“Se il concetto è fisico le operazioni sono effettivamente operazioni fisiche, e i modelli costruiti per dare spiegazioni logiche ai fenomeni osservati sono operativamente corretti nel momento in cui seguono tali disposizioni di forma fisica. In particolare, l'intenzione di rappresentare schemi interpretativi della forma al di là delle sue apparenze percettive deve comunque procedere sul terreno della percezione quando porta a costruire e trasmettere modelli cui necessitano forme grafiche per essere comunicabili.”⁵¹

Si riafferma un concetto di ‘verità’ della rappresentazione nella sua attenzione al reale come base per la costruzione di modelli grafici, dove la trasposizione diretta del caos visivo è costretta a livelli di dettaglio tali da non permettere ‘filtri’ automatici di selezione della percezione. In concomitanza di tale inevitabile mole di dati morfologici, dove la pratica digitale si manifesta come applicazione preferenziale sia di acquisizione che di gestione, la conoscenza grafica procede così per modelli sperimentali, processati e verificati in un controllo ciclico destinato a conseguire “*progressive ipotesi di raggiungimento della verità*”⁵².

“Il disegno, in quanto procedura di costruzione di modelli interpretativi della realtà, diventa nello stesso momento ipotesi critica di conoscenza dell'esistente e previsione del futuro, e le due operazioni riconducono all'interno del concetto di ‘disegno’ tanto il contenuto descrittivo quanto quello propositivo.”⁵³

La distanza tecnica tra qualità morfologiche risiede nella complessità di relazioni interne e frammentazioni spaziali in cui ‘strutture sintetiche’ e ‘strutture mimetiche’ sono identificate in ambiente digitale. Forme semplici e regolari sono così preferite a forme complesse ed imperfette, accettando le giuste approssimazioni di quantificazione dei fattori di danno.

Sopra: (4.49) unità strutturale del centro storico di Basilea, sintesi geometrica NURBS vs sintesi geometrica da point cloud.

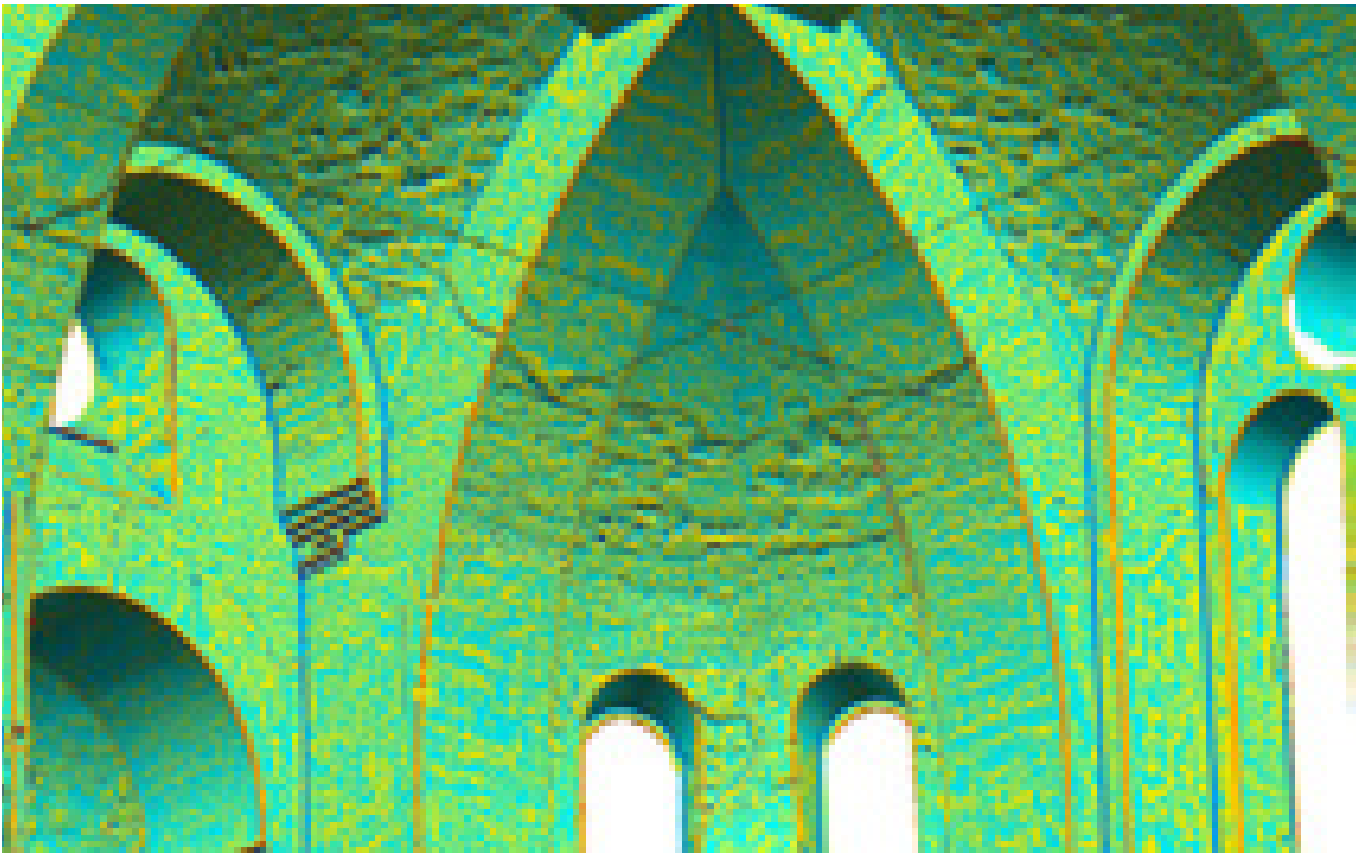
Il rilievo strutturale non implica quindi l'analisi di strutture distinte da quelle rilevabili per altri fini, ma indirizza piuttosto una diversa discretizzazione dei dati acquisiti al fine di spogliare l'opera di quelle parti non necessarie alla statica dell'architettura, rendendo più chiara la comprensione del suo funzionamento statico. Da tale selezione ed elaborazione di dati, il processo di rappresentazione si sviluppa identificando gli aspetti morfologici che contraddistinguono una struttura, fedelmente riproposta nella sua tridimensionalità e complessità del costruito. Successivamente, dai dati dimensionali del rilievo altre informazioni sono relazionate, di carattere qualitativo, tecnologico, meccanico e tipologico, permettendo al personaggio del tecnico, in fase di progetto e di verifica, di intervenire senza l'ausilio di ulteriori indagini massive, ma con l'apporto, eventuale, di indagini puntuali.⁵⁴

“Il disegno deve dunque giungere a raccogliere queste informazioni, specialmente adesso che grazie alla computergrafica è possibile navigare dentro ambienti vettoriali infiniti, e ordinare e codificare la descrizione dello spazio virtuale in modo da essere più verosimile con il reale limitando ogni sorta di approssimazione che non risulti necessaria.”⁵⁵

In tal modo, tra i contenitori digitali offerti nella pratica del rilevamento architettonico, la forma emerge come archivio condensato di dettagli costruttivi, sistemi di assemblaggio strutturale ed alterazioni cinematiche, definendo strutture digitali come modelli astratti della molteplice realtà a cui associare l'efficacia meccanica di modelli reali. Il 'modello strutturale' è così conseguito dall'esplicitazione delle necessarie qualità di un "modello di rilievo", che "pur mantenendo l'ordine ed il controllo di uno schema strutturato non possono adeguarsi ai modelli di calcolo come modelli meccanici, ma devono mantenere una forma realisticamente aderente alla realtà"⁵⁶.

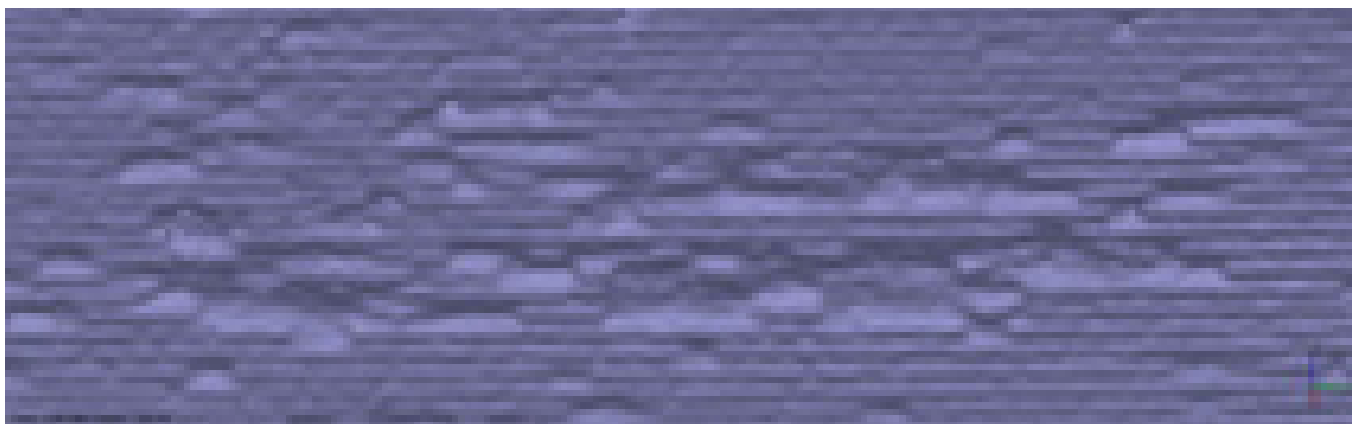
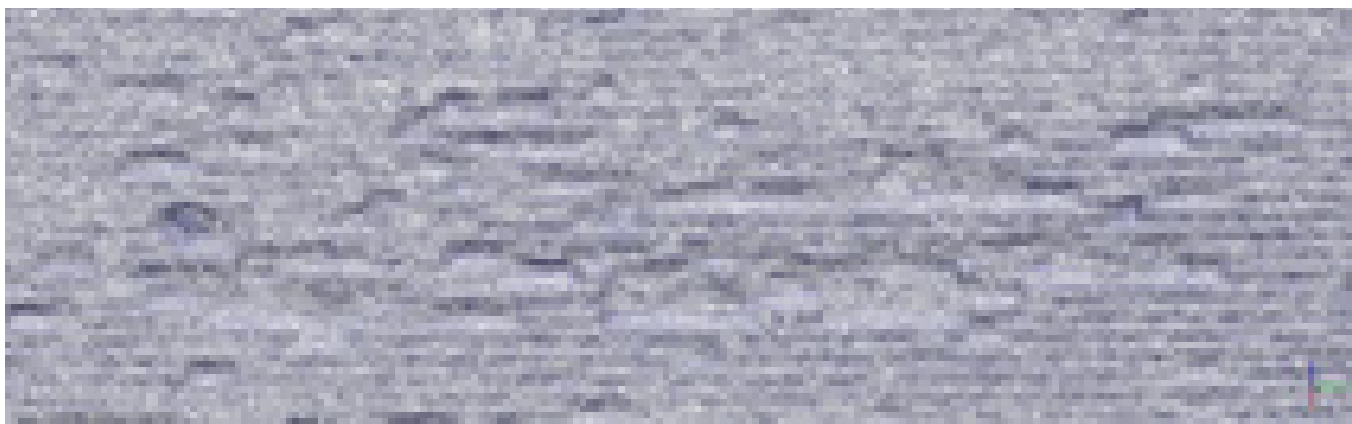
L'approssimazione ad entità primitive della forma strutturale "alleggerisce" il suo modello mantenendo i profili primari minimi per abilitare gli algoritmi di calcolo. La conservazione del dettaglio morfologico, invece, in virtù della ricchezza dei moduli tradotti dal geometry processing, abilita sia la lettura delle irregolarità materiche che l'estrazione degli stessi profili, con maggior affidabilità. Non è la sintesi a potenziare l'impatto del modello strutturale per la diagnosi meccanica, quanto l'ordine ed il controllo del suo schema di componenti, siano essi sintetici o mimetici.

(4.50) superficie strutturale ricostruita con pattern poligonale della Chiesa di St. Peter e Paul a Taman, Russia: color map per curvatura relativa dei moduli poligonali densi.



Il controllo del geometry processing sull'irregolarità formale diviene così tema centrale nella gestione delle complessità di rappresentazione per le strutture, condizionando sia i prodotti del disegno (2D e 3D) che, in particolare, le modalità di osservazione ed acquisizione dell'architettura storica che definiscono quella base di dati necessaria per la definizione del dettaglio poligonale e dell'involuppo superficiale sull'oggetto di studio.

(4.51) Scale di semplificazione dell'addensamento del pattern propedeutiche alla lettura dell'imperfezione formale.



NOTE

1 Cit. Schopenhauer A. (1819) *op.cit.*, Capitolo 35: Sull'estetica dell'architettura.

2 Si richiama l'assunto sul soggetto di 'forma strutturale', per l'analisi dei comportamenti statici e dinamici delle fabbriche storiche, come prodotto, sia percettivo che rappresentativo, di un percorso di selezione e discretizzazione della morfologia architettonica a conseguire la 'forma efficace'. L'adozione del *pattern* e del *geometry processing* indirizzano l'aspetto metodologico degli sviluppi sul metodo di disegno e modellazione.

3 Cfr. Doglioni F. (1950) "*Stratigrafia e Restauro. Tra conoscenza e conservazione dell'architettura.*" Trieste: LINT. Vedi anche Donatelli A. (2010) *Terremoto e architettura storica: Prevenire l'emergenza.* Roma: Gangemi, per una considerazione di tali costanti in merito all'influenza sulla risposta tensionale cinematica delle strutture storiche.

4 Si intende ideale in termini di rispondente in fase di progetto a requisiti e definizioni solo di tipo geometrico-fisico, mentre la trasposizione in fase esecutiva, in passato come oggi, anche se regimentata dall'industria edilizia, deve necessariamente tenere conto anche di una serie di alterazioni di natura materica e tecnica.

5 Cit. Giuffrè A. (1989), *op. cit.*, p.51

6 Ibidem

7 Cit. de Azúa F. (1995). "*Diccionario de las artes*", Barcelona: Planeta, 1995.

8 La corrispondenza vitruviana della *firmitas* ha mantenuto una costanza nel tempo congiunta ad un aggiornamento dei parametri di valutazione nella pratica edilizia. Questo carattere, per quanto evolutosi in termini spesso alterati, può essere riconosciuto anche nella corrispondenza delle architetture virtuali. La *firmitas*, più di tutte le altre, diviene il parametro chiave di alterazione, poiché, al contrario di forma e funzione mantenute percettivamente anche nella trasposizione digitale, la *firmitas* è la prima ad essere abbandonata quale conseguenza fenomenica in un contesto che, per definizione, elude le leggi fisiche. Proprio per questo, più di ogni altro aspetto, la sua corrispondenza deve essere attentamente valutata nel disegno trasferito al campo delle computazioni informatiche.

9 Cit. Giuffrè (2011), *op. cit.*, p. 29.

10 Si riferisce alla declinazione di un "rilievo ad hoc" valutato come staticamente critico e dall'acquisizione discreta ben finalizzata, al contrario di un archivio universale e totalitario ma non orientato. Cfr. De Rubertis R. (1989) "Relazione introduttiva al rilievo tra storia e scienza". *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 14-19.

11 Cit. Giuffrè (1989), *op. cit.*, pp. 50-51.

12 Cit. De Rubertis R. (1994), *op. cit.*, p. 11

13 "*Conoscere un edificio significa saperne valutare tutte le sue caratteristiche geometriche materiche e strutturali; solo una comprensione completa di tutte le "facce" di un edificio garantisce interventi di restauro corretti che non danneggino strutturalmente*

l'edificio né la sua immagine." Cit. Minutoli G. (2017), *op. cit.*, p.40

14 La definizione di un modulo geometrico, alla pari di un modello grafico critico, seleziona solo alcuni aspetti della realtà complessa e, con un inevitabile processo di *riduzione*, li rende in maniera *schematica* e *semplificata*. Ciò nonostante, esso può risultare a sua volta talmente complesso da renderne difficile la comprensione, in funzione della compresenza di aspetti e relazioni simultanee di conoscenza dell'oggetto della rappresentazione. Cfr. Cardone V. (2008), *op. cit.*, p.22.

15 Cit. Trevisan C. (2011) "*Per la storia della stereotomia: geometrie, metodi e costruzioni*". Roma: Aracne, p. 7.

16 Ivi, p. 8. Il metodo del *trait*, nell'accezione più ristretta di tracciato geometrico costruttivo utile per la formazione e il taglio di conci di pietra, è compiutamente determinato fin dall'antico Egitto, come esempio grafico, in scala o in proporzione, utile per la definizione e la costruzione di parti di edifici in legno e in pietra. In tal caso, non vuole essere inteso in senso concettuale ma in senso logico, di riflessione sul tratto descrittivo della tessitura degli apparati strutturali come chiave di interpretazione della loro più stretta concezione modulare.

17 La relazione di stabilità strutturale, oltre ad eventi episodici, si esprime più comunemente nei caratteri di alterazione all'ordinaria tessitura muraria, o integrità di profilo per le strutture discrete. Nel momento in cui essa viene a mancare, si genera un processo auto-incrementante di collasso sia puntuale che per macro-blocchi. Per una trattazione più estesa e declinata ai diversi schemi di resistenza e carico, cfr. Levy M., Salvadori M. (1997) "*Perché gli edifici cadono*", I edizione, Milano: Strumenti Bompiani.

18 "*Le qualità di una muratura dipenderanno da come questa si relazioni con l'intorno, da ciò che la recinta e da ciò che la occulta, ma anche dai materiali con cui è costruita, fino al punto di richiedere una descrizione di ciascun mattone che contribuisce, con i suoi difetti e le sue imprecisioni a caratterizzare la superficie dell'elevato. Si arriva presto a comprendere che tra la condizione geometrica ideale, tra il modello progettuale e formale, ed il reale c'è una grande variazione di qualità che dipende proprio dalla regola costruttiva e dallo stato di degrado e conservazione della struttura. I materiali si deformano, variano aspetto quasi completamente, modificano la propria geometria a volte attraverso una mancanza o una semplice inflessione, anche attraverso una patina che è in grado di modificare l'immagine dell'intera esperienza architettonica.*" Cit. Parrinello S. (2012) "*Il disegno dell'imperfetto. Esigenze descrittive per l'analisi architettonica*". In: Actas XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la edificación EGA, Valencia, pp. 375-381.

19 Le giunzioni ed innesti alla scala del complesso architettonico sono spesso risolte nelle ammorsature o accostamenti tra comparti edilizi, i quali hanno luogo attraverso superfici di contatto nascoste nello spessore stesso della muratura. Il passaggio di scala comporta quindi una sempre maggiore difficoltà di percezione delle variazioni e complessità strutturali della fabbrica storica, lasciando più ampio ruolo al pensiero critico del rilevatore ed all'importanza

dei dettagli morfologici di superficie, anche del fenomeno di dissesto stesso, per giungere a conclusioni di interpretazione delle componenti e distribuzioni strutturali.

20 Per una trattazione più ampia, cfr. Van Riel S. (2007) *“Consolidamento degli edifici storici. Appunti e Note”*. Firenze: Centro Stampa AZ.

21 Sulla teoria di scomposizione delle unità meccaniche nella struttura di un complesso storico, cfr. Giuffrè (2011), *op. cit.*, cap. 3.

22 L'analisi strutturale di un centro storico non può tralasciare l'influenza esercitata su aggregati e unità edilizie da parte di pericolosità costruttive, antropiche e vulnerabilità dei singoli edifici. L'attenzione va portata sugli episodi non solo di accrescimento ma anche di occlusione, interruzione e variazione di unità e vuoti urbani, valutando i comportamenti statici degli edifici che ne sono o non sono interessati. Cfr. Minutoli G. (2017), *op. cit.*, pp. 57-94.

23 Le modalità di espansione dell'unità edilizia nell'aggregato urbano sono principalmente riconosciute in base all'estensione dell'intervento di completamento dello schema scatolare a scala urbana. Si parla di accrescimento nel caso di inserimento di 3 lati nuovi, intasamento se sono 2, e congiunzione (tra unità) nel caso di inserimento di un lato nuovo. In termini di posizione, l'unità edilizia, alla fine del processo di accrescimento, può rispettivamente definirsi come di testata, d'angolo o interclusa. Per una trattazione più specifica delle modalità di espansione e stratificazione strutturale urbana cfr. Giuffrè A. (a cura di) (1993) *“Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia”*. Roma-Bari: Laterza, pp. 151-188.

24 Si richiamano le considerazioni raggiunte, a titolo di esempio, attraverso l'esteso lavoro di documentazione e diagnostica strutturale del quartiere di Santa Trinita a Firenze, dettagliato in Minutoli G. (2017), *op. cit.*, pp. 68-93.

25 Nel caso le sollecitazioni fossero maggiori, saremmo in presenza di un fenomeno di distacco e crollo, che pur lasciando una forma parziale della struttura principale, indice del danno, comporta però una perdita delle informazioni spaziali relative leggibili nel blocco, mentre la situazione di un crollo risulta azzerrante per le condizioni di deformazione rispetto all'unicum.

26 Cfr. Simondon, 2011, *op.cit.* pp. 62-82

27 I dissesti sono le manifestazioni dell'alterazione dell'equilibrio statico di un manufatto; questi possono essere stati causati da tre diverse problematiche: inadeguatezza strutturale dell'immobile; scorretto intervento di riuso, ripristino e restauro; eventi esterni che hanno sollecitato l'edificio stressando le strutture. La prima causa di dissesti è congenita all'edificio, le seconde due invece sono dovute a cause perturbatrici quali modifiche dell'equilibrio statico originario per variazione dei carichi o delle dimensioni delle strutture portanti, oppure a cause naturali quali sismi, alluvioni, siccità ecc. Cfr. Minutoli G. (2012) *“Il rilievo come strumento di interpretazione: il rilievo strutturale”*. In Bini M., Bertocci S. (2012) *“Manuale di rilievo architettonico e urbano”*. Novara: Città Studi Edizioni, p.320

28 Cfr. Giuffrè A. (1993), *op. cit.*, pp. 151-188

29 Cfr. Giuffrè A., Carocci C. F. (1994) *“Statics and dynamics of historical masonry building”*, in International Workshop on Structural Restoration of Historical Buildings in Old City Centers, Heraclion (Crete) 1994.

30 Cfr. Parrinello S., Picchio F. (2017). *“Databases and complexity. Remote use of the data in the virtual space of reliable 3D models”*. *Architecture and Engineering*, 2017, vol. 2, pp. 27-36.

31 La pratica di intervento di restauro nei centri storici è applicata secondo le recenti normative su un percorso conoscitivo per livelli, tra cui quello morfologico, tipologico, metrico, costruttivo-storico, di danno strutturale e di degrado.

32 In merito, sulla scia delle Linee guida per la valutazione del rischio sismico nel patrimonio culturale (DPCM 12 ottobre 2007) e delle precedenti Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici (OPCM 20 marzo 2003, n. 3274), la Direttiva DPCM del 9 febbraio 2011 fornisce indicazioni per la valutazione e la riduzione del rischio sismico per il patrimonio culturale tutelato, con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto ministeriale 14 gennaio 2008; è stata redatta con l'intento di specificare un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi concettualmente analogo a quello previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adeguato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale.

33 Cit. Parrinello S. (2012), *op.cit.*

34 I sistemi di indagine applicabili sugli apparati strutturali sono molteplici, e destinati a ricavare diverse tipologie di informazione, non solo visuali ma da quelle fisico-statiche a quelle meccanico-dinamiche, come geofoni, potenziometri ed accelerometri. L'uso di molti di questi sarà affrontato nel capitolo 6 in relazione alla loro applicazione congiunta al rilevamento digitale in un caso studio, ma in questa sede è importante ribadire come le osservazioni riportate riguardino sistemi di indagine finalizzati in modo specifico all'ottenimento di dati sulla morfologia delle strutture, oggetto della ricerca, in particolare con una riflessione sulla loro restituzione, grezza o rielaborata, attraverso prodotti di natura grafica.

35 Indagini 'conoscitive', non 'diagnostiche', perché atte a rilevare parti nascoste di una struttura aumentandone la conoscenza generale dal punto di vista morfologico o dei materiali e tecniche costruttive, anche in assenza di una problematica inerente all'organismo edilizio.

36 Cfr. Cardone, *op. cit.*, p. 314.

37 Per una più completa esposizione dell'applicazione integrata di pratiche di indagine conoscitiva non invasiva sull'architettura storica, cfr. Vernizzi C. (2007) *“La conoscenza integrata dell'architettura storica monumentale come strumento primario della sua tutela”*. Conference: E-Arcom07 - Sistemi Informativi per l'Architettura Volume: Atti del Convegno E-Arcom07 - Sistemi Informativi per l'Architettura - Alinea Editrice, Firenze,

38 Cfr. Garzino G., Bocconcino M. M., Donato V. (2017)

“Metodi e codifiche grafiche per il rilievo della vulnerabilità sismica alla scala architettonica e alla scala urbana”. *DisegnareCON* 10 (18), pp. 3.1-3.23

39 Cfr. De Rubertis (1994), *op. cit.*, p. 13

40 Cfr. Minutoli (2012), *op. cit.*, p.317

41 L'elaborazione di tali schede standardizzate è stata conseguita per iterazione dall'esperienza diretta di documentazione di numerosi casi studio di instabilità strutturale, in particolare condotti su casi di emergenza del territorio nazionale, che solo a valle delle conclusioni conseguite hanno portato alla definizione di tali prodotti. Per approfondimenti, cfr. Formisano A., Marzo A., Indirli M. (2013) “*Analisi comparativa tra metodi di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici murari di Arsita (TE)*”. XV Convegno ANIDIS 2013; Formisano A. et al. (2011) “*Un metodo per la valutazione su larga scala della vulnerabilità sismica degli aggregati storici*”. ANIDIS, Bari, 2011; Indirli M., Formisano A. et al. (2011) “*Assessment of historic centers through a multidisciplinary approach based on the simultaneous application of Remote Sensing, GIS and quick procedures for survey and vulnerability evaluation: the Arsita case*”. EACH 2011, 5th International Congress “Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin” At: Istanbul, Turkey Volume: Conference Proceedings.

42 La redazione delle NTC 2008, aggiornate 2018, recepisce ed ingloba direttive di carattere europeo provenienti dagli Eurocodici. In particolare, in materia di documentazione su edifici esistenti, storici o contemporanei, l'influenza è data dalle disposizioni dell'*Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Strengthening and repair of buildings*.

43 “*Il rilevatore si deve confrontare costantemente con l'aggiornarsi della normativa che si occupa di riabilitazione degli edifici storici, implementando il rilievo con quei dati che il legislatore richiede e che servono ad aumentare i margini di sicurezza in fase di progettazione.*” Cfr. Minutoli (2012), *op. cit.*, p.317 In questa ottica il normatore è intervenuto con il D.M. 14-01-20084 dove, tra le altre cose, si sono stabiliti due nuovi parametri di calcolo il Fattore di Confidenza e il Livello di Conoscenza: il Fattore di Confidenza il cui valore varia da 1,35 a 1, è inversamente proporzionale al Livello di Conoscenza (LC1, LC2, LC3), che rappresenta l'analisi della documentazione che si ha sull'immobile con tre settori principali di analisi: conoscenza delle geometrie della struttura, dettagli costruttivi, proprietà dei materiali, connessioni tra i diversi elementi e loro presumibili modalità di collasso, in particolare meccanismi locali e globali, duttili e fragili. Tanto più vicino a 1 sarà il valore del Fattore di Confidenza tanto meno il nuovo parametro influenzerà il calcolo e quindi di conseguenza minori saranno i costi di intervento. Ulteriori informazioni sugli aspetti legati alla valutazione e alla redazione dei rilievi sono contenute nelle Istruzioni per l'applicazione delle “norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008 (aggiornate al 7/3/2008), appendice C8A, pp. 365-379.

44 Le riflessioni condotte sono svolte prevalentemente

sulla versione delle NTC 2008. La recente versione 2018 non ha comunque (e purtroppo) comportato variazioni significative sulle considerazioni in merito alla documentazione funzionale alla valutazione ed analisi strutturale.

45 NTC 2018, capitolo 8 – Costruzioni esistenti, 8.1 Oggetto

46 L'approfondimento in merito è contenuto nel capitolo 8.5 Definizione del modello di riferimento per analisi. In particolare, in merito alle disposizioni influenti sulla documentazione morfologica:

- 8.5.1. *Analisi storico-critica*. Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dalla costruzione, nonché gli eventi che l'hanno interessata.

- 8.5.2. *Rilievo*. Il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito alla geometria complessiva, sia della costruzione, sia degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica. Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presenti la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi. Dovranno altresì essere rilevati i dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno.

47 NTC 2018, capitolo 8 – Costruzioni esistenti, 8.5 Definizione del modello di riferimento per le analisi.

48 Cit. Minutoli (2017), *op. cit.*, p. 56.

49 Ivi, pp. 145-156.

50 Cit. Ugo (1994), *op. cit.*, p. 11.

51 Cit. Bridgman P. W. (1965) “*La logica della fisica moderna*”. Torino: Boringhieri, p.36.

52 Cit. De Rubertis (1994), *op. cit.*, pp. 21-22

53 Ivi, p. 12

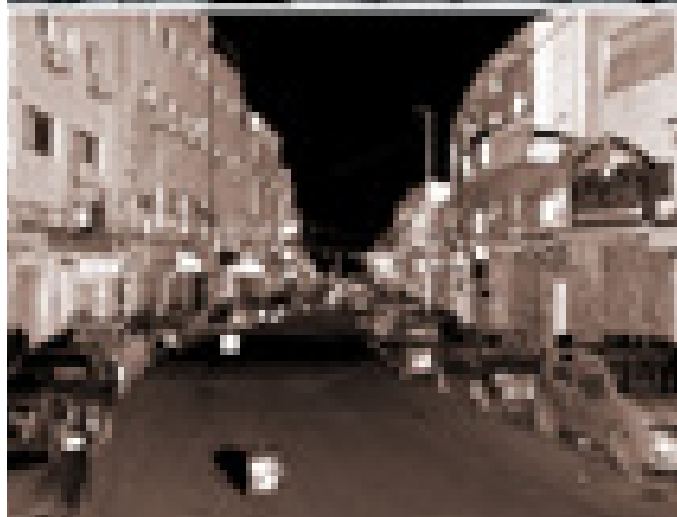
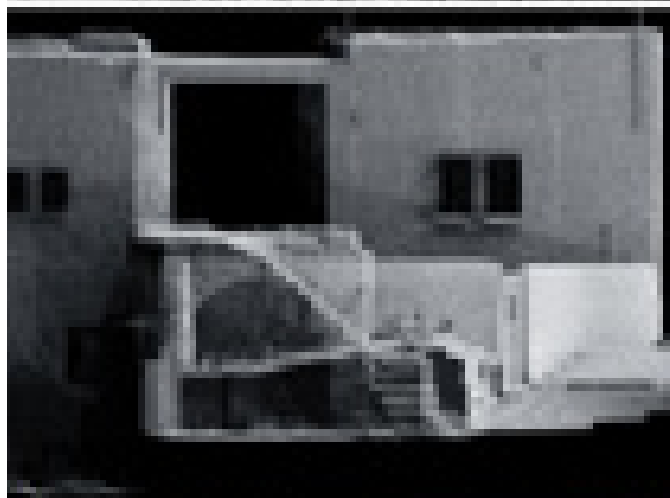
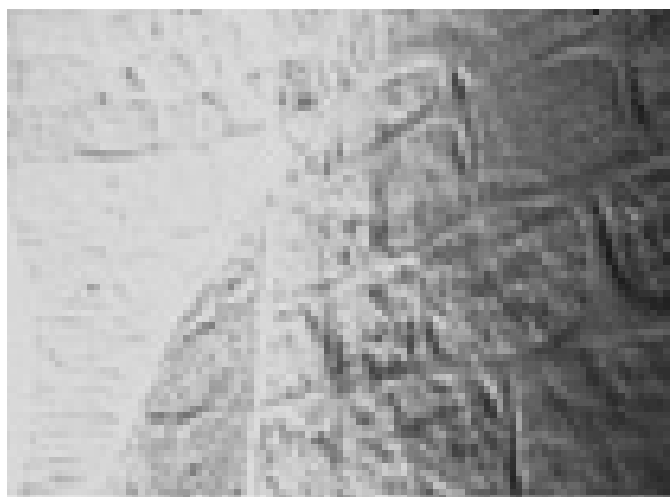
54 Cit. Minutoli (2017), *op. cit.*, p. 40.

55 Cit. Parrinello (2012), *op. cit.*

56 Cit. Giuffrè (2011), *op. cit.*, p.29.

PARTE II

FORMA E MODELLO



CAPITOLO 5

Rilievo, rappresentazione e prodotti digitali applicati alla documentazione strutturale

Lo studio e la rappresentazione delle strutture architettoniche costituiscono una chiave di lettura fondamentale alla programmazione di progetti di indagine preventiva su edifici e città, sia in termini di intervento su un contesto edilizio già consolidato, che per la preservazione del patrimonio costruito da fenomeni di rischio, naturale, sismico o anche antropico¹.

La trasposizione grafica risulta in tal modo necessaria non solo per definire l'immagine e la forma di strutture meccanicamente plasmate, ma anche in rapporto ai fenomeni dinamici che possono caratterizzare un'unità statica nel tempo e, complessivamente, la maglia storica a cui essa appartiene, influenzando l'evoluzione di comportamenti di propagazione tensionale fino all'aggregato urbano. La predisposizione di un valido supporto di rappresentazione è così operazione preliminare ad un consapevole calcolo sui fattori quantitativi statici e dinamici influenzanti gli apparati strutturali e, se fornito degli opportuni caratteri sperimentali, può configurarsi come protocollo non invasivo sia per il monitoraggio che per la computazione.

Tale quadro scientifico contestualizza le riflessioni condotte sulle qualità info-grafiche della forma strutturale nella sua trasposizione in disegno, e guida la calibrazione dei suoi gradi di mimesi ed iconicità. Se, per l'alto livello di schematizzazione che si può conferire all'immagine, il disegno è forzato ad una maggiore chiarezza rispetto alla complessità del reale, il segno trasposto risulta privo di ambiguità ma il messaggio conoscitivo che ne viene comunicato si configura a 'bassa entropia'. *“Al contrario più il segno è simile alla realtà, più si allarga il campo dei suoi possibili contenuti, originando un messaggio evoluto, dai significati fortemente articolati, capace di comunicazioni di notevole complessità, ad ‘alta entropia’”*.²

Lo sviluppo del prodotto grafico-strutturale si articola allora in un ambito non più solo legato ai requisiti tecnici attesi dall'approccio analitico all'equilibrio delle strutture, ma anche alle capacità conoscitive ed interpretative dell'ampio

ventaglio di attori coinvolti nell'intervento sul patrimonio costruito. Tra di essi, solo una frazione è composta da personale tecnico operativo sul campo e nelle attività di calcolo, mentre un'ampia parte conta soggetti civili, amministrativi ed istituzionali ugualmente coinvolti nel processo di intervento. Tali operatori sono a richiedere una lettura dei fattori di rischio e danno presenti sul patrimonio costruito al contempo qualitativa, immediata, ma anche quantitativa, monetizzabile per strategie di pianificazione.

La documentazione strutturale configura così diverse modalità di lettura, ed i suoi prodotti non riescono ad oggi a fornire un adeguato grado di dettaglio in funzione di questi molteplici aspetti, presentando o modelli di analisi limite dall'elevato onere computazionale difficilmente interpretabili, o mappe tematiche territoriali eccessivamente generalizzate per l'intervento di recupero. A tale aspetto si aggiunge la differenza di contesto culturale geografico, che solo in ambito Europeo evidenzia differenti sensibilità di indagine legate all'impatto di emergenza strutturale sul patrimonio costruito locale.

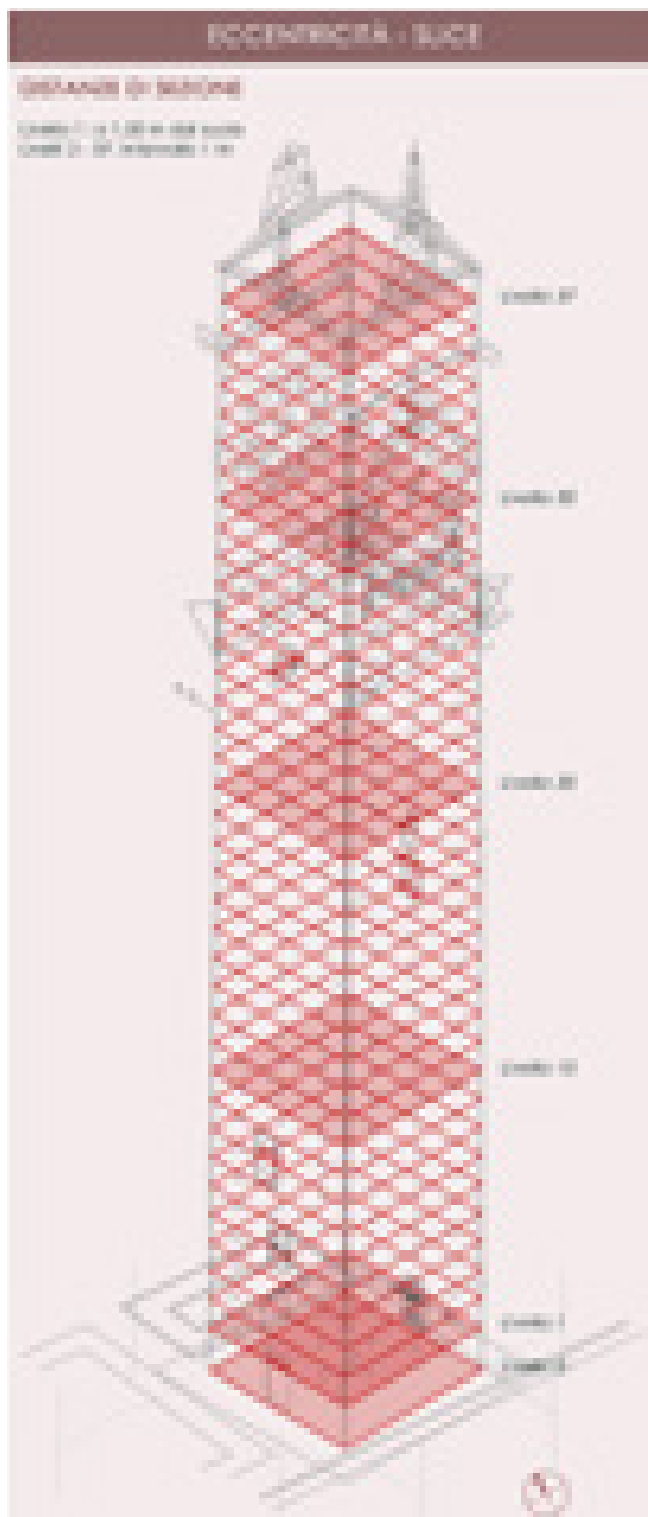
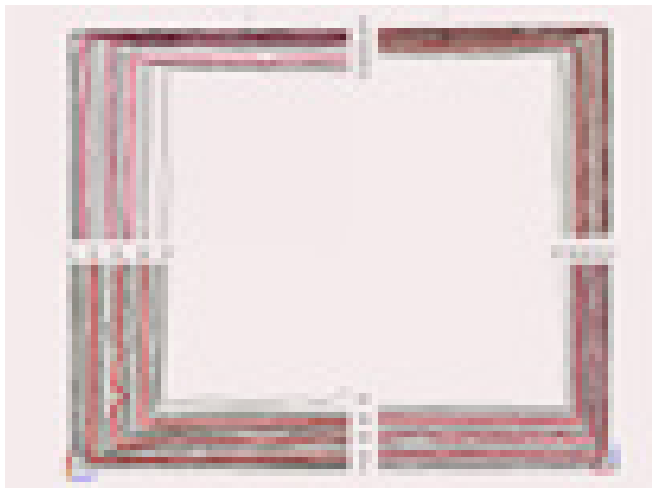
L'aggiornamento della trasposizione grafica strutturale mediante i prodotti digitali del disegno, dall'acquisizione in sito alla restituzione, tenta oggi di rispondere a questa varietà di richieste con un prodotto tipologicamente unificato, il *database* morfologico tridimensionale, dove le modalità di interazione offrono diverse possibilità di lettura conoscitiva. Se la forma strutturale può essere espressa per livelli di complessità e gradualmente implementata, tali banche dati e modelli possono non solo rispondere ad un particolare quesito meccanico, ma anche generare conoscenze non previste, coprendo la reale distanza tra funzione “diagnostica” e “preventiva” della rappresentazione.

Nella pagina a fianco: Database morfo-metrici da rilievo digitale a copertura multi scala, dall'impianto urbano–architettonico ai layer di dettaglio. Dall'alto: Moschea di Al Jazaar ad Acri, 2017; Centro storico di Betlemme (2019); quartiere commerciale di Gerusalemme (2016).

È in tali termini che “il disegno funge da supporto temporaneo dell'immaginazione, in cui le idee possono formularsi con chiarezza per poi permettere allo schema che le ha descritte di essere a sua volta osservato ed analizzato, tornando a far parte di quel pensiero. Si tratta di un ciclo, simile a quello che sovrintende l'attività progettuale, nel quale il primo motore è l'idea; questa trova poi la sua rappresentazione in un modello grafico sul quale sono possibili elaborazioni e modifiche; il modello viene quindi percepito come simulazione di una realtà esterna, per essere infine ‘compreso’ in una nuova e più ricca sintesi intellettuale.”³

Caso studio sull'instabilità strutturale del blocco medievale della Torre dell'Orologio nel centro storico di Pavia. I danni avvenuti nel 2019 hanno spinto l'Università di Pavia (all'interno dei cui spazi si trova il monumento) a promuovere una campagna di monitoraggio della struttura storica. Per l'elevata altezza e la conformazione specifica, l'obiettivo di digitalizzare la struttura ed analizzarla come database spaziale morfo-metrico è risultato necessario ai fini della documentazione, e ha permesso di conseguire sezioni di controllo dell'eccentricità molto dense e accurate per distinguere tra danni locali e meccanismi globali di instabilità delle murature.

(5.1-5.2) Studi di eccentricità condotti sulla torre da rilievo digitale.

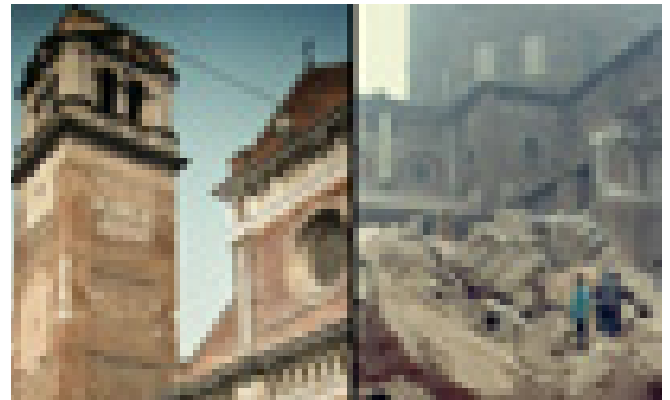


5.1 IL PASSAGGIO DALLA 'STRUTTURA REALE' ALLA 'STRUTTURA DIGITALE'

La ricchezza architettonica legata ai sistemi costruttivi tradizionali esprime un'ampia collezione di caratteri tecnologici e stilistici in un patrimonio dall'elevata complessità di catalogazione, controllo e tutela in funzione della sua specifica e stratificata irregolarità morfologica.

Gli edifici storici, tradizionalmente, nascono e rimangono legati all'originario impianto strutturale anche in epoche successive, risentendo poi ognuno individualmente nella sua forma attuale di interventi di ristrutturazione e restauro⁴. La demolizione dei sistemi murari perimetrali e delle unità di elevazione (come le torri storiche), la riconfigurazione degli orizzontamenti interni e dei coronamenti edilizi, la costruzione di blocchi di espansione e la conformazione degli aggregati urbani divengono così azioni "della" e "sulla" struttura, locale e urbana. Tali azioni contribuiscono a rendere il professionista strutturista sia ricettore di informazioni e suggestioni provenienti dal contesto formale della 'struttura reale', che a sua volta elaboratore di nuove riflessioni ed azioni sui fenomeni meccanici che essa 'virtualizza'. Questo sistema di relazioni trova nuova espressione nelle 'strutture digitali', intese come sistemi informatici di unità con caratteristiche morfologiche, tipologiche e di connessione tali da esprimere le proprie qualità meccaniche in un ambiente virtuale di implementazione⁵. All'interno di predisposte piattaforme, tali configurazioni di simulazione interagiscono per mezzo della loro immagine digitalizzata, trasformata in un sistema n-dimensionale di *byte* di archiviazione dove ogni dimensione è espressione del contenuto informativo implicito, catalogato in livelli di analisi storica, morfologica, costruttiva e materica⁶.

In tali termini è possibile riscontrare una distinzione tra i generici 'sistemi informatici' applicati alla rappresentazione strutturale. Se da un lato la conoscenza dei principali profili resistenti e delle qualità meccaniche della materia ha fino ad ora soddisfatto le necessità di computazione, la sperimentazione di procedure e soluzioni di intervento su componenti esistenti e *performance* di



(5.3) Torre civica di Pavia, modificata nel 1500 dal sistema medievale con numerosi interventi sulla tessitura e l'inserimento di una cella campanaria in pietra di sommità. Il corpo murario è collassato il 17 marzo 1989, ed il suo caso studio avanza oggi numerose riflessioni sull'interoperabilità di modelli per scenari di intervento e rischio sulla città.

instabilità sta gradualmente evidenziando la necessità di implementare la forma di tali modelli per simulazioni di maggiore affidabilità e precisione. Parallelamente, la documentazione digitale si è sviluppata in banche dati 3D dalla potenziata densità e precisione di informazione, tanto da indirizzare il processo di acquisizione stesso della misura verso una discretizzazione spaziale sempre più vicina alla forma continua.

Tale tipo di dato, per sua natura complesso in compatibilità e dimensione di formato, è oggi interessato dai continui sviluppi nell'ambito della gestione dei *Big Data* su banche dati 3D di sistemi architettonici ed aggregati urbani. Queste possibilità di semplificazione e velocizzazione nella manipolazione dei dati metrici digitali, unite alle direzioni di sperimentazione sul patrimonio storico, mirano ad instaurare protocolli attuativi di documentazione, ed individuano un campo di applicazione che, tra ricerca metodologica di acquisizione e finalità di restituzione, sviluppa la tradizione rappresentativa strutturale verso nuove frontiere di interazione e calcolo.

5.1.1. La regolamentazione europea e la normalizzazione degli obiettivi di prevenzione

La pianificazione del patrimonio costruito in termini di sicurezza e prevenzione si è sensibilizzata verso lo sviluppo di metodologie di rielaborazione ed interpretazione digitale delle informazioni ottenute con metodi non invasivi, capaci attraverso opportune parametrizzazioni di evidenziare quadri di danno ed indici di valutazione alla base di politiche di salvaguardia e tutela.

Le realtà urbane europee sono state al centro a partire dagli anni '60 di episodi di espansione post-bellici. La diffusione di piani di ricostruzione ha configurato un nuovo stadio di interventi costruttivi per nuovi fabbricati ed innesti, dedicando per il patrimonio esistente politiche di intervento povere di sensibilità e dimensionamento verso le strutture preesistenti di fabbriche e nuclei urbani.

L'attenzione per il patrimonio storico e per la sua tutela si è riaffermata a partire dagli anni '80, in particolare a seguito dei grandi eventi tellurici nell'area Mediterranea⁷ che hanno posto in evidenza la natura "fragile" delle strutture esistenti ed il loro livello di precarietà. Il tema della sicurezza strutturale ha così iniziato a configurare casi studio estesi dei primi provvedimenti normativi di documentazione e pianificazione sul patrimonio costruito esistente delle città, estendendo poi le metodologie dedotte ai borghi periferici.

I recenti episodi di terremoti e calamità naturali⁸ hanno generato una rinnovata sensibilizzazione dell'opinione pubblica e delle amministrazioni nei confronti dell'attenzione e preservazione "statica" del patrimonio strutturale storico. Anche in ambito scientifico è emersa con urgenza la persistente assenza di normalizzazione di sistemi di documentazione adeguati che permettano interventi di restauro preventivo o ricostruzione in contesti di rischio strutturale, in particolare a seguito di fenomeni di collasso di interi complessi architettonici o porzioni di città⁹.

Da un lato la ricerca ingegneristica applicata nel campo delle strutture e della sismica si è particolarmente mobilitata, con programmi di ricerca ed attività scientifiche, ad indirizzare il contributo tecnico e gli obiettivi di normalizzazione. Sono state istituite reti di laboratori universitari e fondazioni pilota in ambito sia nazionale che internazionale¹⁰, impegnate in comuni progetti sperimentali sui fattori di influenza statiche delle strutture edilizie. Parallelamente, la specializzazione e



(5.4-5.6) Impatto sociale e report edilizio dei danni causati sul patrimonio costruito italiano dai principali eventi sismici avvenuti nel XX secolo: sciame sismico del Friuli, di Messina e di Firenze, campagne di appello nazionale all'intervento per la sicurezza.

diffusione dei prodotti grafici del rilievo, declinati tanto in ambito architettonico quanto ingegneristico, non ha ancora affrontato l'istituzione di un "capitolato"¹¹ capace di coordinare le metodologie applicate ed uniformare le linee di approfondimento sul tema della documentazione e rappresentazione, tra cui quella strutturale, soprattutto in seguito all'ampia espansione dei contenuti digitali dell'informazione visuale.

Nonostante la labilità nazionale, le linee applicate nella documentazione digitale dimostrano un tentativo di adeguamento alle disposizioni della Digital Agenda 2020 della Commissione Europea¹², in merito alle iniziative di *Digitation of Cultural Heritage* per la pianificazione di operazioni di intervento, restauro e conservazione. La possibilità di sperimentare prima virtualmente, in uno spazio simulato ma affidabile, le modalità e gli effetti di una successiva attuazione fisica dell'intervento sul patrimonio reale enfatizza le opportunità di *digital preservation* ed *eGovernance*, ampliando le idee di innovazione sulla tipologia e qualità di prodotti del rilievo strutturale in termini di *Curation of digital assets and advanced digitisation*¹³. L'azione di documentazione 'a carattere strutturale', come capacità di conoscenza dei comportamenti di stress e previsione dei meccanismi di danno degli edifici, può così identificarsi anche all'interno delle linee guida europee per il patrimonio a rischio insistendo sul carattere di *Robustness*¹⁴, intesa come forza o capacità della struttura di resistere a un dato livello di stress derivato dall'azione combinata di degrado ed alterazione delle funzioni di materiali e componenti.

È da tale contesto che deriva l'auspicio di prodotti 'digitali' e 'affidabili' capaci di garantire un approccio diretto e concreto alla componente di resistenza strutturale degli edifici, sviluppati con metodo 'organico' e 'ripetibile' ma 'declinabili' specificamente sulla particolare configurazione morfologica, conservata o in rovina. Pertanto, il tema ricorrente del "disegno" per la "documentazione" evidenzia come le riflessioni teoriche e l'analisi più approfondita sul sistema strutturale siano chiamate a rivedere il substrato culturale necessario a descrivere la scienza dei comportamenti strutturali, anche attraverso l'applicazione del Disegno in termini di più ampia manipolazione spaziale e la sua declinazione in Modelli.

Campagne di sensibilizzazione e finanziamento europeo verso quadri di rischio ed instabilità del patrimonio costruito: (5.8) Europa Nostra, comitato per la protezione ed intervento sul patrimonio culturale materiale a rischio di collasso; (5.9) linee guida per gli obiettivi di prevenzione delineate dalla commissione Europea nel programma Horizon 2020.



(5.7) Quadro delle placche sismiche agenti sul continente europeo. Si evidenzia la posizione della penisola italiana come cardine di rotazione della placca continentale. La penisola turca spinge sull'Europa Occidentale, la quale ruota sul cardine dell'Italia Nord-Est (Friuli).



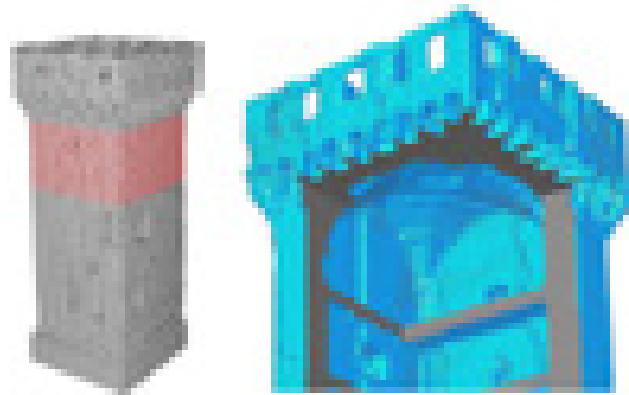
5.1.2. La migrazione dell'analisi strutturale verso la computazione 'formale' digitale

Con l'aumento delle pratiche di digitalizzazione del dato fisico e dei corrispondenti archivi virtuali, lo spazio di documentazione dedicabile all'informazione architettonica è aumentato, e ha posto nuovi orizzonti ai sistemi di visualizzazione e gestione per le caratteristiche costitutive fisiche ed i possibili livelli di indagine. Parallelamente alla crescente domanda di sistemi di gestione dati, ed al servizio di nuovi prodotti digitali, si evidenzia la mancanza di una banca dati che permetta lo sviluppo di operazioni sia di valutazione geometrica che di computazione tensionale sulle strutture edilizie, facilitando operazioni di programmazione e sviluppo dell'intervento di consolidamento.

Lo svolgimento di analisi statiche e dinamiche, lineari o non, su apparati strutturali di irregolarità storica è già applicato in diverse sperimentazioni, le quali tentano di congiungere la praticità degli schemi strutturali 'sintetici' agli elementi finiti¹⁵ con la qualità metrica di prodotti topografici e da scanner, per meglio certificarne l'affidabilità di calcolo¹⁶. Le piattaforme di elaborazione dedicate risultano comunque limitate in termini di gestione del dettaglio 'formale', necessariamente trasposto nella tipologia di "cellula" FEA con il peso di tutti i suoi gradi e coordinate di vincolo¹⁷ che la legano all'interno dell'*unicuum* di involuppo e, a sua volta, all'ambiente di simulazione.

Se si considera un aggregato strutturale, risulta immediato comprendere come esso possa costituire un contenitore digitale di un'eccessiva mole di informazioni metriche e formali, e l'obiettivo di gestire e manipolare tali dati indirizza ad una modalità di archivio non propriamente meccanica quanto geometrica e spaziale, ed in tali termini facilmente consultabile ed implementabile. Per questa ragione, la richiesta di produrre un sistema di fruizione remota ottimizzato per la gestione delle qualità formali di strutture fisiche, predisposte alle necessità di calcolo, richiama la loro riproduzione in una dimensione simulata di "second life" digitale delle opere architettoniche¹⁸.

"Il processo di rilevamento dal quale sarà generata la banca dati 3D garantirà l'affidabilità metrica e formale dello spazio virtuale, dove elementi vettoriali approssimeranno fenomeni reali e dove le informazioni saranno allocate a questi specifici elementi grafici, con la possibilità ulteriore di parametrizzare per quanto possibile



(5.10) Procedura automatizzata di estrazione di modelli FEA da nuvole di punti per l'analisi strutturale del Patrimonio Culturale: caso studio della fortezza di San Felice sul Panaro, Modena (Castellazzi, D'Altri et al. 2016, Università di Bologna).

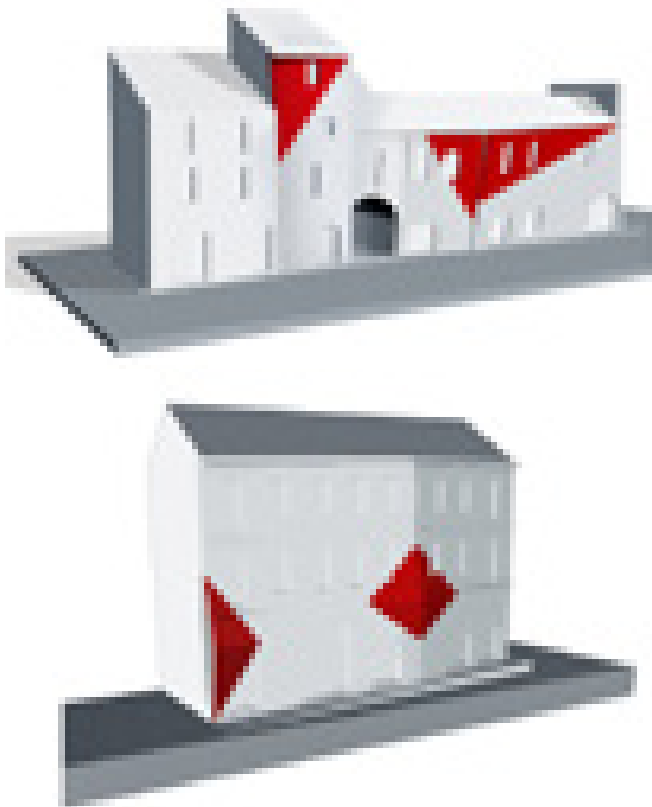
i valori dimensionali dei diversi ambienti o, come già sviluppato per alcune esperienze di realtà virtuale per il Cultural Heritage, il parametro del tempo"¹⁹. La 'struttura digitale' diviene così un modello affidabile, seppur sempre discreto²⁰, della 'struttura reale', ed in tali termini può essere criticamente interpretata e ridisegnata secondo un'alternanza di procedure automatiche e di disegno, dalle quali far emergere una forma più o meno semplificata delle caratteristiche principali del sistema strutturale complesso.

5.1.3. La trasposizione della 'forma digitale' per la rappresentazione della "memoria statica"

Gli eventi tellurici susseguiti con intervalli ridotti negli ultimi anni hanno motivato crescenti ricerche mirate a definire strategie di analisi per la prevenzione del rischio strutturale, incoraggiate dalla consapevolezza di una predisposizione intrinseca del territorio all'ampliamento degli effetti di danno provocati da quadri sismici di più ampio panorama²¹. Linee di approfondimento sono state condotte sul comportamento strutturale di aggregati architettonici, in particolare all'interno dei centri storici urbani, ma sovente limitate ad analisi numeriche o a progetti di ricostruzione post-sisma²².

All'incremento delle normative tecniche si sono gradualmente affiancate tecnologie di rilevamento 3D, in grado di produrre disegni sempre più affidabili e di compiere operazioni estensive su interi comparti urbani a vantaggio di una lettura più omogenea del tessuto edilizio, individuando labilità e deformazioni che potrebbero compromettere la stabilità delle strutture²³. La capacità di anticipare i comportamenti strutturali di unità edilizie ed aggregati urbani diviene così, più che la previsione dell'evento sismico, l'oggetto fondamentale di ricerca per la prevenzione di tutela non solo della popolazione ma anche delle opere costruite e dei beni monumentali.

Le pratiche di analisi si fondano in ogni caso sulla definizione di elaborati che riportano in sintesi l'integrazione di dati acquisiti da ricerche storiche documentarie, da attività di rilevamento, con particolare attenzione agli aspetti tecnologici e costruttivi, e da attività censuarie per la catalogazione edilizia, attribuendo così classificazioni di resistenza strutturale per la disposizione



di norme specifiche o per lo sviluppo di adeguate opere di consolidamento. In tale quadro, si evidenzia la necessità di unificare le operazioni di monitoraggio²⁴ generando, nel sistema virtuale delle banche dati 3D, prodotti geometrici univocamente definiti, seppur integrati, tra le diverse fasi dell'esperienza tensionale ritenute influenti per la conoscenza del manufatto ad oggi pervenuto.

La geometria strutturale, nella sua duplice natura di espressione-immagine e contenitore-forma, si pone così come mezzo privilegiato di sintesi di processi analitici multi-temporali, condotti tra azioni di documentazione e processi di comparazione, e come contenitore informativo digitale dall'immediata lettura e comunicazione dei dati. La varietà di caratteri del patrimonio costruito secondo le diverse modalità di sollecitazione pervenute nella storia dell'opera architettonica contrasta la definizione di un criterio di conoscenza statica "a priori", con eventi di natura sia accidentale che progettuale non sempre propriamente regolamentabili. Il controllo di parametri morfologici delle strutture difficilmente si configura come assoluto e invariabile, per poterli normativamente applicare con uniformità a ciascun contesto edilizio. In tal senso, essi dovrebbero invece essere orientati verso una strategia di documentazione "dinamica" e ciclicamente pianificata, prevedendo protocolli di monitoraggio che oltre all'indicizzazione di archivi sullo stato di fatto istituiscano la possibilità di interconnettere metadati e database di fasi 'statiche' temporali²⁵.

Tale richiesta contribuisce all'orientamento dei sistemi di documentazione verso una strutturazione degli archivi e dei dati, sistematizzandoli in fasi e prodotti metodologici (disegni, modelli ed elaborati di sintesi critica ed interpretativa). Nelle molteplici possibilità di realizzazione, tali sistemi devono essere logicamente conseguiti al fine di supportare e interpretare la lettura delle specificità sia tecnico-operative che culturali, dalle cui analisi derivano pratiche di intervento e implementazione che possono mettere in relazione il passato, presente e futuro di una configurazione strutturale specifica o di un elemento costruttivo che si riferisce ad essa.

(5.11) Identificazione dei blocchi di labilità per la mappatura di emergenza del centro storico di Pavia. Dal confronto con l'immagine precedente, emergono le differenti possibilità di corrispondenza nel dettaglio e carattere formale per la rappresentazione delle strutture digitali.

5.2 METODOLOGIE DI RILIEVO INTEGRATO PER LO SVILUPPO DI DATABASE 3D AFFIDABILI SULLE STRUTTURE

Per le specifiche finalità esposte, il processo di indagine strutturale è orientato su una strategia metodologica per la documentazione formale dell'apparato resistente in termini digitali. Tale programma focalizza da un lato il soggetto dell'analisi, la 'forma', per le qualità di informazione meccanica, dall'altro il prodotto tipologico della sua trasposizione digitale, il 'database morfo-metrico', per le possibilità di ottimizzazione nelle applicazioni di computazione e comparazione statica secondo le linee di normalizzazione tecnica.

La ricerca nell'ambito della documentazione architettonica ha visto nel corso degli ultimi decenni una crescita esponenziale dell'utilizzo di tecnologie digitali per l'acquisizione e post-produzione di dati sui tessuti edificati²⁶. Le tradizionali fasi di rilevamento, finalizzate alla redazione di disegni destinati a descrivere lo spazio architettonico, i suoi componenti primari ed i caratteri di stabilità dei singoli edifici, sono state in tali termini affrontate e rielaborate per conseguire una 'forma architettonica digitale' affidabile e completa secondo nuove tolleranze valutate.

L'esperienza del rilevamento ha sviluppato pratiche diffuse di integrazione tecnologica e strumentale per il conseguimento di dati digitali dello spazio costruito, garantendone accuratezza metrica e corrispondenza materica con opportune considerazioni e calibrazioni di loro applicabilità. Il panorama di tecniche di acquisizione indiretta *close-range* delle superfici architettoniche si è contraddistinto tra procedure *Range-based* e *Image-based*, e ha centrato l'azione di sensori, alternamente 'attivi', a segnale infrarosso riflesso, o 'passivi', dalle proprietà colorimetriche di fattori fotografici, per trasferire ed elaborare informazioni fisiche delle strutture in ambiente virtuale 3D.

Nell'ambito delle procedure *Range-based* applicate al rilievo delle strutture architettoniche, il supporto di strumenti a sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*) come stazioni totali e laser scanner terrestri TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) ha enfatizzato la restituzione



Casi studio di database digitali complessi da progetti di rilevamento, condotti per finalità di lettura delle caratteristiche architettoniche, planimetriche e degli apparati presenti sui fronti in differenti contesti. (5.12) Nuvola di punti TLS del centro storico di Betlemme, più di 2.000 scansioni raccolte in un'unica ScanWorld di rappresentazione della città labirintica araba.

puntuale di coordinate e posizioni nello spazio associate a punti morfologici notevoli. In particolare, i laser scanner (a triangolazione o tempo di volo) hanno riscontrato un grande successo e hanno migliorato la facilità di acquisizione per dati metrici e formali relativi a fabbricati o ad ampi comparti costruiti, restituendoli sotto forma di nuvole di punti dense ma non strutturate.

Parallelamente, le sperimentazioni prodotte nell'ambito della fotomodellazione hanno promosso una crescente diffusione delle procedure *Image-based* per rilievi architettonici e urbani, offrendo opportunità di restituzione 3D di superfici parietali e sistemi morfologici con ottimizzazione delle scale colorimetriche di resa materica. Il principale vantaggio di tali tecniche, rispetto all'uso di strumenti a misurazione metrica, è rappresentato

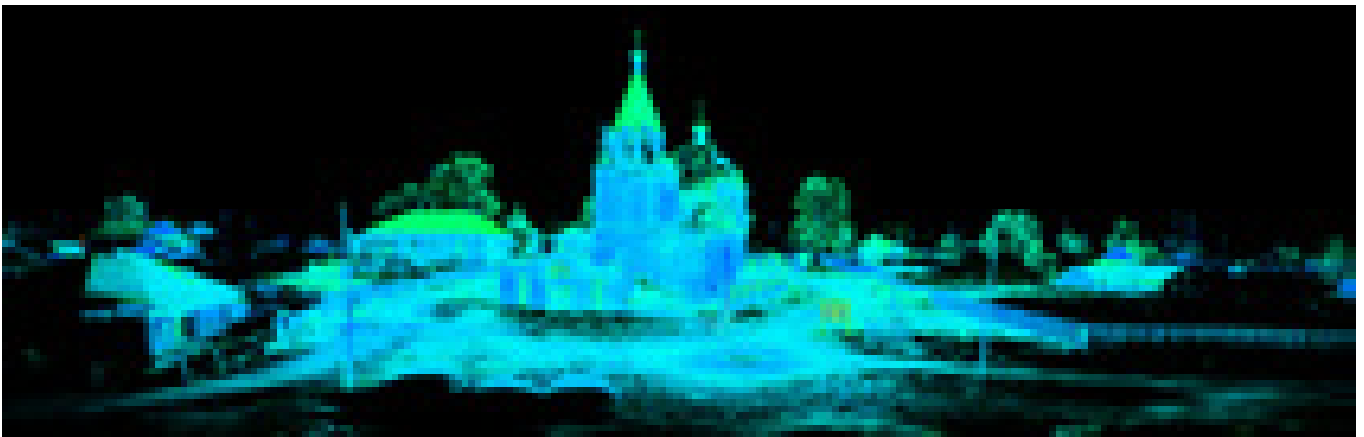
dall'economicità e trasportabilità delle camere, nonché dalla semplicità di scatto dell'immagine sorgente.

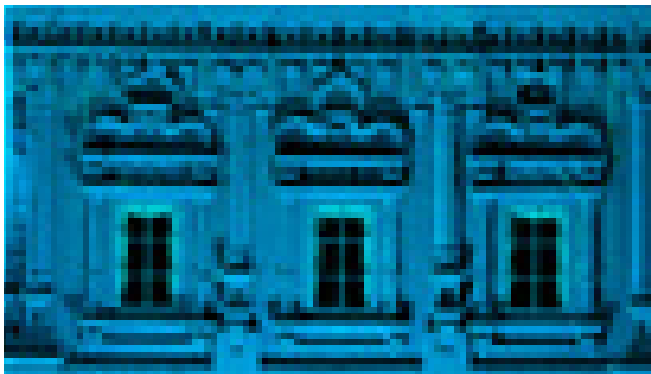
Tale premessa metodologica e strumentale è calata in un contesto di valutazione per la corrispondenza ai requisiti della documentazione degli apparati strutturali.

Rimarcando l'obiettivo centrale di restituzione della 'forma imperfetta', staticamente plasmata, della struttura, la pianificazione primaria di una documentazione metrica è assunta come ragionata strategia. Le procedure di misurazione TLS, in questo caso, offrono la restituzione di una forma digitale che oltrepassa i limiti di informazione bidimensionale, insufficienti a descrivere la complessità volumetrica delle forme strutturali storiche. Il dato metrico si espande nella sua tridimensionalità costitutiva, ad indagare con affidabilità la singolarità formale dal dettaglio locale all'intera struttura stratificata. Si intende in tal caso una sensibilità di accuratezza dimensionale per l'"alterazione" formale, che non presuppone ancora un riconoscimento critico da parte dello strumento del fenomeno meccanico corrispondente ma ne consegue una base documentativa. I TLS risultano inoltre associati all'integrazione di una vasta gamma di sensori e unità, come GPS e localizzatore UTM, volti ad un miglioramento della qualità e gestione delle informazioni metriche, sia nei processi di origine che in fase di post-produzione. Il prodotto di *output*, il database "discreto" tridimensionale, riconduce l'acquisizione di scansioni spaziali dislocate (*ScanStations*) a georeferenziate "nuvole" di punti globali (*ScanWorlds*), virtualmente interattive. Tali ambienti digitali orbitabili permettono amplificate ed interconnesse potenzialità



Sopra (5.13-5.14) Nuvole di punti da TLS elaborate in modalità fast (10-20 scansioni per complesso) sui siti monumentali della rotta dell'Upper Kama, in Russia, per l'inquadramento del complesso nel territorio locale. Sotto (5.15) Nuvola di punti del complesso di Bondjug (Upper Kama), sul perimetro costruito della chiesa principale (inaccessibile), 2018.





Definizioni di maggior qualità di ripresa, attraverso parametri di calibrazione e pianificazione delle poligonali di acquisizione, per garantire più accurate mappature discrete delle superfici al dettaglio della composizione strutturale. Dall'alto (5.16) porticato del complesso di Al Jazzar (Acri, 2017), una scansione per campata; (5.17) complesso di Bondjug (Upper Kama, 2018) scansione a meno di 3 metri dalla superficie; (5.18) chiesa di Nyrob (Upper Kama 2018), superfici plastiche a più di 5 m di altezza.

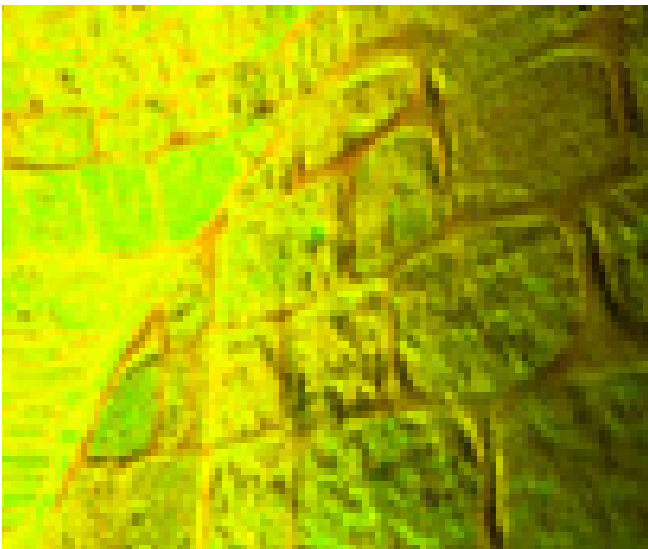
di classificazione e analisi delle complessità strutturali, introducendo indagini e considerazioni tipologiche altrimenti dal supporto frammentato e dispersive. Le procedure di registrazione certificano una banca dati al cui interno è possibile identificare paramenti tessuari, componenti ed unità costruttive, fino alla conformazione degli agglomerati urbani. Le tolleranze di registrazione riscontrate, dell'ordine millimetrico, supportano la sensibilità dimensionale richiesta per l'analisi strutturale, permettendo una riflessione comprovata su labilità e deformazioni dei sistemi²⁷.

In tale strategia di base, anche le procedure fotogrammetriche e le sperimentazioni *Structure from Motion* vedono buone potenzialità di applicazione per la documentazione strutturale. L'assenza di referenziazione metrica ne vincola l'applicabilità ad una necessaria scalatura dimensionale dei *chunk* conseguiti, per cui tali procedure devono essere affiancate a fasi di misurazione, impedendone l'applicazione *stand-alone*. Lo sviluppo delle camere e degli algoritmi di elaborazione fotogrammetrica, tuttavia, sta incrementando le opzioni di auto-referenziazione proprie dei dati immagine utilizzati, sia in termini di localizzazione che per la qualità di ricostruzione geometrica, calibrabile nel dettaglio dalla scala del centimetro a quella millimetrica con opportune considerazioni su impostazioni della camera e copertura di scatto. Al contempo, la praticità di manovra e la definizione del quadro di ripresa, focalizzandone la nitidezza di immagine su micro-porzioni e fessure come su ampie aree di quadri di lesione, si è conformata alle esigenze di documentazione di dettaglio delle superfici strutturali. Sono offerte calibrazioni più sensibili, intermedie tra il raggio di ripresa del TLS e l'applicazione di scanner a luce strutturata, difficilmente gestibili alla scala dell'organismo architettonico in termini sia di posizionamento che di orientamento dei dati parziali.

In entrambi i casi, la qualità del dato conseguito per la forma strutturale dipende non solo da fattori legati ai parametri dello strumento (densità di misurazione e "ribattitura" nel primo, nitidezza di immagine e densità di scatto nel secondo), ma anche da caratteristiche legate alla praticità e strategia di posizionamento dello strumento per la ripresa, modalità di movimento ed applicazione in sito dell'operatore²⁸.

Entrambe le macro-categorie di applicazioni *Range-based* e *Image-based* sono oggi interessate da un'avanguardia tecnologica su sensori e strumenti, verso soluzioni dinamiche di applicazione in sito con una relativa ricalibrazione di tempistiche e qualità del dato nel prodotto finale.

Le soluzioni di mappatura rapida alla scala architettonica e urbana hanno introdotto nel panorama dei sistemi LiDAR dei prototipi *mobile*, prima montati su autoveicoli con strutture dedicate poi sperimentati in *device* portatili a localizzazione e mappatura simultanea. Il caso dei sistemi SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) sintetizza in un unico blocco strumentale un sensore LiDAR, un sistema inerziale e una camera ottica per dati posizionali di base, trasportabili dall'operatore con apposita asta di sostegno per consentire una scansione dinamica durante il suo movimento (*acquisition in motion*). Tale configurazione ha riaggiornato i principi del *mobile mapping system*, introducendo una procedura di acquisizione e gestione dei dati non più per posizioni topografiche ma tramite traiettorie di acquisizione (*acquisition trajectory*), dinamicamente registrate in tempo reale con strategie di decimazione dell'errore di deriva²⁹.



Limite del dettaglio sulla texture morfologica dei paramenti strutturali, affinata sia in termini di geometria che di riflettanza dei punti acquisiti. Dettagli superiori, difficilmente acquisibili con scanner a tempo di volo, risulterebbero anche difficili in gestione e ridondanza di punti per le finalità di analisi alla scala architettonica.

(5.19) Superficie muraria delle campate strutturali voltate presso il porticato della Moschea di Al Jazaar, Acri 2017.

Parallelamente, il rilievo fotogrammetrico non risulta più limitato alla capacità di posizionamento dell'operatore con camere digitali terrestri, ma è oggi ampliato da riprese in quota tramite camere *gimball* su aste telescopiche e camere aeree UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Recentemente i droni per fotogrammetria, analogamente all'uso di aste telescopiche, hanno avuto un forte successo e sviluppo nel campo della documentazione sia territoriale che architettonica, permettendo di acquisire immagini orizzontali o oblique da postazioni di ripresa sopraelevate. Tali procedure, controllate in remoto da un operatore a terra, sono supportate anche da un intenso sviluppo di software di pilotaggio e pianificazione delle campagne "di volo", a garantire una migliore copertura ed affidabilità di monitoraggio, oltre a localizzare e referenziare metricamente i dati conseguiti attraverso sensori GPS integrati. La copertura della documentazione è così integrata grazie alla quota metrica di ripresa verticale, accedendo e densificando il dato acquisito anche nelle porzioni di elevato degli apparati strutturali in tutto il loro sviluppo altimetrico, in particolare per l'analisi dei sistemi di coronamento e copertura secondo la specifica conformazione del contesto³⁰.

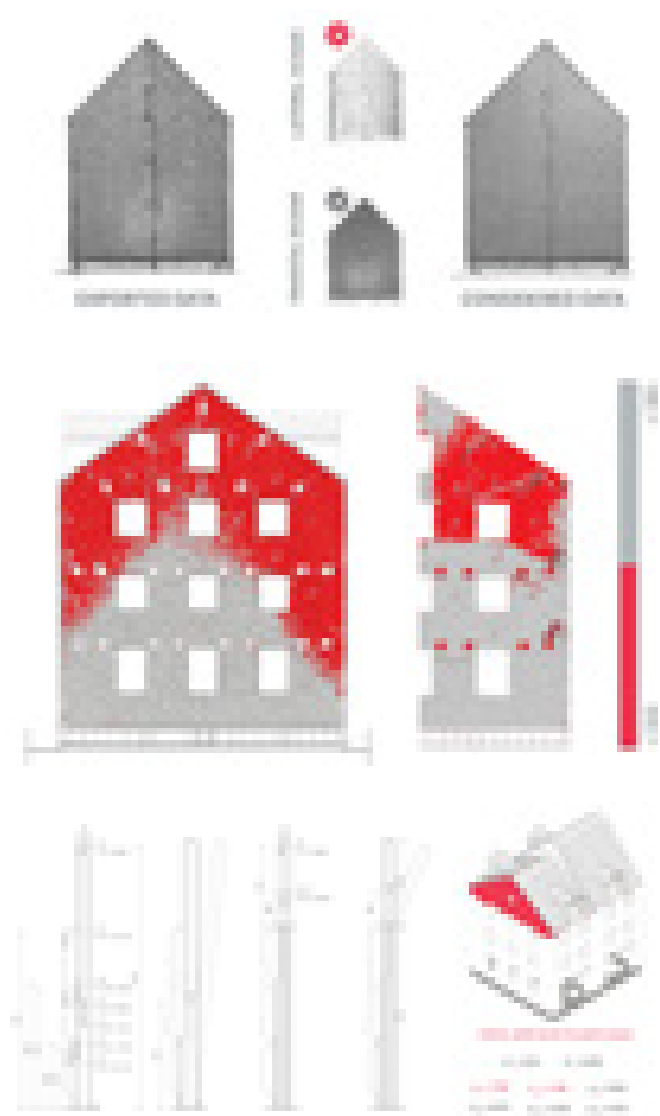
La revisione dei casi studio e delle implementazioni strumentali conferma come la strategia di rilevamento digitale integrato sul patrimonio costruito possa essere adattata al criterio programmatico di documentazione intensiva sugli apparati strutturali³¹, dialogando anche con *dataset* da sensori di diretta misurazione dinamica³². Dall'ottenimento di supporti metricamente dettagliati, la trasposizione della forma 'integrale' è perseguita con una specializzazione di strumenti e procedure trasversalmente alle capacità di acquisizione e copertura. *Scan stations*, nuvole di punti e mappature ad ampio raggio si qualificano come metadati di un processo operativo di elaborazione dell'informazione strutturale, e l'azione di documentazione integra le sue procedure con missioni di acquisizione in situ adattabili e gestibili tra sistema complessivo e singolarità costruttive delle componenti di sistema.

In questo quadro di esigenze, l'ampia scelta di strumenti e metodologie digitali per il rilievo, spesso applicati come ridondante politica di base, è offerta invece come ragionata strategia di analisi ed opportunità di rappresentazione integrata degli apparati strutturali, calibrata nella ricerca di valori ottimali mirati sulle specifiche statiche e deformative del contesto di studio.

5.3. OBIETTIVI DI CONSEGUIMENTO E QUALITÀ MORFOLOGICA DEL DATO DIGITALE

A fronte delle diverse metodologie di rilievo e di sensori per i database 3D morfo-metrici, le possibilità di calibrazione tecnica di strumenti e modalità di ripresa portano ad una necessaria riflessione dei parametri di influenza sulla qualità metrica ed il dettaglio formale di digitalizzazione. Coerentemente alle finalità conoscitive ed alle caratteristiche strumentali, anche un approccio documentativo non specificatamente implementato conseguire una dimensione e qualità di dati morfo-metrici sufficienti a condurre alcune considerazioni su determinati aspetti strutturali. È il caso più evidente delle deformazioni fuori piano, dove i dati necessari possono essere raccolti anche solo attraverso singole riprese non referenziate tra loro, purché corrispondenti in dimensione e allineamento alla conformazione reale. D'altro canto, più l'interrogazione delle 'qualità morfologiche' richiede di essere sviluppata in termini di localizzazione del fenomeno statico (influenze nel piano, inflessioni, rotazioni...) e relazione di tali fenomeni nel complessivo scheletro di sistema (meccanismi composti e di sviluppo cinematico), più emerge la specializzazione di sensibilità ed orientamento dei dati in un *database* coordinato sulla struttura, dove siano esprimibili relazioni tra le misurazioni condotte non solo in rapporti di superficie ma più propriamente spaziali. In tali termini è espresso anche il requisito di 'completezza' della copertura di documentazione, implementabile oltre i coni d'ombra, gli scorci e la distanza di ripresa con un'attenzione rivolta alla pianificazione sia della singola acquisizione che dell'integrazione multi-strumentale. Il conseguimento del *database* è così raggiunto nella potenzialità di collettore unico di dati 3D, globalmente relazionati sull'interezza delle componenti proprie e connessioni relative della fabbrica strutturale, non limitando la gestione conoscitiva ad informazioni locali e parziali.

Il concetto di parzializzazione della morfologia è richiamato per la gestione del *database* non solo in termini macro-spaziali, inerenti alla configurazione statica di studio, ma



(5.20) Confronto tra catalogo normato dei meccanismi delle strutture in muratura e le informazioni dedotte da rilievo digitale. Il livello di informazione garantito dal database morfometrico risulta molto più alto rispetto all'analisi semplificata del macro-blocco ed alle formulazioni teoriche adottate nell'analisi diffusa di instabilità.

come riferimento centrale di controllo dei diversi livelli di affidabilità e corrispondenza del dato, da 'locale' (nube puntuale) al comparto 'settoriale' (*dataset*, *scanset* o *chunk*) fino a raggiungere la dimensione del *database* 'globale'. In tali disposizioni sono così approfonditi gli obiettivi qualitativi per la 'forma integrale' della "pelle" statica, con una 'modulazione' della discretizzazione del rilievo nell'astrazione di una 'forma minima' resa adeguata alla sensibilità dimensionale di indagine.

Gli obiettivi assegnati alla qualità morfo-metrica del "database strutturale" concentrano così metodo e prodotti della documentazione digitale sul dettaglio del dato acquisito ('densità superficiale') e la sua definizione nei limiti geometrici ('dettaglio al contorno'), tenendo in considerazione come la forma conseguita, seppur discreta, derivi dalla finalizzazione dei processi di 'registrazione', 'filtraggio' ed 'ottimizzazione' sul dato strumentale.

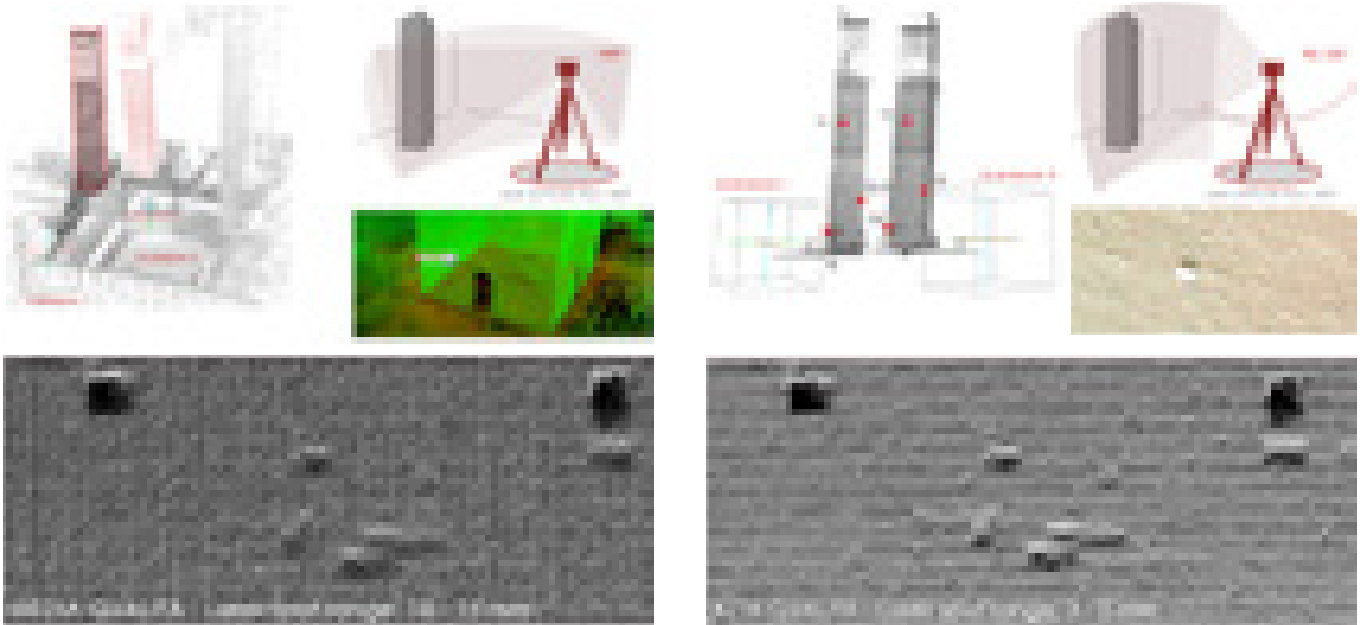
Nella flessibilità di tali variabili, è possibile sistematizzare alcune considerazioni di calibrazione del rilievo digitale per il *focus* strutturale, aggiornando i giudizi qualitativi per guidare in maniera più specifica l'approccio di acquisizione, pianificazione e post-produzione.

5.3.1. La densità superficiale

La densità superficiale rappresenta il parametro più identitario della digitalizzazione morfo-metrica, influenzante la mole di dati discreti del *database* formale sulla struttura e conseguentemente la dimensione di lettura di ogni sua possibile alterazione cinematica.

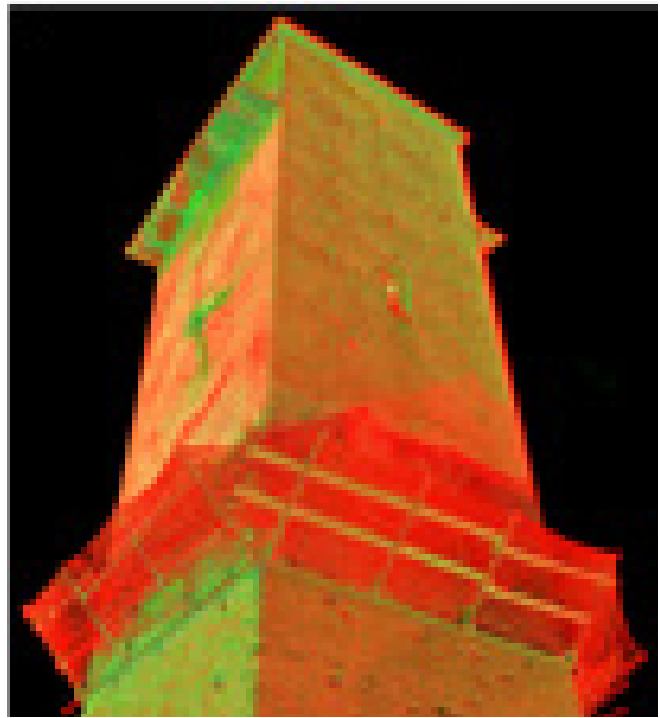
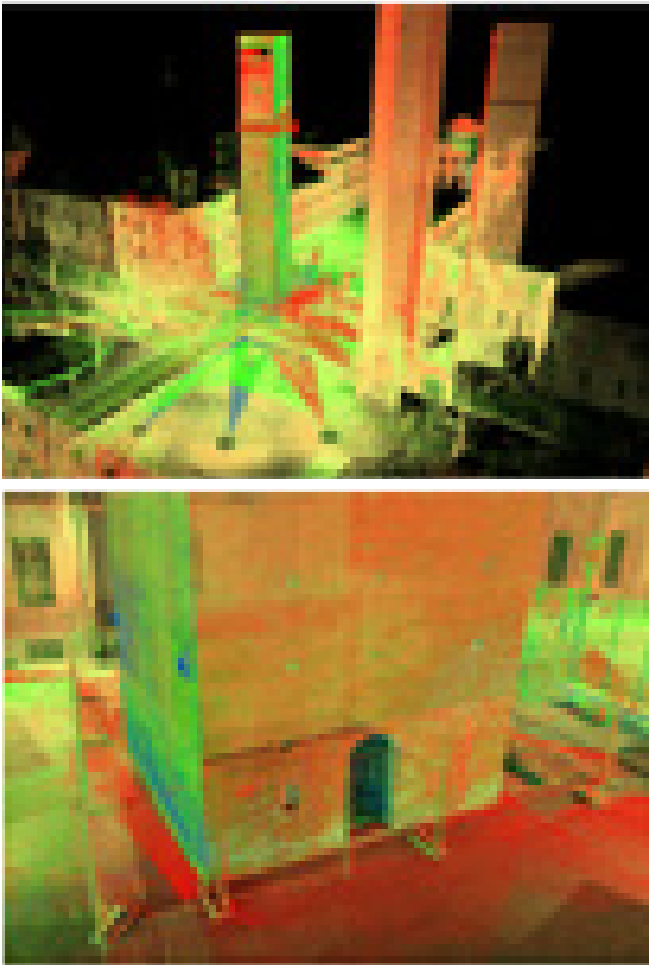
Il principio di concentrazione del dato metrico per unità di area porta l'attenzione sulla natura specificatamente 'discontinua' dell'informazione conseguibile: nonostante lo sviluppo di sensori, la modalità di trasposizione della forma rimane collegata alla raccolta di un *dataset* discreto di valori sulla superficie³³. La lettura di tali dati in termini morfologici è così influenzata da una doppia valutazione di densità, sia 'dimensionale' come intervallo e quantità di dato acquisito³⁴, che 'posizionale' per quanto riguarda la disposizione "strutturata" di tale addensamento in una corrispondenza di logica meccanica con la complessità della specifica forma superficiale³⁵.

Il panorama tipologico degli apparati strutturali storici identifica una varietà limitata di componenti costruttivi, generalmente concentrati attorno a materiali lapidei,



Caso studio della torre medievale dell'Orologio a Pavia, con rilievo digitale finalizzato alla diagnosi di instabilità murarie (2019). La torre è alta 37 metri e si trova all'interno del tessuto denso del centro storico, con una

dimensione in pianta quadrata di lato 5,7 m. Nuvole metriche a confronto: (5.21) campagna di rilevamento standard con qualità media di ripresa; (5.22) infittimento per coni visuali in qualità alta solo sul blocco torre.



Qualità finale di dato morfo-metrico conseguito sul blocco murario della Torre dell'Orologio di Pavia.

(5.23) Corrispondenza delle poligonali di dataset 'standard' ed 'infittiti'; dettagli della superficie discreta da ScanWorld ad alta densità, (5.24) alla base e (5.25) in sommità (37m) del blocco della torre.

L'oggetto strutturale contenuto e definito permette di controllare con maggior precisione i valori caratteristici del dato in fase di ripresa e gestione, ottimizzando la maglia discontinua sulla struttura.

cementizi o in laterizio, applicati in elementi costitutivi a blocco o modulari, mediamente variabili tra dimensioni di 5 e 50 cm. Elementi metallici a vista sono invece localizzati in geometria puntuale³⁶, come profilati, catene, capochiavi, putrelle, con grandezze variabili tra i 2-3 e i 20 cm. Tale repertorio è poi declinato ad una più ampia variabilità di soluzioni dispositive e di conformazione della struttura globale, di carattere sia regolare che irregolare, che proprio in funzione della riconoscibilità di disposizione degli elementi costitutivi riescono ad essere univocamente identificati e ricondotti a moduli costruttivi e logiche fenomeniche.

A fronte di tale raccolta, in termini di complessità della micro-morfologia superficiale, le tolleranze dimensionali risultano contenute: le deformazioni locali dei paramenti composti in

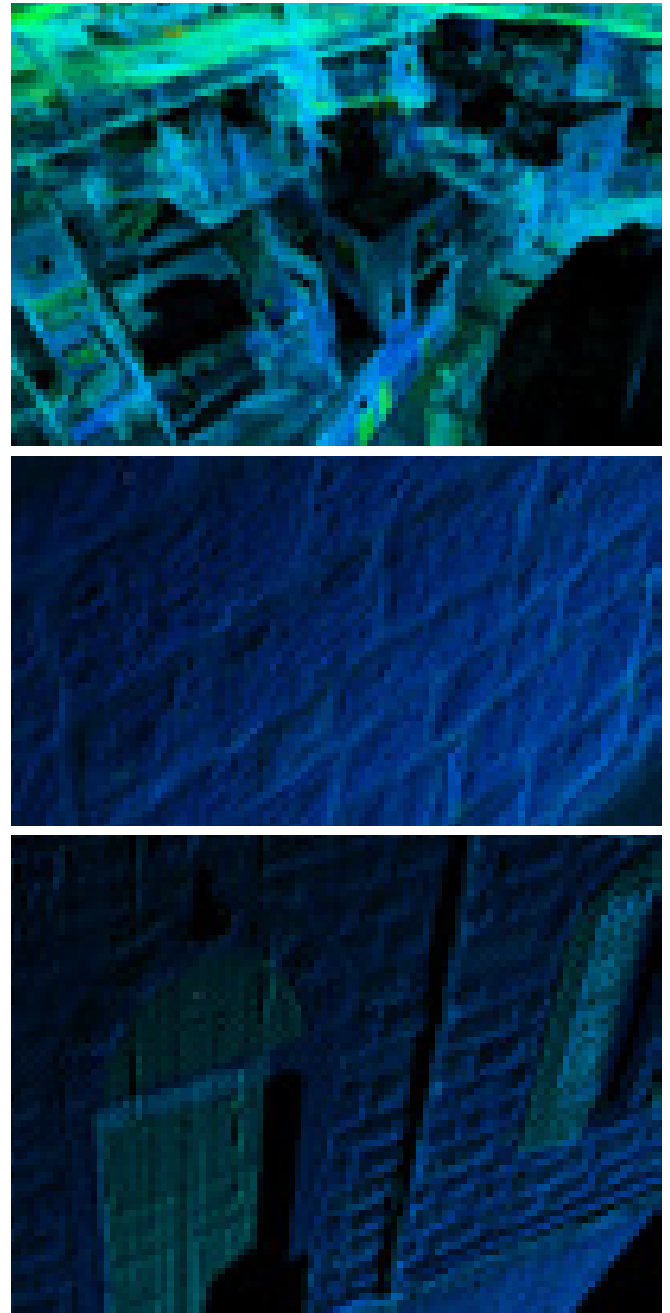
blocchi sono meccanicamente influenzate dalla statica locale e complessiva della fabbrica, con *drift* variabili da 1 mm a 10-50 cm, oltre i quali i dissesti osservabili si configurano prevalentemente come fenomeni di distacco o crollo che portano ad una scissione della forma. Al contrario, la natura morfologica propria dei quadri di fessurazione richiama una scala di dettaglio ancora più specifica, con delle dimensioni di faglia tra 1 cm e 1 mm e profondità di spessore variabile, anche fino a 5 volte l'ampiezza millimetrica.

L'ottimizzazione della densità superficiale di digitalizzazione si conferma quindi come parametro necessario di documentazione non solo per il macro-meccanismo di danno, più facilmente valutabile e misurabile, ma in particolare per i quadri di insieme delle deformazioni

locali conseguite al dettaglio fessurativo, trasponendo un'informazione formale potenziata rispetto a quella visualmente percepita e garantendo adeguate sensibilità dimensionali per il monitoraggio evolutivo dei fenomeni.

In riferimento alla dimensione di trasposizione del dato morfo-metrico discreto, è possibile valutare una densità ottimale contenuta ad almeno 1 mm di *spot spacing* tra i punti acquisiti, considerando come la sovrapposizione di almeno 3 *dataset* registrati ed eventuali processi di filtraggio possano incidere fino al $\pm 30\%$ di variazione del dato e sul conseguente incremento di *spot spacing* ad una media di 3 mm per scansione, ancora accettabile nei limiti di tolleranza per la valutazione normalizzata di deviazione. A tale riguardo, la sensibilità dei sensori odierni ha portato ad una capacità di incremento degli *spot spacing* di un singolo *dataset* anche al di sotto dell'ordine millimetrico, rendendo LiDAR ad ampio raggio e camere fotogrammetriche competitivi sugli scanner di precisione a luce strutturata, i quali seppur migliorati in termini di manovrabilità di ripresa rimangono difficilmente applicabili alla scala architettonica per il limitato raggio di acquisizione e la frammentarietà dei *dataset*³⁷.

In termini 'posizionali', il controllo di densità in localizzate aree di selezione può essere solo limitatamente impostato per acquisizione strumentale³⁸, non riuscendo a risentire in modo automatico di un'identificazione logica per l'incremento dei dati discreti su porzioni localizzate a concentrata variazione formale, come quadri di fessurazione. Il caso di superfici parietali in blocchi a vista e componenti a profilo assottigliato (capichiave, profili metallici) richiama una maggiore complessità morfologica per irregolarità o proporzioni tra le dimensioni geometriche delle facce poligonali, tale da suggerire la potenzialità di una densificazione localizzata del dato morfo-metrico adeguata ad una più nitida definizione della forma particolare. Tale presupposto influenza la pianificazione delle postazioni di ripresa con una strategia geometrico-spaziale adattata sia alle superfici principali che ai piani di scorcio ed inclinazione delle specifiche micro-morfologie del supporto strutturale. L'acquisizione è così studiata sulla relazione tra la curvatura locale della superficie, come rapporto tra la deformazione specifica e la profondità del piano medio, ed il posizionamento del sensore, includendo postazioni di acquisizione anche più ravvicinate, a meno di 1-2 m di distanza dalla superficie strutturale, per favorire la qualità di curvatura media delle porzioni



Rilievo digitale morfo-metrico estensivo con laser scanner sul centro storico di Betlemme (2018). La pianificazione di una campagna annuale a copertura dell'intero tessuto urbano non ha permesso una calibrazione ad hoc puntuale per ciascuna superficie dell'edificio, mantenendo dei valori medi di ripresa. Ne risulta che su un singolo aggregato (5.26) vi siano notevoli variazioni di densità tra le porzioni basamentali (5.27) e di sommità (5.28).

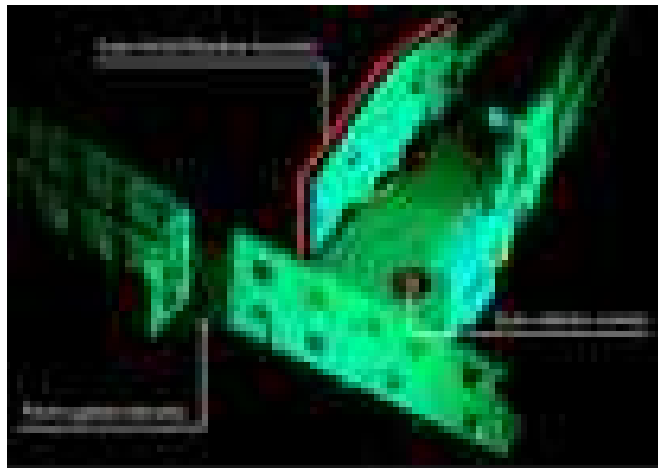
geometriche da 1/3 fino a 1/10³⁹. Tale accortezza è relativa alla trasposizione del dato mediante misurazione in sito, mentre possibili densificazioni possono essere attuate anche in post-produzione, con libertà di approssimazione più o meno estese, tramite *tool* di interpolazione dei dati discontinui offerti dai principali *software* di gestione per nuvole di punti, in termini percentuali o di valore medio di *required spot*.

5.3.2. La copertura dei dataset e il dettaglio al contorno

Considerando la densità superficiale di dato in termini di dettaglio della forma, la valutazione della qualità di trasposizione al contorno dell'involuppo si concentra sul fattore di 'continuità' della copertura di documentazione.

La pratica del rilevamento per scanner LiDAR comporta, relativamente alla complessità di forma e geometria di una fabbrica architettonica, la presenza di eventuali coni d'ombra di ripresa. L'acquisizione parzialmente interrotta dalla presenza di spigoli, elementi interposti e *layer* di elementi congiunti o sovrapposti è accettata come mediazione tra la completezza della copertura superficiale e le caratteristiche tecniche della campagna di rilevamento in termini di tempistiche, strumentazione e manovrabilità dell'operatore. Se il traguardo di una copertura globale e totale dell'edificio è auspicato per la conoscenza completa dell'opera, è anche riconosciuto come il contributo critico dell'operatore in fase di post-produzione costituisca esso stesso un importante fattore nell'integrazione di eventuali mancanze di dato. Tale operazione, conseguibile nell'ambito della restituzione in disegni vettoriali, diviene sempre più complessa e potenzialmente inaffidabile quando applicata direttamente sul *database* morfo-metrico tridimensionale.

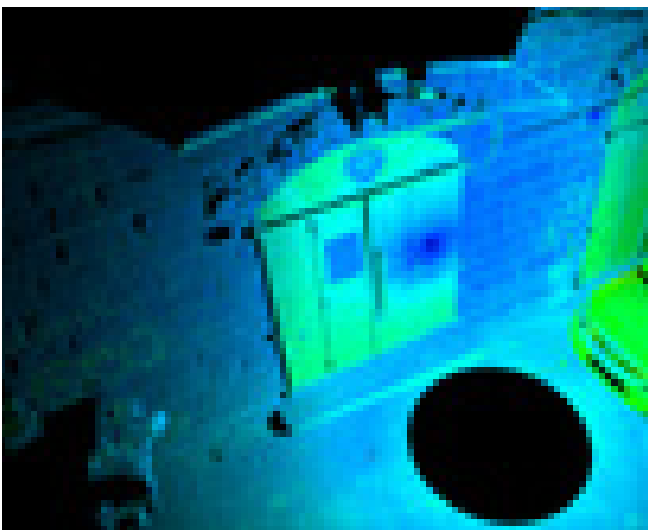
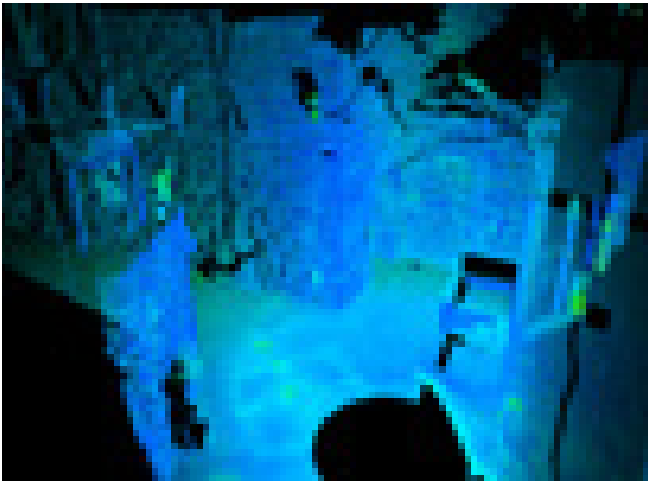
La finalizzazione di digitalizzazione strutturale richiama così una maggiore constatazione sulla modalità di integrazione dei dati morfo-metrici in presenza di *data holes*, nei confronti dei quali diviene possibile procedere per mezzo di diverse opzioni di astrazione della forma e, conseguentemente, di approssimazione della corrispondente informazione statica. Mentre la macro-geometria della struttura permette di essere recuperata anche da un'informazione metrica parziale, in funzione degli allineamenti regolari dello schema resistente, la specifica in termini di micro-morfologia ed alterazione



Sopra (5.29) rapporti principali di conformazione della ripresa digitale e dei suoi limiti rispetto alla postazione di acquisizione. Si evidenzia come la copertura del dataset sia influenzata dalla presenza di limiti visuali di ripresa, tali da frammentare la digitalizzazione delle superfici. La distanza dalla postazione, inoltre, determina la lettura referenziata di tali punti in funzione della distanza dal centro di ripresa, anche in assenza di barriere d'ombra.

Nella pagina a lato (5.30-5.33) Scansets da singole postazioni all'interno della campagna di rilevamento del centro storico di Betlemme (2018). Si notano differenti casi dove secondo la postazione di ripresa (sempre ben visibile nel cerchio privo di dati), la vicinanza al centro, la geometria del contesto e la riflettività dei materiali, la copertura di acquisizione del dato è più o meno limitata, ed il bordo del dataset risulta nitido (per ostacoli visuali) o disperso (nel caso di scorci su pareti continue a superficie più o meno modellata).

tessuraria rischia di essere completamente persa, con una mediazione a partire dal dato concentrato sul bordo che è direttamente proporzionale all'estensione dell'area priva di dato. In presenza di micro-coni di ombra legati alle proiezioni degli stessi blocchi costitutivi nella specifica lavorazione superficiale, il dato può essere interpolato con buona approssimazione tale da non alterare tipologia ed entità del fenomeno in corso. Nel caso invece di ampie porzioni paramentali, in particolare spigoli e angoli di congiunzione tra componenti e connessioni, tale privazione di dato rischia di compromettere quasi interamente l'identificazione completa di meccanismi locali innestati, parzializzando il quadro di analisi.

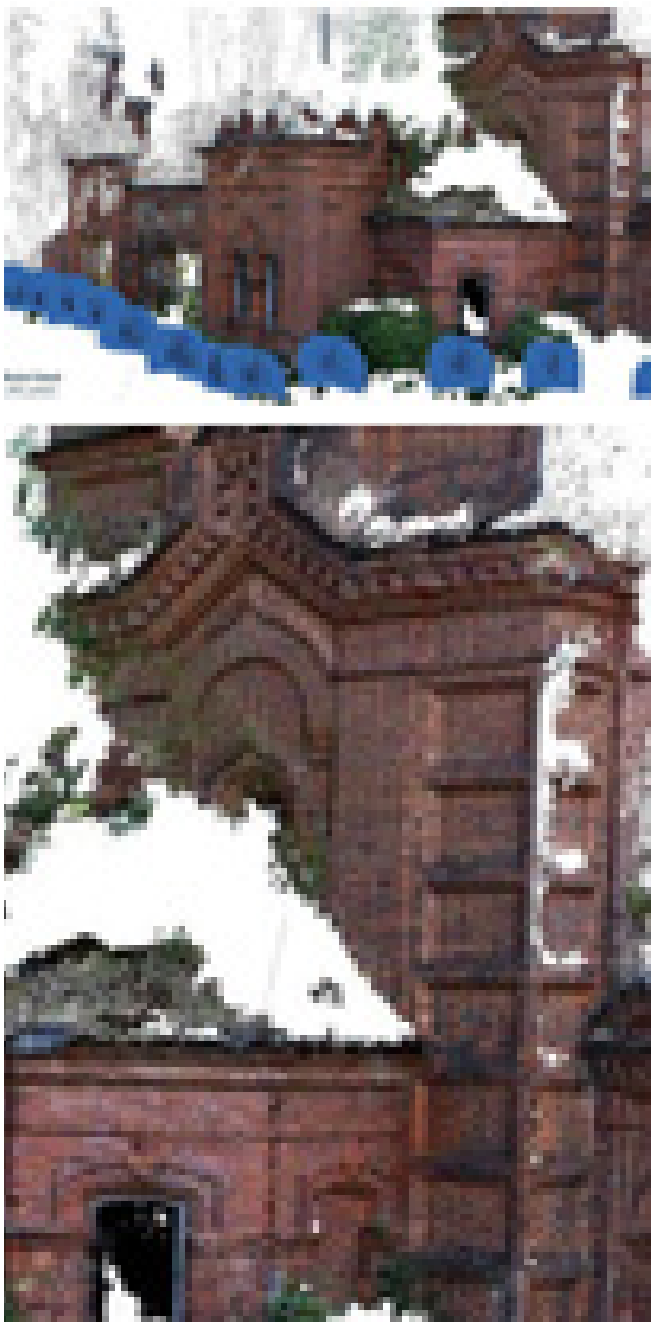


In tali termini, il fattore di 'continuità al contorno' può definirsi concentrabile su quattro livelli di astrazione:

- 'copertura totale', con dato discontinuo "in continuità", privo di aree a densità nulla.
- 'micro-discontinuità', in presenza di *holes* di dato localizzate e di ridotta estensione in rapporto al blocco costitutivo della struttura (micro-morfologie).
- 'discontinuità morfologica', in caso di assenza di porzioni significative di dato tali da compromettere l'affidabilità di interpolazione per la tessitura parametrica (coni d'ombra architettonici).
- 'discontinuità geometrica', quando l'estensione dell'area del dato assente è tale da compromettere

la deduzione della regolare geometria di schema (parzializzazione della copertura di acquisizione).

I primi due casi includono un'assenza di dato di estensione mediamente non superiore ai 5-10 cm, tale da non compromettere la derivazione di misure interpolate. Le altre due opzioni evidenziano invece una mancanza di dato estesa dall'ordine della decina di centimetri fino a 1-2 metri, in relazione alla qualità di pianificazione della campagna di acquisizione, condizionante l'assenza di una più estesa porzione di sistema resistente soggetto al fenomeno deformativo. In questo caso la mediazione di valori intermedi per garantire la continuità della forma discreta è limitata nell'ipotesi dal solo valore di contorno del cono di ombra.



Parzializzazione e disturbo del dettaglio al contorno di una nuvola di punti da fotogrammetria SfM. Si evidenzia la necessità di ulteriori operazioni non automatizzate di gestione del dataset per procedere ad una sua elaborazione ottimizzata in termini di ricostruzione formale. (5.34) Inviluppo strutturale esterno nella chiesa di Pokcha, in Upper Kama, nuvola di punti densa da ripresa fotogrammetrica terrestre.

5.3.3. La referenziazione spaziale

La specifica caratteristica di discontinuità del dato nelle campagne di rilevamento condiziona una necessaria fase di registrazione dei *dataset* eseguiti, finalizzata ad una referenziazione dei dati parziali per la copertura totale della struttura di analisi.

La messa a registro di tali dati disgiunti comporta una necessaria valutazione del contenimento dell'errore di registrazione tra i *dataset*. Se in ambito architettonico, nonostante l'approfondita sensibilità degli strumenti a misurazione digitale, si è predisposti ad accettare errori dimensionali fino all'ordine del centimetro, nell'ambito della documentazione strutturale tale sensibilità è incrementata di almeno un ordine di grandezza, in accordo con le verifiche disposte dalle normative per valori soglia per la sicurezza a partire dai 5 millimetri di deformazione dei componenti.

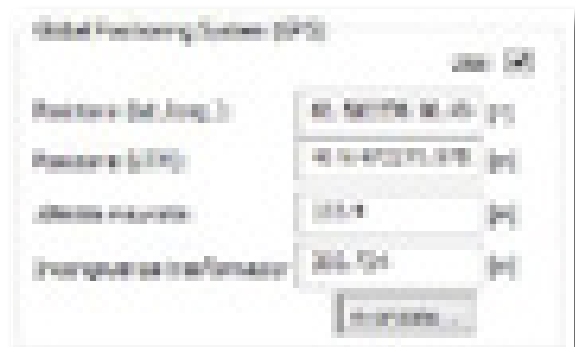
L'attenzione verso l'errore di disallineamento dei *dataset* spaziali si riflette così sulle modalità di controllo operabili sia sul campo che in post-produzione per favorire gli algoritmi di allineamento applicati dai *software* di registrazione⁴⁰, direttamente legati al tipo di dato da elaborare che alla sua scala di estensione sia dall'unità scatolare di struttura edilizia al comparto di aggregato urbano. La conduzione di una campagna di misurazione topografica per il consolidamento di una rete discreta di capisaldi, per quanto rappresentante una soluzione di eccellenza in relazione alla potenzialità di precisione dello strumento, inizia oggi ad essere di sempre più difficile applicazione. Tale azione costituisce di fatto un'applicazione strumentale parallela ma non coincidente con quella condotta tramite laser scanner, in termini sia di operatore che di tempistiche, con tempi di misurazione più estesi ed un incremento operativo sul campo, fattore particolarmente incidente soprattutto in contesti di *fast-survey* per necessità di emergenza e precarietà di siti in rovina o post-sisma.

Contemporaneamente, gli strumenti laser scanner hanno visto uno sviluppo sempre più sofisticato per la caratterizzazione dei *dataset* acquisiti. È oggi comune per uno strumento scanner non solo prevedere un pre-orientamento dei dati di scansione attraverso GPS e coordinate UTM, ma la dotazione di inclinometri abbinati al sensore sta rendendo sempre più superflua la messa in bolla ed il settaggio del riferimento principale orizzontale, riconosciuto automaticamente dalla livella dello strumento. Considerando quindi come le azioni di rilevamento in sito si stiano sempre più concentrando

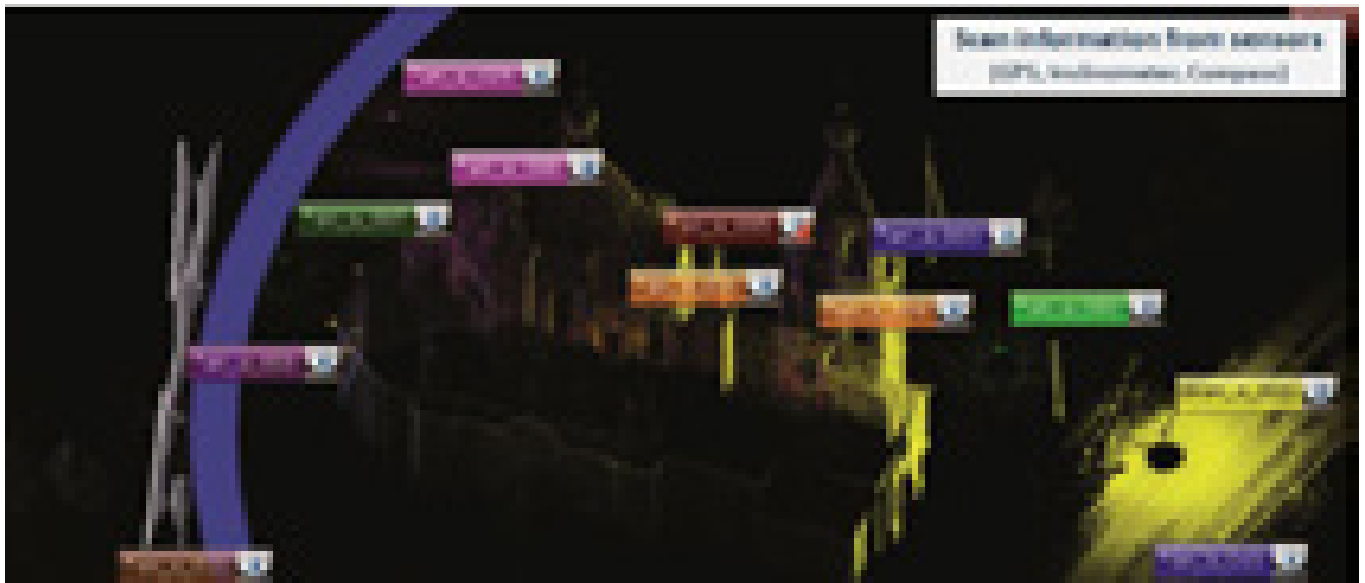
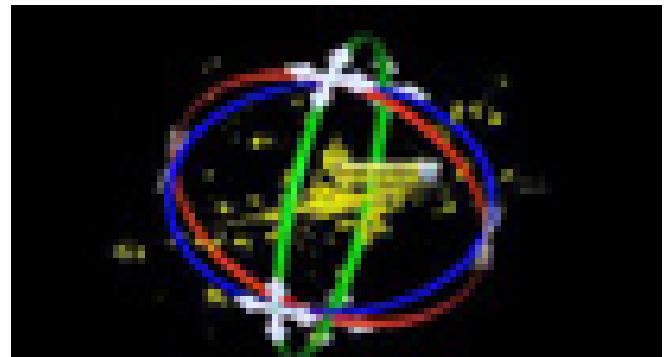
sulla pianificazione delle posizioni di tracciato di ripresa e sulla loro distanza interposta, oltre al settaggio di qualità della densità di misurazione discreta, è proprio su tali caratteristiche che si viene a concentrare l'ottimizzazione strategica del dato per la registrazione.

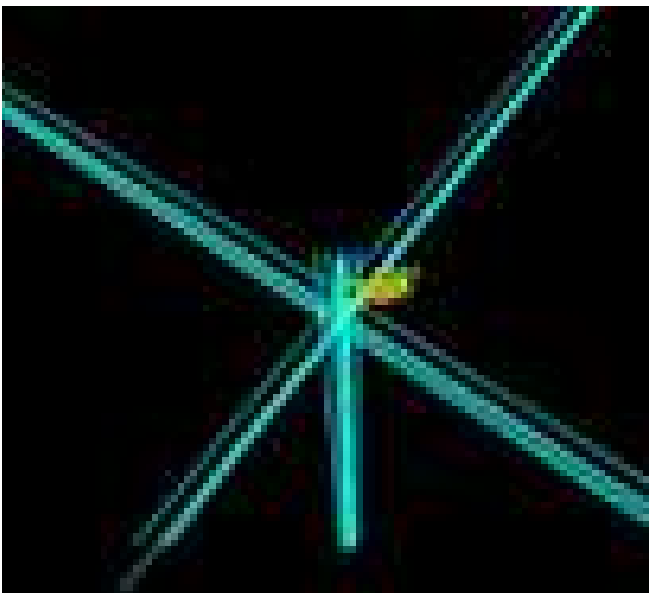
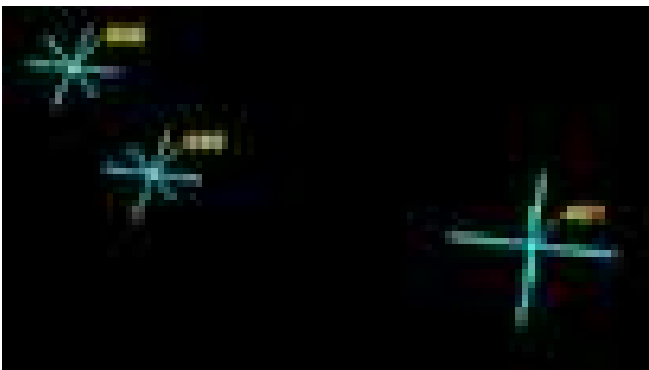
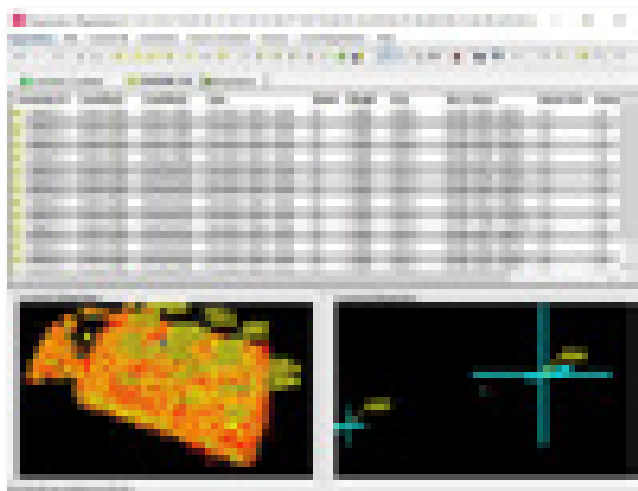
La definizione di poligoni chiuse di congiunzione tra i *dataset* acquisiti è considerata quale primario processo di compensazione dell'errore di allineamento. Tale specifica riesce ad essere eseguita con facilità nella maggior parte dei casi, dove siano consentiti percorsi di circuitazione per la pianificazione dell'acquisizione, dei quali il principale condotto sull'involuppo esterno ed i secondari variabilmente pianificati secondo percorsi interni della planimetria architettonica.

Una maggiore variabilità è invece applicata in riferimento al passo delle postazioni di acquisizione lungo tali poligoni ed alla loro distanza, funzionalmente legata alla precisione di calcolo degli algoritmi di allineamento. Le operazioni di registrazione dei *dataset* sono passate da un controllo operato attraverso punti nominali, target selezionati più o meno automaticamente come punti di controllo, ad un controllo su 'superfici interpolate', mediando maglie di congiunzione tra i punti sparsi per favorirne una corrispondenza di deviazione superficiale tra *dataset*. Tali algoritmi di allineamento, definiti su iterazioni ICP per la modalità *cloud-to-cloud*⁴¹, risultano così strettamente dipendenti dalla densità di valori dei *dataset* sottoposti al processo di allineamento. Da un lato il processo si è fortemente relazionato alla densità del



(5.35) Sensori GPS ed altimetrici integrati agli ultimi modelli di strumenti laser scanner e di acquisizione metrica, per il supporto nei processi di referenziazione e registrazione delle scansioni. (5.x-5.x) I dati vengono automaticamente pre-orientati sulla base delle coordinate di localizzazione, rendendo più speditivi i processi di allineamento cloud-to-cloud.





database, vincolandone i parametri di quantità oltre che di qualità, e regolamentando in modo più stretto la campagna di rilievo sulle specifiche del sensore. Parallelamente tale affinamento si è mosso in una direzione solidale con gli obiettivi della documentazione strutturale, garantendo una corrispondenza di dati non limitata ad una rete di controllo parziale ma estendendo la qualità di *matching* all'intera estensione del dato discreto acquisito, includendo nella registrazione stessa parte della certificazione del dato finale. I parametri di report standard dell' algoritmo di allineamento *cloud-to-cloud* sono così disposti in 'errore punto medio', 'errore punto massimo' e 'sovrapposizione minima', e calibrati congiuntamente con i valori di sottocampionamento (nella scala di *spot spacing*), affidabilità (scala parametrica), distanza di ricerca (fino alla soglia strumentale) e numero di iterazioni mediate. In tali termini, si verificano delle soglie tra i 3-5 mm di deviazione ottimali per l'allineamento tra *dataset* con finalità strutturali, in corrispondenza di scansioni con grado di sovrapposizione minima del 30% e densità di dato mantenuta ad almeno 5mm di *spot spacing*, corrispondenti a distanze medie tra scansioni contenute tra i 4-7 metri secondo la risoluzione impostata.

Tali considerazioni non sono applicabili nel caso di referenziazione di dati temporalmente distanti, operati tra fasi statiche differenti della fabbrica documentata, dove la possibilità di deformazioni occorse nell'intervallo tra le campagne di acquisizione può compromettere la qualità dell'allineamento corrispondentemente agli algoritmi di calcolo *cloud-to-cloud*. In tal caso l'esigenza è di provvedere con l'identificazione di *target* di controllo per l'allineamento, affinandone la disposizione in corrispondenza di capisaldi non interessati dal fenomeno cinematico, singolarmente valutabili nello specifico caso studio.

Dalla mediazione dei processi cloud-to-cloud, risulta comunque necessario approfondire un controllo per punti definiti, con target. Al contrario del calcolo mediato sulle intere superfici discrete (il quale tiene conto anche di fattori di disturbo, disperdenti la deviazione di allineamento), la registrazione su target impone vincoli sull'apparato morfologico strutturale (criticamente posti dall'operatore) che bilanciano il peso dell'allineamento sullo schema spaziale proprio dello scheletro strutturale.

(5.36-5.38) Target di allineamento per il rilievo laser scanner dell'estradosso dello Scalone Lorenese, presso gli Uffizi (2019).

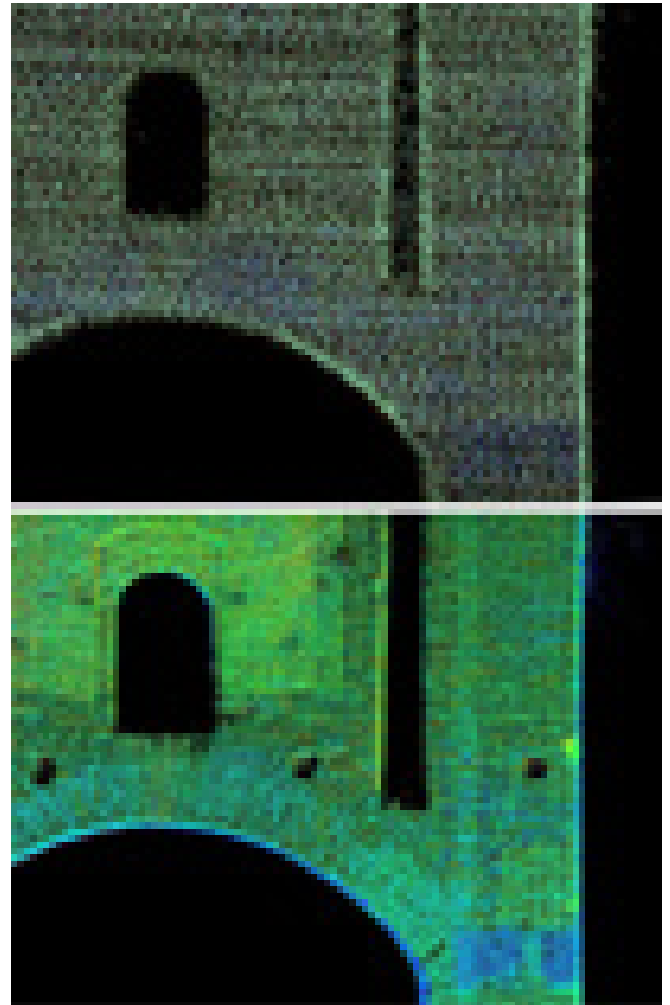
5.3.4. Filtraggio e controllo dei dati spaziali

L'affinamento della sensibilità di misurazione e trasposizione digitale del dato spaziale ha comportato assieme all'incremento del dettaglio morfologico un conseguente aumento del disturbo di dispersione del dato acquisito. Questo fenomeno è maggiormente influenzato da parametri ottici e di riflessione tra sensore e superficie, tali da alterare la nitidezza morfologica a causa di anomalie di dispersione dei punti misurati. A tale fattore si somma inoltre la difficile applicabilità di una segmentazione automatica delle nuvole di punti prodotte, per la distinzione tra componenti strutturali e non strutturali (finiture e *layer* architettonici supplementari).

Si pone così centrale la necessità di adeguati processi di filtraggio dei dati acquisiti per conseguire una specifica identificazione della forma strutturale, auspicabili a valutare la superficie di involuppo per distinguere tra deformazione statica ed il contributo formale di *layer* non strutturali. In tali termini, l'analisi dei dati morfo-metrici discreti è condotta sul parametro di dispersione caratterizzante la disposizione spaziale dei punti, acriticamente affrontato nell'interpretazione della fabbrica strutturale riconoscendo una differenza specifica di dato solo in termini materici, relazionati alla riflettività della specifica superficie di incidenza, e non secondo una classificazione formale.

Di conseguenza, durante la fase di verifica dei dati allineati, la previsione di un filtraggio del *database* morfometrico discontinuo richiede un'adeguata calibrazione, allo scopo di conseguire l'involuppo strutturale depurato del rumore ambientale e dei componenti non resistenti, altrimenti classificabili in modo erroneo con alterazioni di forma⁴². Teoricamente tale azione è favorita dagli specifici *tools* disponibili nei *software* di elaborazione dati (automatizzati per il filtro di dati *noise* sparsi, come pulviscolo o riflessioni anomale, manuali per la rimozione critica di gruppi di punti identificabili come *cluster* non strutturali, quali arredi, finiture ed elementi di disturbo), ma in realtà essa coinvolge fattori sensibili di discretizzazione della forma metrica, legati alla densità di micro-morfologia della tessitura superficiale. Se valori limitati di settaggio per l'identificazione di *vertex cluster* di rumore (ordine 100) possono impercettibilmente alterare la nube spaziale, l'aumento di tali valori soglia (ordine 1000) rischia invece di comportare

un'erronea classificazione algoritmica dei dati come *noise*, compromettendo la qualità della forma discreta in corrispondenza di porzioni più rarefatte ma necessarie di punti, come aree di singola copertura del *dataset*⁴³, o con una concentrata di densità del dato, nel caso di elementi di carpenteria o innesti materici.



(5.39) Confronto tra point cloud acquisita con laser scanner terrestre (sotto) e mobile (sopra) di Porta Calcinara, presso le mura medievali della città di Pavia (2019). La sperimentazione di tecniche mobile, per quando di utile supporto al reperimento di dati spaziali alla scala territoriale in tempi vantaggiosi, ancora non raggiunge qualità di dato ed accuratezza formale tali da apportare un'innovazione nel campo del rilievo strutturale, con una risoluzione di costruzione morfologica paragonabile a quella di estrusione geometrica di base.

5.3.5. Verso il 'fast survey'

A scapito della molteplicità e complessità di considerazioni sull'acquisizione e gestione di dati morfometrici ottimizzati per la documentazione strutturale, le pratiche di rilevamento digitale si trovano negli ultimi anni ad affrontare un'emergente richiesta di speditività metodologica e di prodotti.

Tale approccio influenza in particolare la misurazione diretta in contesti di emergenza quali quelli post-sismici, dove l'urgenza di intervento su fabbricati in dissesto è mitigata dalla precarietà di accesso alle strutture danneggiate da parte di operatore e strumento, eventualmente impedita o più frequentemente limitata a sopralluoghi in sito di *slot* non superiori ai 30°. Parallelamente, anche l'aspetto di finalizzazione e derivazione dei dati raccolti in prodotti applicativi, sia 2D che di interazione tridimensionale, affronta un'impellente richiesta di snellimento e rapidità delle procedure di computazione e modellazione. Squadre operative, come Protezione Civile e team di intervento su contesti strutturali instabili, indirizzano i protocolli di rilevamento e post-produzione in emergenza sulla speditività di lettura morfo-metrica dell'edificio, concentrandola sia alla doppia scala architettonica-urbana dei tessuti storici che alla quantificazione superficiale-volumetrica di apparati conservati e macerie di collasso.

Se gli strumenti *Image-based* a ricostruzione fotogrammetrica, terrestre e aerea, si sono affermati con successo come sistemi metodologici di *fast survey* per eccellenza, in funzione della loro economicità, disponibilità e velocità di acquisizione, la necessità di referenziazione ad alti livelli di affidabilità metrica rimane ancora associata all'integrazione con strumentazione *Range-based* quale riferimento di banca dati tecnica certificata e ad alto dettaglio⁴⁴. All'affidabilità misurativa del rilievo laser, però, è opportuno considerare anche la difficile gestione di nuvole di punti complesse, non solo in termini di estensione spaziale ma più propriamente di intensificazione del dato locale: al contrario, i prodotti tridimensionali *Structure from Motion* risultano essere spesso più versatili e compatibili nella gestione e consultazione di dati formali sulle strutture, estendibili ad una copertura globale nella scala del tessuto storico ma anche localmente incrementabili fino al dettaglio millimetrico di morfologia superficiale e danno fessurativo.

Resta irrisolta la mancata autosufficienza del metodo fotogrammetrico a garantire la contestualizzazione dimensionale dell'oggetto digitalizzato, solo in parte compensata dal riferimento dell'informazione GPS nel caso di fotogrammetria aerea da UAV ma con un grado di corrispondenza della forma misurata (sperimentalmente orientato sulla scala di approssimazione dei 10 cm) ampiamente eccedente le soglie di tolleranza strutturale. La metodologia di rilevamento *Image-based* rimane comunque un'importate fase di complementarietà e comparazione delle procedure LiDAR applicate nel campo dell'indagine strutturale, ed indirizza percorsi di integrazione del dato morfo-metrico *Range-based* concentrati sulla garanzia della copertura di dato al contorno, con il conseguimento di *database* multi-strumentali di mappatura totale dell'involucro strutturale.



(5.40) Confronto tra copertura di acquisizione fotografica da terra (sopra) e aerea (sotto) per il complesso della chiesa invernale di Cherdyn. Le metodologie di ripresa mobile e aerea, ad esempio tramite droni leggeri, si stanno sempre più diffondendo e, su molti aspetti, riescono ad equivalersi in qualità di dato, con tempi notevolmente più ridotti nel caso di *database SfM* da drone. Per quanto riguardata l'accuratezza formale e l'affidabilità metrica del dato, le comparazioni con i prodotti morfo-metrici certificati sono in corso, ma migliorano continuamente grazie alle potenziate prestazioni degli strumenti camera.

5.4. PROCEDURE PREGRESSE DI LETTURA REFERENZIATA APPLICATE AL DATO SPAZIALE

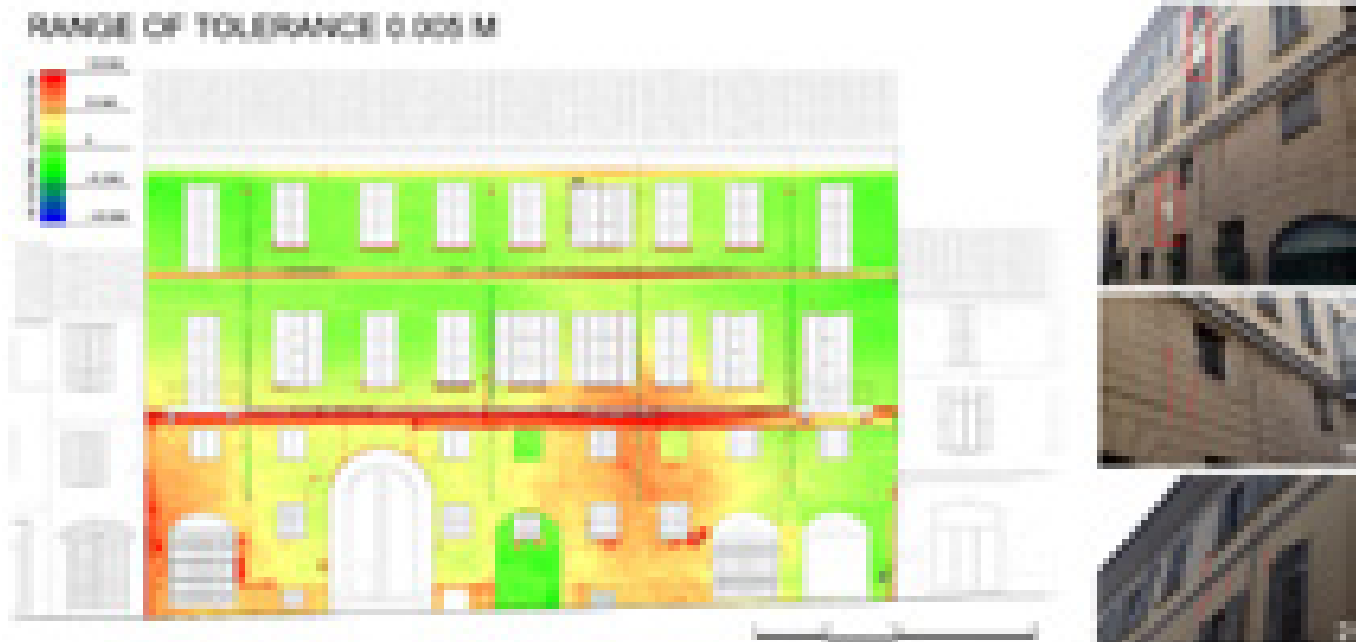
Le ricerche sul tema della documentazione morfometrica attraverso rilevamento LiDAR e campagne SfM, sperimentate su un vasto panorama di complessi e siti storici, hanno permesso di valutare l'applicabilità dello stato dell'arte di tali protocolli metodologici, ciascuno finalizzato a risultati, e di conseguenza elaborati, profondamente diversi tra loro ma sviluppati con linguaggi e sistemi complementari ed integrabili nella lettura dei disegni.

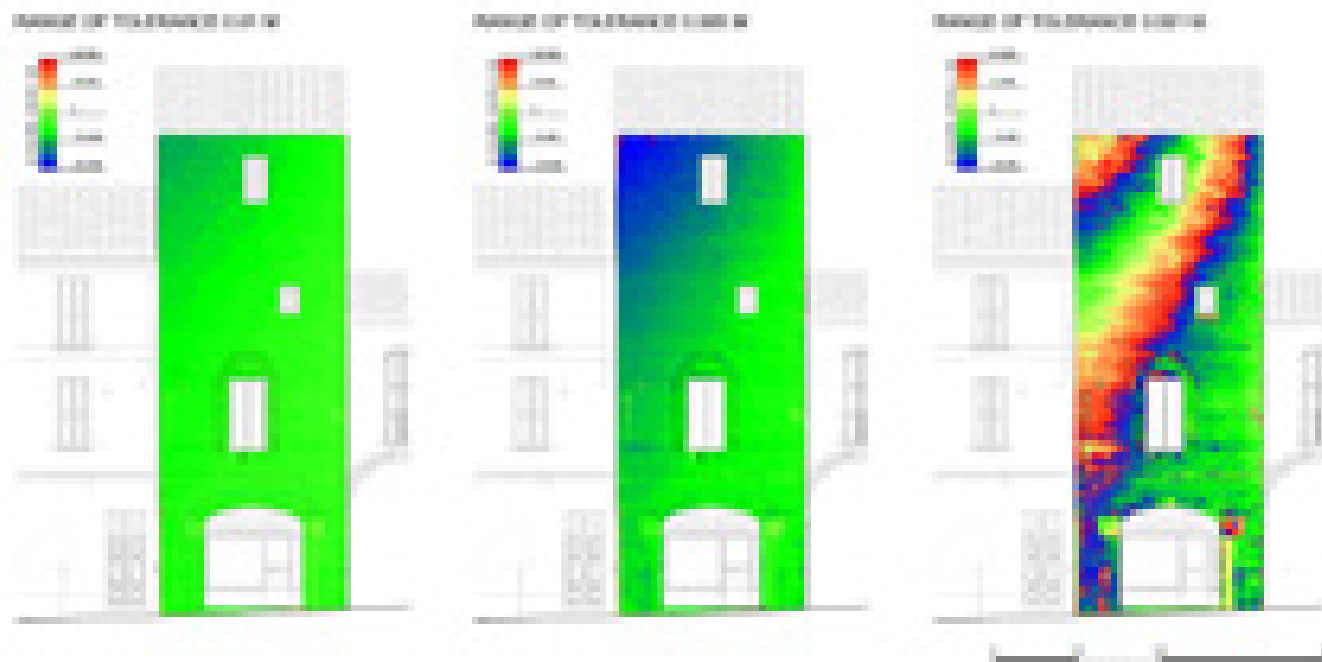
Il disegno digitale dei sistemi strutturali storici è così risultato efficace sia per comunicare un'elevata diversità di contenuti in database 3D unificati, sia per esprimere in modi più tecnici convenzioni grafiche, caratteristiche geometriche e proporzionali e particolarità costruttive proprie di ogni contesto edilizio. Ciascuna scala meccanica interessata, dal modulo architettonico all'unità urbana, ha elaborato un diverso sistema di strutturazione dei dati e di gestione non solamente dell'immagine risultate,

ma delle diverse componenti nelle quali il contenuto informativo strutturale è stato destrutturato e riorganizzato per comporre elementi descrittivi. Così facendo, ogni database conseguito ha generato una propria risposta alle applicazioni digitali e ha sviluppato metodologie di analisi fondate su specifici ma differenti modelli teorici, evidenziando al contempo potenzialità e labilità di gestione del dato in relazione alla sua specifica natura discontinua.

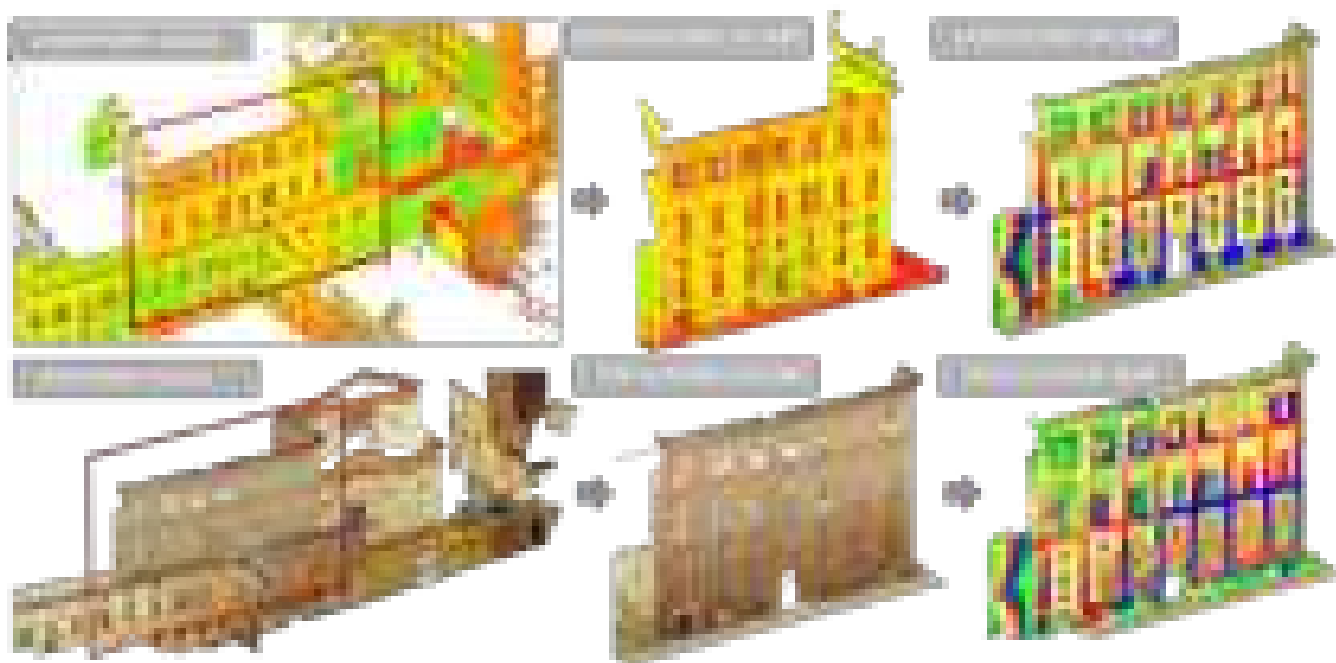
5.4.1. Localizzazione delle tolleranze deformative

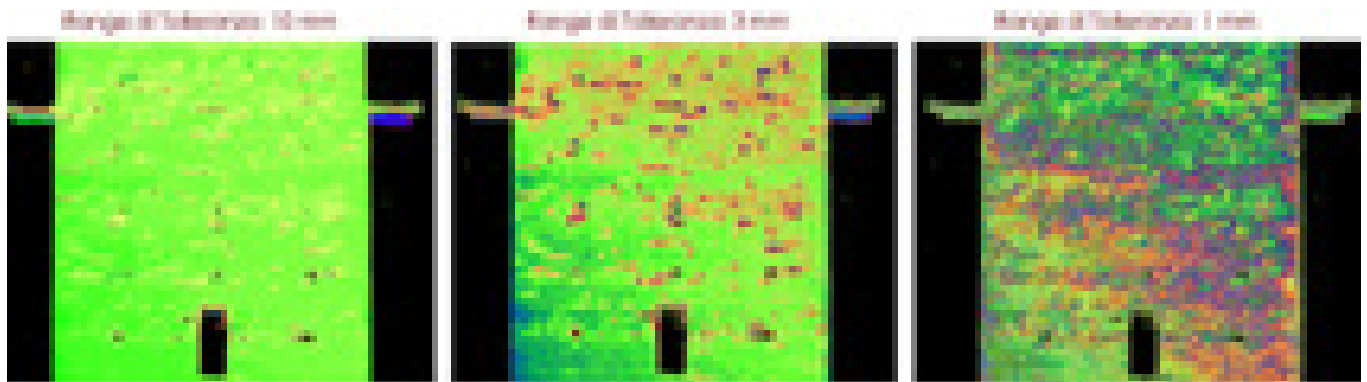
In riferimento agli obiettivi di rappresentazione della forma strutturale e alla loro estrema variabilità per scala e tipologia modulare dei sistemi costruttivi, in particolare in un contesto stratificato come quello dei centri storici urbani, la scelta del conseguimento di un database integrato è affinata sulla specifica proprietà di referenziazione





Nella pagina precedente (5.41) Elevation map di un fronte urbano nel centro storico di Pavia, confrontato con quadro di lesione fotografico. In questa pagina, sopra (5.42) applicazione di differenti intensità di tolleranza range per la rivelazione delle deformazioni plastiche presenti sulle murature storiche di una torre medievale rifunzionalizzata; sotto (5.43) confronto tra database range-based e image-based applicato su un fronte del centro storico di Pavia: i dati di lettura delle mappe risultano coerenti tra loro nel quantificare il danno, ma con affidabilità dimensionale





ed affidabilità millimetrica, stabilita nella posizione di ciascun punto nello spazio in un formato di informazione espresso da coordinate x, y, z .

Una delle applicazioni offerte dalla nuvola di punti è la possibilità di interrogarla per analizzare gli scostamenti fuori piano presenti sulle superfici dei fronti urbani. Impostando le coordinate di un piano di riferimento, parallelo al fronte, e un *range* di tolleranza, è possibile assegnare una *color map* di scala cromatica (dal rosso al blu) dove ad ogni colore viene associato un intervallo di spostamento fuori piano. In questo modo, ogni quadro deformativo può essere individuato, mappato e collegato ai fenomeni cinematici corrispondenti, calibrandolo nella sensibilità dell'intervallo di tolleranza cromatica e nel posizionamento del *Reference plane* di allineamento, per giungere attraverso un'analisi multi-valore della sua immagine statica alla ricostruzione di possibili cause di genesi dell'instabilità.

Il *database* sviluppato fornisce un sistema di informazioni già precostituito dove l'interrogazione per set di valori di ricerca permette di interfacciarsi direttamente con i dati morfo-metrici dell'involuppo strutturale, valutando le scale di valore e le sensibilità di deformazione in ogni particolare contesto per indagini mirate secondo i *range* di tolleranza impostati (soglia minima 1 mm) e di le deviazioni di spostamento rilevate.

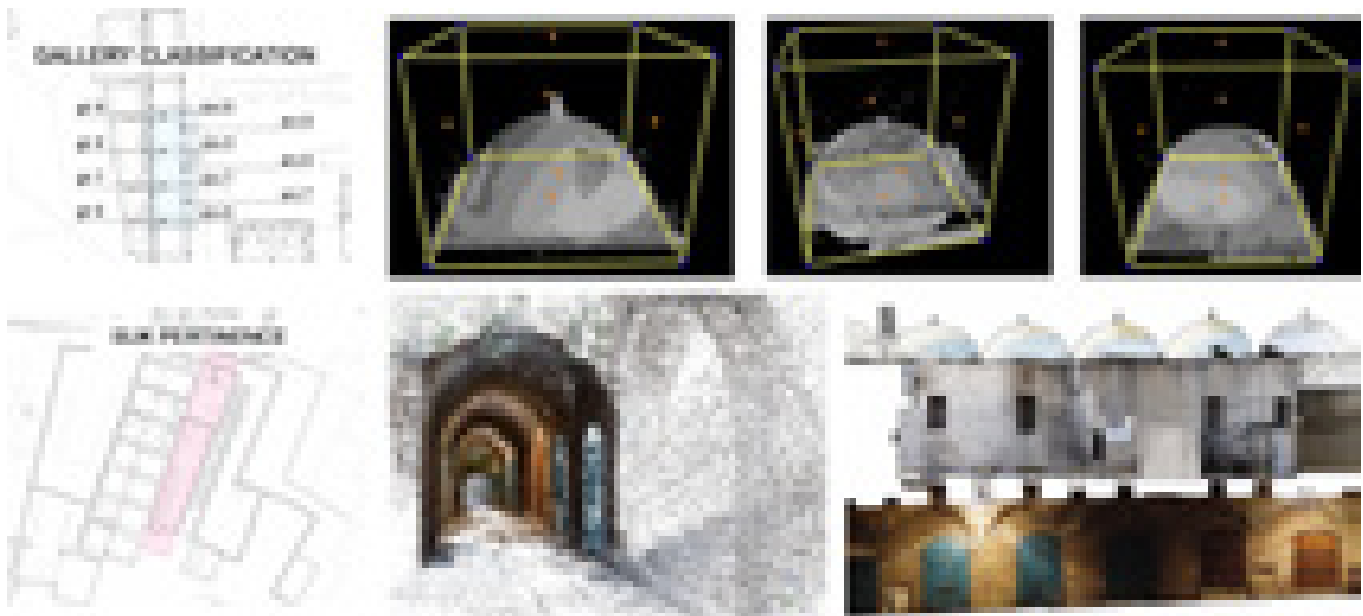
A fronte di tali letture del dato strumentale, il rilevamento digitale *Range-based* emerge come privilegiata metodologia per l'acquisizione e gestione delle criticità formali, e quale riferimento di protocollo certificato per l'analisi delle deformazioni agenti sui paramenti strutturali. La capacità di mantenere il dettaglio di controllo sulla forma strutturale, dalla scala dell'unità edilizia

(5.44) *Calibrazione del range di tolleranza per l'elevation map in presenza di superfici ad elevato deterioramento formale, nel caso studio della Torre medievale dell'Orologio di Pavia.*

Le superfici dei fronti, particolarmente rimaneggiate durante gli interventi edilizi degli ultimi secoli ed esposte a fattori di erosione, alterano la lettura 'pulita' dei blocchi di deformazione quando la soglia della scala colori è portata a valori molto bassi di mappatura (< di 3mm).

all'estensione urbana, avvia un confronto di affidabilità con nuovi protocolli documentativi da elaborazione fotografica, quali i processi SfM *Structure from Motion* di modellazione fotogrammetrica degli ambienti costruiti.

Al *database* digitale conseguito tramite LiDAR è possibile affiancare, in modalità referenziata con punti di controllo per la triangolazione spaziale, database parziali SfM nei quali ciascuna complessità distributiva dell'intero sistema è controllata. La suddivisione di *chunk* fotografici, con derivanti nuvole di punti colorimetriche solitamente più decimate e meno regolarizzate nei profili rispetto ai *dataset* LiDAR, rende l'informazione più gestibile ed interrogabile per la dimensione ed il processamento del dato. Caratteri di complessità dell'impianto architettonico, a scala unitaria ed urbana, definiscono altrettanti fattori di alterazione formale del rilievo SfM in corrispondenza di specifici elementi orizzontali e verticali, come balconi e cornicioni aggettanti rispetto al piano medio delle superfici di involucro edilizio, causando ampie porzioni di occlusione o anomalie morfologiche nella referenziazione interna dei dati RGB raccolti. Al tempo stesso, l'articolazione volumetrica e spaziale degli elementi architettonici conservata nel rilievo fotogrammetrico consente una maggiore facilità nell'individuazione di punti omologhi tra le varie sequenze fotografiche, triangolando



(5.45) Scomposizione ed analisi referenziata delle unità strutturali corrispondenti alle coperture ottomane della Moschea di Al Jazzar e del suk di San Giovanni d'Acri. L'isolamento delle singole unità, valutate sugli schemi di resistenza individuali, ha permesso di coordinare sia l'azione di documentazione che la gestione delle singole porzioni, poi referenziate all'intero schema strutturale.

spazialmente il loro allineamento senza contenerlo al solo piano principale della struttura. In tal modo, il *database* fotogrammetrico ottenuto da rilevamento SfM risulta è confrontabile con quello ottenuto dalla strumentazione laser scanner, finalizzandone una valutazione qualitativa circa il livello di affidabilità metrica (nell'ordine del centimetro) che ne conferma le potenzialità speditive di valutazione sulla stabilità strutturale.

5.4.2. Calibrazione ed orientamento geometrico di unità costruttive morfologiche

La generazione di un *database* digitale di carattere integrato sulla forma di complessi architettonici stratificati rappresenta un'opportunità di congiunzione ed interazione di dati di documentazione altrimenti dispersi, a seguito dei differenti sistemi di acquisizione digitale adottati per il rilievo metrico e fotografico. Le caratteristiche architettoniche degli apparati strutturali interessati da trasformazioni architettoniche e vicende costruttive determinano una singolarità di conformazione statica inscindibile dalla specifica fabbrica di appartenenza.

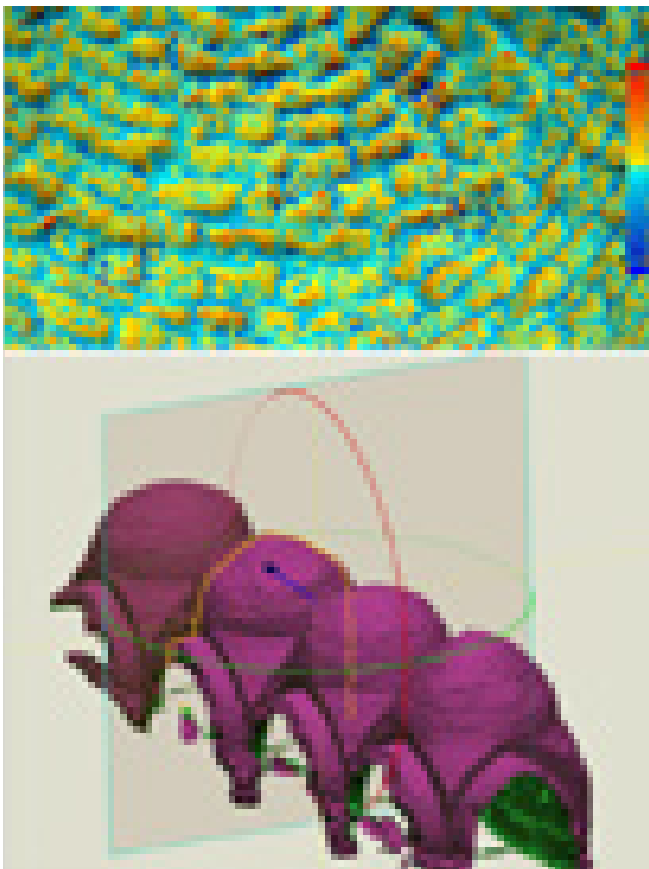
La complessità meccanica dell'apparato strutturale è così evidenziata dalla conformazione degli ambienti e delle soluzioni costruttive adottate nella sua evoluzione storica, con moduli tecnologici dalle interagenti relazioni tensionali volte a garantire la staticità delle componenti spaziali. Tale coesistenza multipla di unità strutturali conduce alla categorizzazione di metodologie applicate e dati raccolti verso sovra-strutture rappresentative d'insieme, individuando nel rilievo geometrico digitale un sistema di comparazione ed indagine critica del dato architettonico valido sia dalla scala di insieme che nella proporzione locale.

La documentazione morfologica dalle superfici strutturali sviluppa processi di post-produzione del dato virtuale finalizzati alla localizzazione e quantificazione di fenomeni comportamentali e criticità statiche insiti nell'apparato resistente. Nella comprensione delle meccaniche murarie di paramenti, sistemi voltati e cupole, la regola formale rappresenta un'invariante chiave mantenuta inalterata nella trasposizione dal reale al *database* virtuale, strutturando l'interazione tra architettura e operatore sia nella scomposizione logica dei moduli strutturali costitutivi che nella fedeltà formale all'imperfezione muraria. L'affidabilità

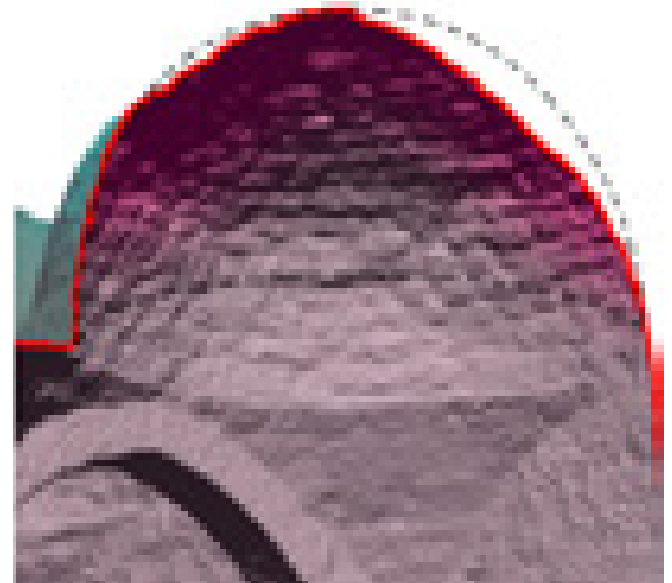
morfo-metrica consentita dai sistemi di acquisizione Range-based è in tal modo adottata come strumento di controllo e gestione di un esteso catalogo di più speditive Unità strutturali SfM, permettendo l'istituzione di un sistema di riferimento metrico unificato UCS per l'integrazione referenziata dei dati fotogrammetrici.

Il rilievo estensivo di una fabbrica strutturale è così conseguibile per porzioni del sistema meccanico mirate su Unità Statiche strutturali, in particolare scatole murarie, coperture voltate e telai delimitati, raggiungendo un grado di dettaglio documentativo localizzato ed intensificato su singole Istanze e referenziato al complessivo database metrico. La ricostruzione fotogrammetrica, allineando *tie points* riconosciuti in modalità RGB ed intensificando le derivate nuvole dense di punti, permette di trasporre i dati discreti conservando il dettaglio di tessitura, ed analizzando le proprietà geometriche delle conformazioni strutturali dalla macro-scala delle istanze costruttive

alla dimensione lapidea. La gerarchizzazione dei valori di curvatura delle superfici discontinue, assegnabili ad una scala colori graduata, è in grado di evidenziare aree omogenee interessate da cedimenti diffusi e fenomeni di espulsione dei blocchi lapidei per le eccentricità presenti nella disposizione dei corsi murari. Tali caratteristiche sono confermate anche attraverso l'elaborazione di primitive geometriche di riferimento, sezionando le Unità strutturali in funzione della specifica matrice e proporzione costruttiva e valutando le deformazioni presenti rispetto alla configurazione geometrica ideale. La ricerca di lesioni e dissesti, entrambi classificati come variazioni formali del dato superficiale acquisito, conduce all'individuazione di corrispondenze biunivoche tra stato deformativo e vulnerabilità conservativa, a sua volta criticamente interpretata nella specificità di modalità costruttive e come componente indotta da trasformazioni di indebolimento e frammentazione della continuità strutturale.



Dalla conservazione del dettaglio morfologico reale 'imperfetto', è possibile instaurare ambienti di comparazione con la forma geometrica ideale legata alla tipologia costruttiva, ed individuare le varianti del quadro formale allo schema di distribuzione uniforme dei carichi. (5.46-5.48) Analisi morfologica delle superfici voltate nel complesso di Al-Jazzare ad Acri, confronto tra il database morfo-metrico acquisito e lo schema geometrico ideale dell'unità.



5.4.3. Problematiche ed esigenze per il conseguimento della forma discreta

La finalizzazione di una forma strutturale certificata, considerata anche un'integrazione multi-strumentale delle operazioni di rilevamento, evidenzia la necessità di esplicitare la gestione delle componenti del sistema strutturale in ambiente digitale, per facilitare le operazioni di processamento dei dati acquisiti secondo criteri di comportamento meccanico.

Il metodo di scomposizione e segmentazione manuale del complessivo *database* sparso è in tal modo suggerito per garantire all'interno dell'uniformità della nube di punti spaziali il controllo logico di riconosciuti volumi murari, sostegni puntuali, soluzioni voltate o composte come moduli dell'involuppo strutturale. Tale scomposizione, semanticamente logica per l'analisi statica, deve inevitabilmente confrontarsi con una parzializzazione del dato strumentale incidente sulle logiche computazionali, anche congiuntamente relazionata ai diversi valori sorgente che sono spazialmente gestiti in modo indistinto dalle piattaforme di *processing*.

Questo scenario di digitalizzazione morfologica dell'apparato strutturale, mantenuto dalla scala architettonica a quella del tessuto costruito urbano, definisce così una dimensione in realtà 'informe' dell'involuppo resistente. Lo spazio virtuale nel quale la nuvola morfo-metrica discontinua si trova collocata permette a componenti statiche disallineate o dominanti

sulla conformazione generale del sistema strutturale di emergere solo di volta in volta come entità singolari e riconoscibili nella lettura del sistema spaziale, necessitando di processi mirati di parametrizzazione che guidino ripetutamente il sistema di fruizione nel quale sono inseriti a riconoscere dalla nube discontinua delle relazioni vettoriali tra i punti, e che conseguentemente portino l'operatore a condensare nell'immagine strutturale delle corrispondenti ipotesi deformative e fenomeniche.

Un altro aspetto è legato all'implementabilità del confronto tra *database* morfologici nel tempo, capaci di relazionarsi illimitatamente a contenere blocchi di informazioni da campagne successive, garantendo la possibilità di definire una mappa dei cinematismi in evoluzione. Il sistema acquista un'importanza rilevante se, a seguito di eventi sismici e rischi naturali, ne vengono comparati i rilievi e messe in relazione due differenti configurazioni morfo-metriche eseguite a distanza di tempo, capaci di definire spostamenti, anomalie e livelli di rischio di cedimento strutturale in funzione della loro evoluzione. Questa azione condotta su un archivio di documentazione tipologicamente discontinuo mette però in crisi gli algoritmi di confronto vettoriale tra coordinate puntuali, che nonostante le elevate densità di dato non riescono comunque a mappare un'esatta posizione coincidente tra punti generici del *database*, riconosciuti come entità singolari prive di alcuna relazione interna che non sia il comune sistema di orientamento.



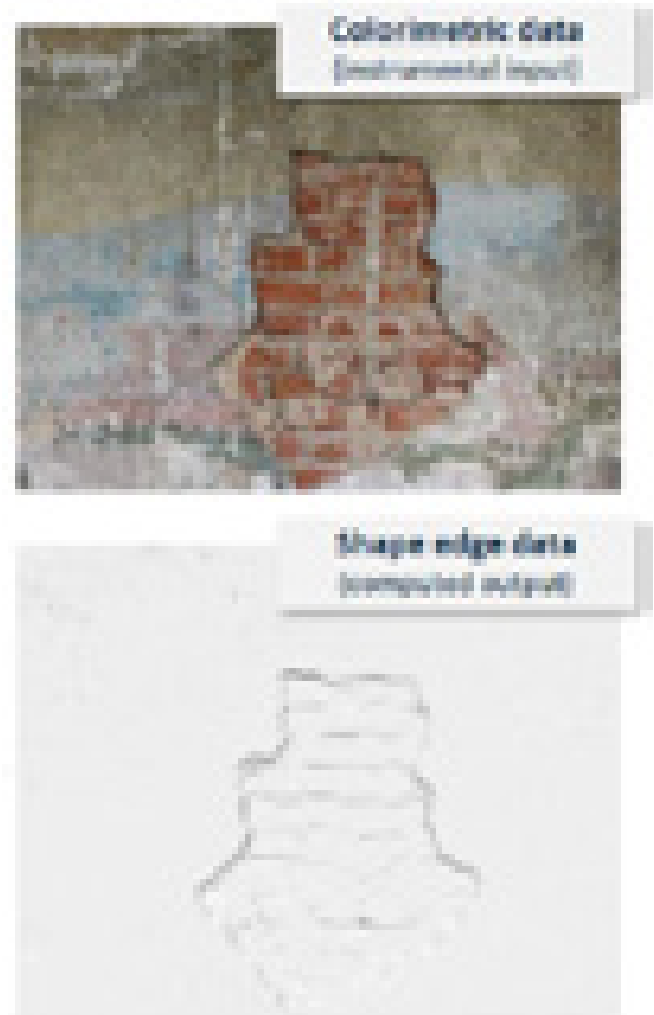
(5.49) Proporzioni di densificazione dell'informazione spaziale dalla misurazione discontinua alla triangolazione del modello continuo. In tale intervallo sono comprese tutte le procedure necessarie a garantire la correttezza metrica e la lettura qualitativa delle caratteristiche del dato interpolato.

5.5. LA RICERCA DI CONTINUITÀ GEOMETRICA ED IL PASSAGGIO AL MODELLO

Esperienze finalizzate alla qualificazione di quadri di danno per le strutture hanno confermato la potenzialità di analisi di dati ottenuti da sistemi di acquisizione morfometrici per derivare immagini di sintesi su dissesti ed instabilità leggibili nella fabbrica architettonica.

Lo sviluppo di banche dati 3D orienta la costruzione di disegni ed elaborati verso un progressivo carattere di vettorializzazione spaziale, tale da relazionare tra loro i dati discontinui per conseguire una caratteristica continuità della forma strutturale orientata alla sua definizione superficiale. Il dato spaziale, se orientato con un riferimento locale all'interno del *database* e posto in relazione semantica con gli altri dati, può acquisire e strutturare nel medesimo spazio virtuale una forma continua e limitata dell'involuppo strutturale con univoche 'proprietà superficiali' influenzate dal fenomeno meccanico. Così, può definire in modo non invasivo delle entità di 'modello' identificate come scenari permanenti di danno.

Ciascuna forma costruttiva o di degrado, lesione o deformazione, che viene evidenziata e geometrizzata nel modello richiede di essere indicizzata e classificata nel sistema, nella relatività dei collegamenti poligonali istituiti tra i punti dello spazio, per essere associata a dati qualitativi sia localmente che nella continuità del suo involucpo, poi comparati per monitorare i dissesti nel tempo⁴⁵. Modelli morfo-metrici continui della struttura, anche eventualmente semantizzati sulle classi costruttive degli apparati resistenti, possono concorrere attraverso la specificità delle *features* istituite a definire un corpo univoco, con informazioni superficiali interpolabili per volumetria nel caso di computazioni e simulazioni dei fenomeni sulla struttura. A tale proposito, all'acquisizione dati settorialmente implementabile nel funzionamento *hardware* degli strumenti impiegati, la ricerca sulla modellazione poligonale affianca in maniera emergente la componente metodologica *software*⁴⁶, tramite la quale confermare l'identità dell'involuppo superficiale e il suo fine interpretativo⁴⁷.



(5.50) Più il dato acquisto presenta caratteristiche di densità, risoluzione, affidabilità e nitidezza vicine all'entità continua, più il passaggio da database a modello risulterà coerente, speditivo e corrispondente alla realtà documentata. Se tali valori risultato inferiori, il processo di modellazione è chiamato a specializzarsi, affiancando e coordinando l'azione computativa degli algoritmi per garantire un controllo dei gradi di manipolazione agenti sulla forma strutturale.

L'impronta fisica di eventi cinematici sull'architettura permette di riscontrare come l'analisi del sistema strutturale si basi su aspetti statici e fenomeni meccanici riconducibili a necessari parametri di continuità della sua morfologia. Si concretizza così l'elaborazione di modelli virtuali a partire da corrispondenti sistemi fisici, sia di unità storiche realmente esistenti che di prototipi fisici progettati per replicare in maniera affidabile la risposta di stabilità di materiali e tecniche costruttive. Tali prototipi sono poi utilizzati per verificare il comportamento degli edifici con repliche telluriche, simulando in laboratorio fasi temporali. Fedeltà costruttiva e mimesi rappresentativa vengono in tal modo sperimentate per focalizzare l'indagine sulla capacità descrittiva della rapida evoluzione di risposte tensionali di apparati strutturali a sollecitazioni dinamiche ed interventi contenitivi. Del resto, le pratiche di rilevamento digitale hanno sviluppato una maturità tecnologica e metodologica in grado di produrre e certificare database

integrati sempre più affidabili⁴⁸. L'incremento di densità superficiale acquisita e certificata conduce all'adozione di informazioni mirate e sistemi di acquisizione dati rapidi e affidabili, permessi dall'elaborazione automatizzata di superfici *mesh* ad alta aderenza al sistema morfologico reale, da cui derivare valutazioni quantitative delle condizioni di danno⁴⁹. Dai dati del rilievo sono elaborati modelli 3D, integrati da letture critiche e sviluppati dalla porzione muraria al dettaglio fessurativo, le cui superfici numeriche, processate in *reverse modelling* per la gestione ed ottimizzazione poligonale, contengono formalmente codificata la propria storia strutturale.

*“L'elevatissimo grado di complessità delle reali conformazioni strutturali talora trova rappresentazione soddisfacente anche in modelli estremamente semplici, talaltra richiede modelli di complessità crescente, in grado di ampliare le possibili letture dei fenomeni, e avvicinare quindi l'osservatore alla realtà.”*⁵⁰



(5.51) Involucro interno dell'apparato strutturale del complesso di Taman, in Upper Kama (Russia). La calibrazione di adeguate mappe colore può essere variata anche nella sola visualizzazione della nuvola di punti per evidenziare, attraverso riflettanza e grado di incidenza, le principali variazioni formali diffuse.

NOTE

1 La definizione del concetto di 'Rischio' porta ad includere diversi aspetti di interazione tra uomo, paesaggio ed architettura, dalle conseguenze e perdite prevedibili risultanti dalla loro interazione a condizioni più o meno vulnerabili di costituzione identitaria per determinate configurazioni del costruito, fino a minacce incombenti e catastrofi limitabili negli effetti ma non prevenibili. In ogni caso, "la carenza di piena certezza scientifica non deve essere usata a pretesto per rinviare, in funzione del rapporto costi-efficacia, le misure per prevenire il degrado ambientale". (UNCED, 1992). Per approfondimenti, cfr. Di Lodovico L., Iagnemma L. (2012) "Rischio e Pianificazione. Tutela, prevenzione e sicurezza nella programmazione urbanistica." *Planum. The Journal of Urbanism*, 25, 2/2012, pp. 1-6; Ceretto Catigliano S.C., Ciaffi D., Peano A., Spaziante A., Starrico L. (2002), "Interazioni tra pianificazione operativa, strutturale e strategica", FrancoAngeli – Milano.

2 Si intende qui entropia come "misura del livello di disordine dei segni, pensati come concordemente orientati per la comunicazione determinata del messaggio". Cfr. De Rubertis (1994), *op. cit.*, p. 33

3 Ivi, p. 12.

4 Sulla stratificazione ed articolazione evolutiva stratificata di complessi storici, cfr. Bandinelli A., Bevilacqua M. G., Karwacka E. (2016) "Il disegno di rilievo come strumento di indagine. Il caso della Certosa monumentale di Calci". In Bertocci S., Bini M. (a cura di) (2016). *Le ragioni del disegno. Pensiero, Forma e Modello nella Gestione della Complessità*. Roma: Gangemi Editore, pp. 63-68; Caprili S., Mangini F., Paci S., Salvatore W., Bevilacqua M. G., Karwacka E., Squeglia N., Barsotti R., Bennati S., Scarpelli G., Iannelli P. (2017) "A knowledge-based approach for the structural assessment of cultural heritage, a case study: La Sapienza Palace in Pisa". *Bulletin of Earthquake Engineering* 2017, 15/11, pp. 4851-4886

5 Relativamente all'ibridazione informatica delle pratiche di modellazione strutturale per il calcolo, il metodo agli elementi finiti FEM (Finite Element Method) è una tecnica numerica che traduce forme strutturali complesse in domini sintetici descrivibili come equazioni differenziali alle derivate parziali, ovvero equazioni algebriche. La forma complessiva è sintetizzata in moduli cubici o tetraedrici (di densità relativa alle dimensioni del soggetto ed alle necessità di calcolo) controllati attraverso le variabili di vincolo/libertà al contorno.

6 L'archiviazione di informazioni legate ad uno stesso contesto formale, interessato da più livelli di dati, richiama l'ambito dei sistemi informativi. Declinati alla scala strutturale, essi posso dare un notevole supporto alla comunicazione degli apparati permettendo una simultaneità di informazioni anche relazionabili tra campi. Cfr. Brusaporci S. (2010) "Sistemi informativi integrati per la tutela, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio architettonico e urbano". Roma: Gangemi.

7 Tra gli eventi sismici di maggiore impatto e distruzione

del patrimonio costruito europeo, si ricordano: Galles 1750 (Regno Unito), Lisbona 1755 (Spagna), Anavatos 1881 (Grecia), Diano Marina 1887 (Italia), Messina 1908 (Italia), Cefalonia 1953 (Grecia), Skopje 1963 (Balceni), Vrancea 1977 (Romania), Budva 1979 (Montenegro), Racha 1991 (Georgia), Roermond 1992 (Olanda), Izmit 1999 (Turchia), Van 2011 (Turchia). In Italia: Messina 1975, Torino 1980, Irpinia 1980, Gubbio 1984, San Donato Lazio 1984, Umbria 1997, Basilicata 1998, San Giuliano Molise 2002, L'Aquila 2009, Accumoli e Norcia (2016), Montereale (2017).

8 Nel 2002 il terremoto italiano di San Giuliano, oltre al disastro edilizio, causa una tragedia in termini di giovani vittime, e spinge verso l'istituzione di fondazioni e reti di laboratori applicati all'ingegneria sismica ed allo studio preventivo delle configurazioni di danno strutturale per la salvaguardia del patrimonio culturale ed umano. Con il nome di terremoto dell'Aquila del 2009 si intende una serie di eventi sismici, iniziati nel dicembre 2008 e terminati nel 2012, con epicentri nell'intera area della città, di cui la scossa principale verificatasi il 6 aprile 2009; a evento concluso, il bilancio definitivo è di 309 vittime, oltre 1.600 feriti e oltre 10 miliardi di euro di danni stimati. Gli eventi sismici del Centro Italia del 2016 e 2017 rappresentano la più grave sequenza di terremoti registrata in Italia nel XXI secolo, per durata, numero di vittime e di sfollati. La scossa che il 30 ottobre 2016 ha colpito i comuni della Valnerina (Norcia, Castelsantangelo sul Nera, Visso, Ussita e Preci) è stata la più forte della sequenza iniziata il 24 agosto precedente, e, per intensità, una delle maggiori in Italia registrata a partire dal 1980

9 Dal 1975 al 2005 i disastri di impatto strutturale sono aumentati del 400%, colpendo manufatti storici ed infrastrutture esistenti con ingenti danni di distruzione. I danni causati al patrimonio culturale sono tra i materialmente più ingenti, con collassi a diverse scale di interesse interessanti unità e sistemi strutturali di complessi storici. Per una revisione più ampia di tali quadri di interesse, cfr. Parisi F., Augenti N. (2013) "Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks". *Engineering Failure Analysis* 34 (2013) 735-760; Fragomeli A., Galasco A., Graziotti F., Guerrini G., Kallioras S., Magenes G., Malomo D., Mandirola M., Manzini C. F., Marchesi B., Milanese R. R., Morandi P., Penna A., Rossi A., Rosti A., Rota M., Senaldi I. E., Tomassetti U., Cattaro S., da Porto F., Sorrentino L. (2017) "Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 - Parte 2: Esempi di centri colpiti." *Progettazione Sismica* – Vol. 8, N.3, Anno 2017, pp. 75-98

10 Nel 2002 il terremoto di San Giuliano causa troppe giovani vittime e il Dipartimento della Protezione Civile ricostituisce la Commissione Grandi Rischi con il compito, fra gli altri, di definire le raccomandazioni per il rischio sismico. Come conseguenza, nel 2003 vengono costituiti l'Associazione Eucentre e la rete di laboratori universitari ReLUIS, entrambi per studiare gli effetti delle scosse sismiche sugli edifici e i metodi di riduzione dei danni. La Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIS), costituita nel 2003, è un consorzio interuniversitario che ha lo scopo di coordinare l'attività dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica, fornendo

supporti scientifici, organizzativi, tecnici e finanziari alle Università consorziate e promovendo la loro partecipazione alle attività scientifiche e di indirizzo tecnologico nel campo dell'Ingegneria Sismica, in accordo con i programmi di ricerca nazionali ed internazionali in questo settore. Il Consorzio è stato fondato dalle Università degli Studi della Basilicata, Università degli Studi di Napoli Federico II, Università degli Studi di Pavia (Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura DICAr). La Fondazione Eucentre, con sede a Pavia, è un ente senza fine di lucro che promuove e sviluppa la ricerca e la formazione nel campo della riduzione del rischio, in particolare sismico. La creazione di Eucentre è avvenuta su iniziativa del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Università degli Studi di Pavia, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Scuola Universitaria Superiore Pavia (IUSS).

11 L'assenza di un "Capitolato del Rilievo" a normalizzare il connubio di metodi e prodotti condivisi tra rilievo e scienza delle costruzioni nella pratica edilizia contemporanea è già sottolineata nel 1991 (De Rubertis R. (1991) Relazione introduttiva a "Il rilievo tra storia e scienza". *XY Dimensioni del Disegno* n°11-12/1991, pp. 13-19). Nel 1994 fu pubblicato un primo tentativo di capitolato, specialistico nel rilevamento architettonico ai fini del restauro, risultato di ricerche condotte dal Dipartimento di Rappresentazione e Rilievo dell'Università di Roma "La Sapienza". Tale documento individuava, con attenzione al necessario aggiornamento dei riferimenti normativi, un metodo di lavoro generalizzabile su principi contenutistici, ma non specificatamente declinabile a seconda di target particolari di indagine, quale l'ambito delle strutture storiche. Nel 2000 a Roma, in un convegno dedicato, i contenuti di indirizzo per una più "Carta del rilievo architettonico" furono approvati, ma non concretamente specificati anche in relazione al quadro normativo. Le NTC, 2008 ed aggiornate 2018, non hanno comportato un sostegno alla necessità di specificare, in termini di maggior definizione di caratteristiche del rilievo, prodotti ed out-put di lettura, provvedimenti più mirati sulle operazioni di conoscenza necessarie in termini di fabbriche e strutture storiche. Cfr. Soletti A. (1993) "Capitolato o Carta del rilievo?" *XY Dimensioni del disegno*, n°17-18-19/1993, pp.165-169; Moglia G. (2010) "Il sistema normativo mediatore tra conoscenza e progetto". In Coppo D., Boido C. (a cura di) *Rilievo urbano: conoscenza e rappresentazione della città consolidata*, Firenze: Alinea Editrice pp.154-161.

12 Cfr. European Commission Directorate-General for Communication. The EU explained: Digital Agenda for Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. Inoltre, un'affidabile mitigazione del rischio dei siti del patrimonio culturale richiede: (1) metodologie di valutazione del rischio da applicare a diverse scale, dai singoli edifici alle classi di edifici e interi centri storici e (2) soluzioni di *retrofit* specifiche in grado di bilanciare la sicurezza della vita con l'autenticità di conservazione e protezione antisismica delle costruzioni. In questa sfida, le misure di protezione per i beni culturali mobili sono aggiuntive, come discusso nel quadro del International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). Cfr. Will T, Meier H-R. (2007) "*Cultural*

heritage and natural disasters: risk preparedness and the limits of prevention." In: International council on monuments and sites (ICOMOS). Heritage at risk, special edition. Dresden: TUD Press.

13 Tale indirizzo deriva dalle Actions under Horizon2020 Societal Challenges 6 programme for 2014-2020.

14 Cfr. Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., Lee G. C., O'Rourke T. D., Reinhorn A. M., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W. A., von Winterfeldt D. (2003) "A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities", *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, 2003, pp. 733-752.

15 Gli esempi base di moduli per gli elementi finiti sono costituiti da "aste" bidimensionali a 2 nodi, nei quali sono concentrati i gradi di libertà/vincolo, con carichi distribuiti o applicati alle estremità. La composizione di tali aste permette di modellare esempi complessi di traliccio o telaio. Aggiungendo la terza dimensione costitutiva, sono integrate le caratteristiche materiche della geometria. Successivamente, l'introduzione di elementi "pipe" e "beam" ha correlato dati meccanici di rigidità alla variabilità della direttrice di estrusione della loro forma. Il passaggio finale ha riguardato l'introduzione di una complessità maggiore della forma dei componenti per modulazione della superficie "mesh" di sviluppo, gestita come guscio. Dalla maglia superficiale, la triangolazione tra i vertici opposti definisce elementi solidi "brick" a tetraedro, ponendo il problema di elastici in 3 dimensioni, con 8 nodi e 3 gradi di libertà per ciascun nodo.

16 Alcuni casi sperimentali hanno visto una collaborazione tra le ricerche nel campo strutturale e del disegno in termini di applicazioni di modellazione FEA a nuvole di punti e prodotti dal rilievo architettonico per la simulazione di sollecitazione dinamica ad apparati monumentali o complessi storici. Pur rimarcando i notevoli risultati raggiunti nel campo del dialogo tra i prodotti integrati di computazione, si sottolinea come in tutti tali i casi il disegno si sia limitato ad un contributo per in-put nella sorgente dei dati metrici senza portare avanti un controllo di qualità e corrispondenza nell'evoluzione dei modelli di calcolo, dalla cui osserva si riscontra ancora una sintesi formale estremizzata rispetto alle potenzialità descrittive delle informazioni di origine. Tra i casi studio si richiamano: Pieraccini M. Dei D., Betti M., Bartoli G., Tucci G., Guardini N. (2014) "Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy)". *Journal of Cultural Heritage* 15 (2014) 275-282; Oreni D., Brumana R., Banfi F., Bertola L., Barazzetti L., Cuca B., Previtali M., Roncoroni F. (2014) "*Beyond Crude 3D Models: From Point Clouds to Historical Building Information Modeling via NURBS*". In: Ioannides M., Magnenat-Thalmann N., Fink E., Žarnić R., Yen AY., Quak E. (eds) "Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection." EuroMed 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8740. Springer, Cham, pp. 166-175. Milani G., Valente M. (2015) "Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events: Possibilities of non-linear finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms." *Engineering Failure Analysis*

- 47 (2015) 129–161; Paupério E., Romão X., Arêde A., Costa A., Varum H., Guedes J., Pouca N. V. (2016). “Structural survey and diagnosis of historical constructions the experience of the Construction Institute”. *Vitruvio Journal* 1/2016, pp. 49-62; Fortunato G., Funari M. F., Lonetti P. (2017) “Survey and seismic vulnerability assessment of the Baptistery of SanGiovanni in Tumba (Italy)”. *Journal of Cultural Heritage*, 26 (2017), 64–78; Castellazzi G., D’Altri A. M., de Miranda S., Ubertini F. (2017) “An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings”. *Engineering Structures* Volume 132, 1 February 2017, Pages 229-248; D’Altri A. M., Milani G., de Miranda S., Castellazzi G., Sarhosis V. (2018) “Stability Analysis of Leaning Historic Masonry Structures”. *Automation in Construction* Volume 92, August 2018, pp. 199-213
- 17 Per approfondire le basi teoriche e fondative del metodo computazione FE, cfr. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. (2000). “*The Finite Element Method. Vol. 1: The Basis*”. Oxford: McGraw-Hill.
- 18 Cfr. Cianci M.G. (2008) “*Dalla linea ideale alla città virtuale*.” Firenze: Alinea.
- 19 Cit. Parrinello S., Picchio F., Becherini P., De Marco R. (2018). “*The Drawn Landscape in 3D Databases: The Management of Complexity and Representation in the Historical City*”. In: 7th Annual International Conference on urban Studies & Planning. ATINER’S CONFERENCE PAPER SERIES, p. 3-26, Athens: Athens Institute for Education and Research., ISSN: 2241-2891
- 20 Come sarà approfondito più avanti, è possibile in disponibilità di tempo e strumenti aumentare la densità di informazioni acquisite sulla superficie dalla struttura fino a dimensioni di *spot spacing* inferiori al millimetro, ma saranno pur sempre dati discontinui e di conseguenza discretizzati, seppur acquisiti in continuità.
- 21 Il quadro sismico europeo trova spiegazione in un vasto panorama di moto ed interferenza delle zolle terrestri, determinanti una mappatura territoriale di rischio accentuata in corrispondenza dei Paesi dei Balcani, del Mediterraneo e della Turchia. In particolare, la zolla asiatica comprime in moto quella europea a ruotare verso est mantenendo come perno le zone nordiche dell’Italia, tra le quali il nucleo tra Veneto e Umbria, e chiudendo il bacino dell’Adriatico e la zona dei Balcani; un’altra area calda per caratterizzazione geologica sono i Pirenei occidentali, e la Svizzera, dal risultato della collisione tra la placca litosferica europea e quella africana. A questi si aggiungono degli ‘hotspot’ legati ad un’esperienza sismica in passato, come Bruxelles (Belgio), Lisbona (Portogallo), Budapest (Ungheria), Le regioni più esposte risultano così essere Italia, Balcani, Grecia, Bulgaria, Romania e Turchia. Fonte: SHARE, progetto UE sviluppato da AHEAD, European Archive of Historical Earthquake Data.
- 22 Lo studio degli stati tensionali dell’architettura storica è prevalentemente sviluppato sulla base di modelli di calcolo elaborati in contesti di instabilità con evidenti lesioni strutturali, sia inerenti la documentazione preventiva che riguardo l’intervento consolidativo. Cfr. Senaldi I., Magenes G., Penna A. (2010). “*Numerical investigations on the seismic response of masonry building aggregates*.” In: *Advanced Materials Research*, 133, pp. 715-720;
- Formisano A. (2017) “Theoretical and numerical seismic analysis of masonry building aggregates: case studies in San Pio Delle Camere (L’Aquila, Italy).” In: *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2), pp. 227-275; Da Porto F., Munari M., Prota A., Modena C. (2013) “Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L’Aquila (Central Italy)”, In: *Construction and Building Materials*, 38, pp 1221-1237.
- 23 Il settore della rappresentazione continua a concentrarsi sull’interrelazione tra disegno architettonico e comunicazione della statica delle murature, confrontando metodologie, strumentazioni ed elaborati 2D e 3D con le necessità di lettura omogenea ed applicazione numerica del dato legate ad obiettivi di monitoraggio ed intervento. Cfr. Guarnieri A., Pirotti F., Pontin M., Vettore A. (2005) “*Combined 3D Surveying Techniques for Structural Analysis Applications*”. In *Proceedings of the International Symposium on Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 2005, vol.XXXVI-5/W1, pp. 22-24; Vernizzi C. (2007). “Considerazioni sul rilevamento per la valutazione strutturale: le volte della navata centrale del Duomo di Parma.” In *Disegnare. Idee immagini*, vol. 35, pp. 74-85.; Bertocci S. (2015). “*Il contributo del rilievo urbano dei centri storici italiani per il recupero e la prevenzione della vulnerabilità sismica: alcuni casi studi in Abruzzo, Toscana ed Emilia*”. In Marotta A., Novello G. (2015) “Disegno & Città. Cultura, Arte, Scienza, Informazione.” Roma: Gangemi Editore, 2015, pp. 397-405; Pancani G. (2017) “Il centro storico di Poppi: analisi a livello urbano per la valutazione del rischio sismico”. *DisegnareCON* 10/18, 9.1-9.10; Parrinello S., Picchio F., De Marco R. (2017) “*New generations of Digital Databases for the development of Architectural Urban Risk Menagment*.” In: Gambardella, Carmine, 2017. *Le Vie dei Mercanti XV Forum Internazionale World Heritage and Disaster*. Napoli: Fabbrica della Conoscenza, La scuola di Pitagora editrice. vol. 71, pp. 1-10.
- 24 Per approfondire alcuni casi studio di monitoraggio strutturale storico, cfr. Coisson E., Ottoni F. (2012). “*Il monitoraggio storico, ovvero la lezione della storia agli strutturisti*.” In Di Stefano R. (a cura di) (2012) *Filosofia della conservazione e prassi del restauro*. Arte Tipografica Editrice, pp. 364-368.
- 25 L’idea di raccogliere globalmente dati su apparati culturali in tempi diversi di sviluppo introduce una possibilità per scenari di comparazione estesa utili a livello decisionale sul Cultural Heritage. Cfr. Kioussi A., Karoglou M., Labropoulos K., Bakolas A., Moropoulou A. (2013). “Integrated documentation protocols enabling decision making in cultural heritage protection”. *Journal of Cultural Heritage*, 14 (3), pp. 141-146.
- 26 Per una panoramica più completa della ricerca sul tema, cfr. Coppo, D., Boldo, C. (2010) “*Rilievo urbano. Conoscenza e rappresentazione della città consolidata*”. Firenze: Alinea.
- 27 Per approfondimenti sul tema delle procedure ed affidabilità sviluppate riguardo la registrazione di dati metri da laser scanner, cfr. Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pingi P., Scopigno R. (2001) “*A suite of tools for the management of 3D scanned data. Proc. Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling Application of Heritage*”, Industry, Medicine & Land; Rusinkiewicz S., Levoy M.

(2001) "Efficient variants of the ICP Algorithm." Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM '01), pp. 145-153; Pancani G. (2017) "Il centro storico di Poppi: analisi a livello urbano per la valutazione del rischio sismico." *DisegnareCON* 10/18, 9.1-9.10; Lillo Giner S., Rodríguez-Navarro P., Gil Piqueras T., Soler Estrela A. (2016) "Leica Cyclone 9.1. Avances en el registro automático y gestión de las nubes de puntos". in Dibujar, Construir, Soñar, Tirant Lo Blanch (ed.), Castellón, 2016, cap. 39, pp. 535-545; Bigongiari, M. (2017) "El registro de la base de datos 3D". In Parrinello S., Gómez-Blanco Pontes A., Picchio F. (2017) "El palacio del Generalife. Del levantamiento digital al proyecto de gestión". Pavia: Pavia University Press, pp.84-89.

28 Per una più approfondita trattazione sul tema del rilievo fotogrammetrico terrestre, cfr. Rodríguez Navarro Pablo, (2012) "Digital photogrammetry versus the system based on active 3D sensors". in *Expresión gráfica arquitectónica*, numero 20; Parrinello S., Picchio F. (2013) "Dalla fotografia digitale al modello 3D dell'architettura storica". *DisegnareCON*, 6 (12), pp. 1-14.

29 Per una più approfondita trattazione sul tema del rilievo metrico mobile, cfr. Montemerlo M., Thrun, S., Koller, D. and Wegbreit, B., (2002) "FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem" in The AAAI Conference on Artificial Intelligence, Edmonton, Canada; Nuchter A., Lingemann K., Hertzberg J., Surmann H. (2007) "6D SLAM-3D mapping outdoor environments" *Journal of Field Robotics*, vol. 24, no. 8-9, 2007, pp. 699-722; Puente I., González-Jorge H., Martínez-Sánchez J., Arias P., (2013) "Review of mobile mapping and surveying technologies". *International Measurement Confederation*, vol. 46, pp. 2128 - 2144; Sammartano, G., Spanò, A., (2018) "Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multi sensor survey and stand-alone acquisition". *Applied Geomatics*, Vol. 10, pp. 317-339.

30 Per una più approfondita trattazione sul tema del rilievo fotogrammetrico da UAV, cfr. Aicardi I., Chiabrando F., Grazzo N., Lingua A. M., Spanò A. (2016) "UAV photogrammetry with oblique images: first analysis on data acquisition and processing". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1; Caprioli M., Mancini F., Mazzone F., Scarano M., Trizzino R., (2015) "UAV Surveys for Representing and Document the Cultural Heritage". Le Vie dei Mercanti, XIII International Forum, Vol. 56, 2015, pp. 475-482; Dominici, D., Alicandro M., Massimi V., (2017) "UAV photogrammetry in the post-earthquake scenario: case studies in L'Aquila". In *Geomatics, Natural Hazards and risk*. Vol. 8, (1), 2017, pp. 87-103. Friz A., Kattenborn T., Koch B., (2013) "UAV-Based photogrammetric point clouds. Tree stem mapping in open standards in comparison to terrestrial laser scanner point clouds". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-1/W2, 2013, pp.141-146; Multiyroso A., Grussenmeyer P., (2017) "Documentation of Heritage Buildings using Close-Range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies". In *The photogrammetric Record*. Vol. 32 (159), 2017, pp. 206-229. Nex F., Remondino F., (2013) "UAV for 3D mapping applications: a review". *Appl Geomat*. Vol. 6, 2013, pp. 1-15.

31 Cfr. Guarnieri A., Milan N., Vettore A. (2013) "Monitoring Of Complex Structure For Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (Tls) And Photogrammetry". *International Journal of Architectural Heritage* 7(1): pp.54-67

32 Cfr. Pirinu A., Balia R. (2018) "Riconoscimento e tutela di un complesso monumentale storico in ambiente urbano mediante l'integrazione di metodologie di rilevamento e di tecniche geofisiche non distruttive: l'area di Santa Croce nel quartiere Castello a Cagliari." *Restauro Archeologico*, Anno XXV, numero 1/2018, pp. 4- 19

33 L'interesse in una scansione 3D riguarda l'acquisizione in forma digitale dell'andamento nello spazio delle superfici esterne di un oggetto, sulle quali non viene fatta nessuna assunzione a priori sulla sequenza di valori colore. "Compito del sensore 3D è proprio di suddividere la superficie inquadrata e proiettata sul sensore in elementi di immagine analoghi ai pixel di un'immagine digitale, ed in corrispondenza di ognuno di questi valutare le corrispondenti coordinate spaziali e, eventualmente, il corrispondente colore." Cfr. Guidi G., Russo M., Beraldin J. A. (2010) "Acquisizione 3D e modellazione poligonale". Milano: McGraw-Hill, p. 78.

34 Nel primo caso, la configurazione di parametri ottici e fisici dei sensori propria della tipologia strumentale decreta la distanza di spot registrata dall'impulso emesso in una gamma predefinita, all'interno della quale solo parziali variazioni possono essere effettuate nell'interfaccia di setting control. I valori di risoluzione e qualità controllano rispettivamente i preset di incremento angolare degli specchi di direzionamento e la velocità dei sistemi mecano-ottici di puntamento e deflessione, a loro volta incidenti sulla risultante densità di dato metrico. Tali specifiche tecniche sono poi relazionate alle tempistiche richieste dallo strumento per espletare le azioni pianificate.

35 La componente posizionale risulta invece maggiormente legata alla direzionalità di riflessione della radiazione luminosa, e può essere conseguentemente regolata dall'operatore nel controllo delle strategie di ripresa e postazione, con una loro corrispondenza posizionale in rapporto alle superfici di indagine, oltre all'incidente influenza della scabrosità materica esposta al rilevamento. In tal senso, la definizione di proprietà 'metriche' per tali set di valori è in parte impropria in termini di identità qualitativa del dato e rischia di ingannare sulle modalità della sua gestione in campagna di acquisizione. La componente dimensionale infatti accerta una proprietà tipologica del dataset finale, quella metrica, senza rendere consapevoli delle procedure e considerazioni parametriche esperite su rapporti fisico-materici tra il target di indagine, la superficie strutturale, ed il sensore durante la fase di acquisizione in sito.

36 Sono ovviamente di eccezione le strutture complesso in ferro o acciaio, interamente costituite in materiale metallico e spesso realizzate in tempi più recenti ed ancora prive di una consolidata patina superficiale di ossidazione. Tale configurazione va ovviamente ad influenzare i parametri considerati successivamente, ma tuttavia rende il contesto di documentazione più semplice rispetto ad una struttura mista, permettendo di calibrare diversamente i parametri ma in modo univoco, per una resa uniforme sull'intero involucro.

37 Per un approfondimento sulle potenzialità e limiti di dettaglio morfo-metrico nello stato attuale degli scanner a luce strutturata, cfr. Parrinello S. Dell'Amico A. (2018) "L'artigianato tradizionale dei nativi americani procedure di rilievo e documentazione per la creazione di sistemi informativi 3D". In Empler T., Quici F., Valenti G. M. (2018) 2D Modeling & BIM. Roma: Tipografia del Genio Civile, pp. 418-433. La sperimentazione, condotta nel campo delle opere artigianali di collezione museale, evidenzia la differente e maggiore sensibilità di trasposizione formale implementabile rispetto ai laser a distanza, ma rende tale possibilità inapplicabile alla scala architettonica in ragione di un bilancio di qualità-elaborazione dei dataset limitati ad un raggio di ripresa massimo di 0,5 mq. L'ampia estensione di possibili localizzazioni dei quadri di danno e frattura sulla fabbrica architettonica ostacola inoltre la possibilità di applicazione di tali strumenti, limitati a circostante di set di ripresa contenuti e controllati sulla scala del manufatto.

38 Il laser acquisisce in modo uniforme secondo il rapporto di direzione ed inclinazione geometrica, e la possibilità di operare un processo critico di "infittimento" della maglia di punti su porzioni localizzate è valutabile per singoli blocchi strutturali, ma risulta difficilmente replicabile nel contesto di documentazione di un complesso strutturale esteso.

39 Si intende, ad esempio per il caso di una muratura in pietra, un angolo locale di inclinazione delle micro-superfici mediamente a 60° per blocchi dal piano medio interno di circa 2 cm rispetto alle macro-superfici esterne, fino ad una regolarizzazione tramite intonacatura di 15-10° di angolo medio per piano medio a meno di 1 cm di distanza. Si passa così da una curvatura media di 1/3-1/4 fino alla riduzione a 1/8-1/10.

40 Si possono identificare quattro principali fattori di influenza nel processo di allineamento e referenziazione spaziale dei dati sparsi: Fattore Metrologico, relativo alla qualità del dato derivante dal processo di rilievo, Fattore Computazionale, legato all'algoritmo e prestazione del calcolatore, Fattore Umano, per l'identificazione della sequenza di punti omologhi, Fattore Geometrico/Formale, sulla presenza o assenza di features di riconoscimento della superficie. Cfr. Guidi G., Russo M., Beraldin J. A., *op. cit.*, p. 246.

41 ICP Iterative Closest Point identifica degli algoritmi semi-automatici per la registrazione globale dei dati range-based sull'allineamento automatico tra set di punti che viene iterativamente ripetuto, a partire da punti omologhi identificati, fino a minimizzarne la distanza media. Lo strumento che viene utilizzato è quello della minimizzazione di una funzione obiettivo, proporzionale alla distanza media tra le posizioni di ripresa, il cui valore viene ricalcolato fino ad identificare un minimo globale di tale funzione. La mancanza di caratteristiche evidenti sulla superficie porta all'insorgere di problemi di convergenza dell'algoritmo e di conseguenza all'introduzione di errori di allineamento locali.

42 Vedi le considerazioni tratte dal caso studio in Fortunato G., Funari M. F., Lonetti P. (2017) "Survey and seismic vulnerability

assessment of the Baptistery of SanGiovanni in Tumba (Italy)". *Journal of Cultural Heritage*, 26 (2017), 64-78;

43 È il caso di porzioni acquisite da una sola scansione su 3, ad esempio, pur se completando la copertura del dato acquisito grazie alla loro presenza anche solo in una scansione, possono essere invece considerate dagli algoritmi come porzioni di rumore a causa del brusco e perimetralmente definito salto di densità, e quindi filtrate ed eliminate in quanto considerate come *noise*.

44 Cfr. Paris, L. (2010) "Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura". In X Congresso International Espresión gràfica aplicada a la edificación. Alicante: APEGA, 2010.

45 Si richiama la definizione di "rilevamento" quale "mezzo di lettura dei mutamenti avvenuti nel tempo per chiarire le vicissitudini costruttive delle fabbriche [...] e comprendere le cause dei dissesti", identificando il ruolo della disciplina rappresentativa nell'analisi dei sistemi strutturali architettonici. Cfr. Docci M., Maestri D. (2009) *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Roma-Bari: Laterza, 2009, pp. 384.

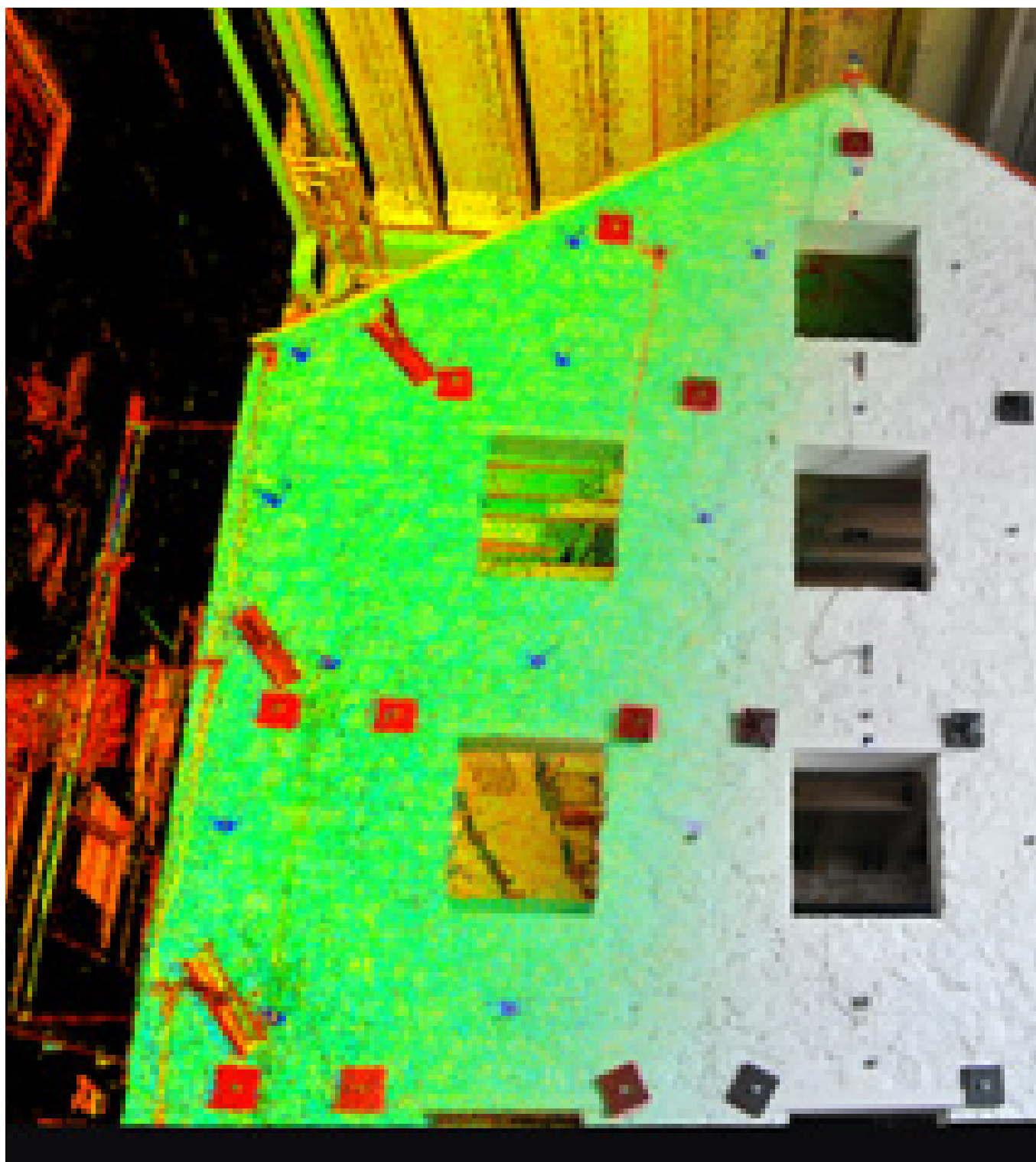
46 Il rilievo per il monitoraggio strutturale si orienta progressivamente verso caratteri di affidabilità e calibrazione per la certificazione dei prodotti *range* del rilievo; in questo caso l'attenzione non è solo verso la qualità strumentale *hardware*, in continua evoluzione tecnologica, ma anche mirata verso il consapevole uso di piattaforme e processi *software*. Cfr. Tsakiri M., Lichti D., Pfeifer N. (2006). "Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring." In *Proceedings of 3rd IAG/12th FIG Symp.*, Baden, pp. 10.

47 Cfr Masiero R. (1991) "Tra Storia e Scienza." *XY Dimensioni del disegno*, 1991, V, 11-12, pp. 114-116.

48 L'integrazione di rilievi *image-based* per l'analisi strutturale è sperimentale. Tramite un controllato orientamento metrico, i modelli SfM risultano competitivi in termini di accuratezza e affidabilità come potenziali strumenti per una rapida indagine per la diagnostica strutturale negli aggregati urbani. Cfr Parrinello, Picchio, De Marco 2017, *op. cit.*, pp. 8-9.

49 L'affidabilità dei dati morfologici è legata alla "costruzione di un modello matematico di calcolo attendibile ma soprattutto rispondente alla realtà storico-costruttiva" (Cfr. Bertocci S. (2013). "A survey database for the control of the seismic vulnerability: Acciano in the earthquake area of Abruzzo (Italy)". In Alonso-Muñoyerro, Susana Mora, Márquez de la Plata, Adela Rueda, Cruz Franco Pablo Alejandro. Reuso: Actas del congreso internacional sobre documentación, conservación y reutilización del patrimonio arquitectónico. Madrid: c2o Servicios Editoriales, 2013, p. 39) in quanto "in assenza di una chiara conoscenza della fabbrica è pressoché inutile utilizzare modelli di calcolo sofisticati, in quanto [...] le risultanze dei calcoli non saranno attinenti alla sua realtà meccanica" (cfr. Galli C. (2015) "Miglioramento sismico e ragioni del rilievo critico". *DisegnareCON*, 2015, 8, 14, p. 3)

50 Cit. De Rubertis (1994), *op. cit.*, p. 17



CAPITOLO 6

La modellazione tridimensionale per la trasposizione digitale della forma strutturale

La revisione di come i prodotti del rilievo digitale offrano modalità di interazione quantitativa tra la qualità morfologica acquisita della fabbrica reale e le possibili primitive geometriche di rappresentanza degli standard di equilibrio (quali allineamenti, piani fondamentali e nodi tecnologici) conferma la dimensione spaziale come contesto di sviluppo di tali riflessioni, ed in tal senso pone le basi per ampliare il dialogo della rappresentazione strutturale nella dimensione 3D.

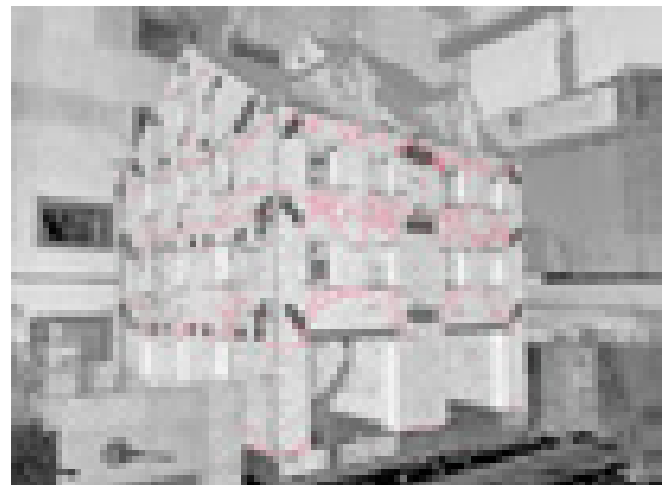
Con attenzione alla corrispondenza tra i dati della documentazione, siano essi punti rappresentati o segnali fisici misurati, ed i parametri vettoriali legati alle criticità di danno meccanico, la costruzione del modello tridimensionale definisce una fondamentale sintesi conoscitiva ed espressiva dei fenomeni sulla struttura, operata attraverso il disegno. È con la rappresentazione modellativa che si definisce non solo la base virtuale per ipotesi di spiegazione e simulazione delle dinamiche trasformative interessanti le strutture storiche, ma anche una profonda riflessione metodologica congiunta, tra documentazione ed intervento, sui livelli di lettura e restituzione del suo dettaglio formale¹. Tale considerazione si concentra così non solo sulla riproduzione degli aspetti più propriamente percettivi, vale a dire delle proprietà di apparenza superficiale, posizione ed orientamento (caratteri 'mimetici' del modello), ma anche sulla manipolazione di *pattern* e schemi interpretativi nel controllo razionale della forma trasposta (caratteri 'analogici' del modello).²

Il 'modello strutturale' torna in tal modo a valutare le ragioni della forma in quanto 'struttura visiva', qualitativamente espressa, e 'struttura concettuale', fenomenicamente trasposta³. Entrambe sono vincolate ed impossibilitate a prescindere l'una dall'altra, in quanto la loro rivelazione avviene proprio attraverso quella pelle morfologica con la quale unità, limite e sistema dell'apparato strutturale sono rappresentati.

Il caso della modellazione 3D introduce differenti prospettive di interpretazione della forma strutturale,

regolarizzata in superfici o parametrizzata per solidi, restituendo una spazialità privata dei segni ed imperfezioni della documentazione per generare 'schemi' grafici direttamente eloquenti. Il modello mimetico, invece, può "emulare le caratteristiche della visione e ricercare la verità attraverso la più efficace rappresentazione dell'apparenza percettiva dei fenomeni"⁴, a patto di essere sviluppato con un metodo di gestione e controllo tale da manipolare il dettaglio del disegno 3D non solo su basi estetiche quanto su proprietà spaziali e meccaniche.

Il raggiungimento della diagnosi fenomenica è così inteso in una strategia di modellazione che investighi l'apparato strutturale come "liberato dalla casualità dei suoi modi di apparire"⁵. Al disegnatore quindi il ruolo di valutare la particolarità del dettaglio formale e di conservarlo nella scelta rappresentativa, sviluppando *pattern* e superfici per le forme strutturali che, per quanto sempre più affidabili, non si configureranno mai come pura imitazione ma sempre come consapevole interpretazione.



(6.1) Elaborazione signica delle lesioni fessurative prodotte sulla fabbrica strutturale del prototipo di Basilea e orientate sull'immagine 3D della nuvola di punti.

6.1 MODELLAZIONE MESH: AFFIDABILITÀ DI TRIANGOLAZIONE ED INAPPLICABILITÀ DEL MODELLO PERFETTO.

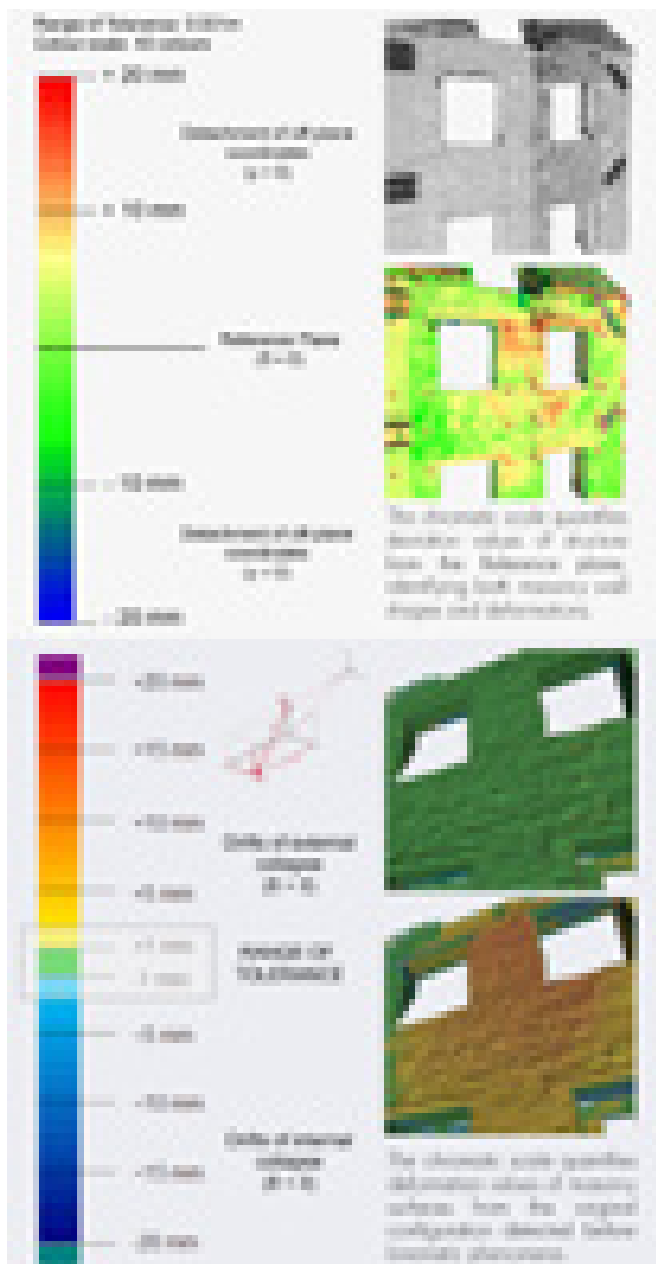
Il passaggio ad un'entità continua di superficie tridimensionale, il più possibile corrispondente al dettaglio mimetico garantito dal rilievo digitale, richiama i processi di modellazione *mesh* caratterizzanti il settore dei modelli *Reality-based* per l'architettura, con la ricostruzione dell'involuppo superficiale dell'apparato strutturale attraverso la diretta triangolazione di *vertex* spaziali in maglie poligonali continue.

L'obiettivo di 'aderenza' della triangolazione, calibrabile nel grado di interpolazione dei dati spaziali, persegue i caratteri di 'risoluzione', 'accuratezza' e 'precisione'⁶ condizionando il *geometry processing* delle superfici. La costruzione di maglie poligonali, manipolabili come *pattern* tra i *vertex* misurati, riporta metodologicamente l'attenzione sulle possibili scale di astrazione tra gli elementi rilevati tradotti nel lessico di *edges* e *clusters*. La gestione della rete poligonale di involucro, seppur algoritmicamente decontestualizzata durante i suoi processi di *editing* ed ottimizzazione, non può così prescindere dalla finalità descrittiva della superficie di appartenenza, in tal caso la meccanica delle strutture architettoniche. In tal modo, essa sviluppa una richiesta conoscitiva che è sia descrittiva, come forma del sistema, che matematica, in virtù dell'entità numerica che la supporta.

Caratteristica principale di differenza del significato fenomenico meccanico all'interno della qualità grafica dell'immagine.

Sopra (6.2) Color map riferita alla distanza di punti discontinui da un piano base di riferimento. Il colore verde indica l'aderenza dei punti al piano medio del fronte impostato, come qualità di distacco dalla geometria ideale (elevation map).

Sotto (6.3) Color map riferita alla devianza tra superfici continue. Il colore verde indica le aree di aderenza tra le entità, come qualità di deformazione tra fasi dalla geometria reale (deviation map).

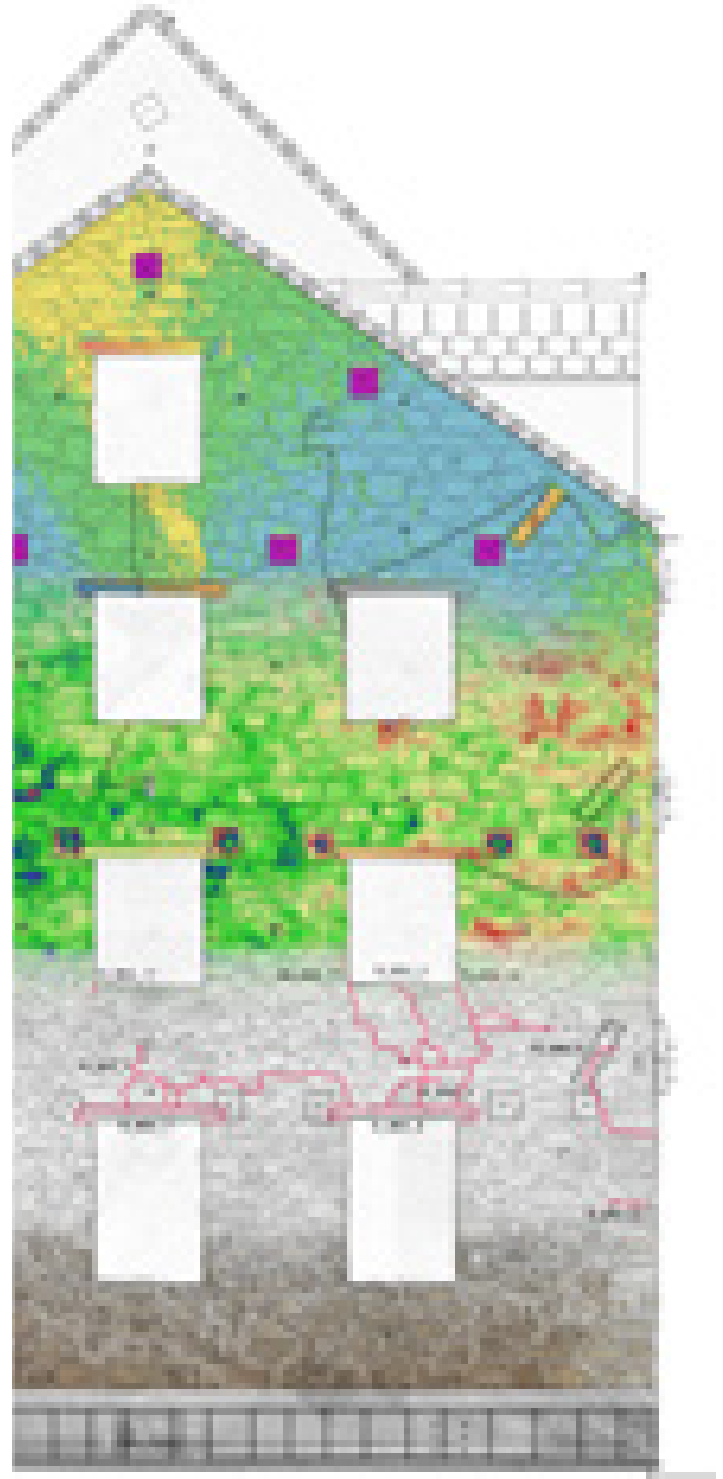


La scelta della modellazione *mesh* non risparmia il *database* morfo-metrico dal processo di sintesi e decimazione dei dati, inevitabilmente presente per la gestione stessa della mole di *Big Data* assunta dai processi di acquisizione dati. Pur non garantendo l'elaborazione un 'modello perfetto', essa vuole perseguirne un controllo in termini di forma digitale che vada oltre le proprietà visuali, nella riconoscibilità dei parametri di interrelazione geometrica della micro-morfologia superficiale e nella calibrazione degli algoritmi di triangolazione. Si attua così un disegno tridimensionale della forma capace di esporre il suo metodo in *"una dimostrazione ineccepibile, che sa dimostrare un'ipotesi, legittimare un'idea. Ne consegue che 'precisione' vuol dire anche osservare con acutezza, valutare il ruolo dei dettagli, suddividere ordinatamente lo spazio. Vuol dire indagare nella realtà con atteggiamento scientifico e documentare le ragioni delle scelte."*⁷⁷

L'immagine, seppur accettata nella sua approssimazione, richiede di essere specificatamente certificata per poter assumere una capacità anche analitica, oltre ad instaurare una comunione di linguaggi sui metodi ed elaborati che la fondano. In tal senso, il modello *mesh* richiama alla sua base un'ampia serie di dati a supporto del disegno della forma interpolata, ed il rilievo, quindi, *"si adatta alle necessità dell'oggetto da rappresentare non solo nelle sue convenzioni grafiche, ma anche nel tipo di informazioni da trasmettere e nella loro quantità per unità di superficie."*⁷⁸

Qualità infografiche dell'immagine per la lettura delle caratteristiche plastiche e di influenza meccanica in una fabbrica strutturale.

*(6.4) Contemporaneità di letture derivate dal caso studio pilota sul prototipo strutturale del centro storico di Basilea.
Dal basso: fotopiano materico, mappatura del quadro fessurativo, elevation map, deviation map.*



6.2 IL CASO STUDIO SPERIMENTALE IN AMBIENTE CONTROLLATO: MONITORAGGIO E DIAGNOSTICA SU UN PROTOTIPO STRUTTURALE DEL CENTRO STORICO DI BASILEA (SVIZZERA)

La sperimentazione del supporto disponibile dalla modellazione *Reality-based* nell'ambito della rappresentazione strutturale ai fini diagnostici è stata testata attraverso un progetto di monitoraggio diagnostico svolto durante un programma di test di simulazione sismica.

La ricerca è stata condotta all'interno del progetto "Seismic assessment of natural stone masonry buildings in Basel", condotto dall'Università di Pavia e dall'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, sul monitoraggio degli effetti sismici figurabili all'interno dell'edilizia storica europea a partire dal caso studio del centro storico di Basilea, nella regione nord-ovest della Svizzera. L'attività congiunta con la Fondazione EUCENTRE, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica di Pavia, ha permesso di predisporre una campagna di rilievo digitale nell'ambito di prove di simulazione sismica per lo studio dell'edilizia storica tipologica della città. Il progetto ha previsto la realizzazione presso i laboratori di EUCENTRE di un prototipo in scala di un'unità abitativa in muratura di pietra, sul modello della tipologia a schiera tipica del centro storico di Basilea. Il prototipo è stato costruito su una piattaforma vibrante per l'esecuzione di test oscillatori mono-assiali⁹, sulla quale è stato poi sottoposto ad una serie di prove dinamiche simulanti gli effetti di un sisma, incrementando e variando l'intensità e la durata delle diverse scosse in riferimento a valori di *input* d'archivio europeo registrati durante eventi sismici passati.

Caratteristiche di instabilità territoriale ed architettonica per il patrimonio storico urbano di Basilea.

(6.5) Classificazione sismica del territorio svizzero; (6.6) centro storico di Basilea e patrimonio medievale dell'edificato diffuso (6.7).



6.2.1. Il contesto sismico e i caratteri strutturali morfologici del patrimonio edilizio di Basilea.

La scelta dello scenario di studio della città di Basilea deriva dalla particolare storia sismica dell'area, fortemente colpita da eventi tellurici notevoli all'interno del quadro di calamità dell'Europa Centrale¹⁰.

Il patrimonio architettonico prevalente risale al Medioevo, e presenta caratteristiche di articolazione della forma strutturale particolarmente influenti sul comportamento statico degli aggregati urbani. Il significativo aumento della popolazione di Basilea tra l'XI e il XIV secolo ha causato una densificazione edilizia della città, con la costruzione di nuovi edifici a saturazione degli spazi vuoti tra le costruzioni esistenti, portando alla costituzione di complessi aggregati performanti come diaframmi strutturali. Tali *cluster* composti sono caratterizzati da fronti continui di tamponamento lungo la strada, e setti murari portanti trasversali condivisi tra le singole unità, in corrispondenza delle quali il collegamento risulta spesso labile per l'intervento postumo di annessione.

La tipologia costruttiva prevalente è multipiano, composta su 3-4 livelli con strutture portanti di elevazione in muratura lapidea, costituita da blocchi di pietra squadrati interposti a ciottoli di fiume. I solai sono realizzati in travatura lignea, e le coperture presentano ampie strutture a capriate originariamente adattate ad ospitare spazi abitativi, e caratterizzate da un'ampia varietà di altezze di colmo tra unità adiacenti. Le aperture originarie risalivano al Medioevo, ed erano a sesto acuto con ampiezza ridotta rispetto alla superficie muraria e con disposizione tipicamente irregolare di allineamento.

(6.8-6.13) Esempi di aggregati urbani del centro storico di Basilea, e caratteri principali di conformazione architettonica delle strutture.





Caratteri principali delle tipologie costruttive applicate nelle strutture storiche: (6.14-6.15) diaframmi di solaio ligneo ad orditura longitudinale, (6.16-6.17) tessiture murarie in blocchi di pietra squadrati o miste con ciottoli di fiume; (6.18-6.19) sondaggi sulla stratificazione e tessitura muraria eseguiti in alcune unità del centro storico dai ricercatori dell'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Verso la metà del XIV secolo la città di Basilea è stata colpita da una serie di calamità naturali, culminanti nel gravoso evento sismico del 1356. I danni causati divennero occasione di ricostruzione, ampliamento e rapido consolidamento del tessuto edilizio. In particolare, a seguito dei processi di densificazione urbana del XV secolo, vennero definiti i primi regolamenti in materia di parcellizzazione edilizia e di controllo delle soluzioni strutturali introdotte¹¹.

Nei secoli seguenti, le opere di trasformazione dell'immagine urbana andarono ad alterare costitutivamente la struttura delle unità edilizie, in particolare i fronti che tra il 1680 e il 1800 subirono consistenti modifiche per la regolarizzazione di ampie e diffuse aperture, intervenendo con tamponamenti e sventramenti sugli impianti strutturali ereditati dal Medioevo. Gli interventi vennero in larga parte condotti senza adeguate soluzioni di ammortamento, generando nodi e profili di disconnessione nei sistemi strutturali incidenti sui meccanismi di crisi degli interi comparti urbani. A causa dei frequenti danni sismici, numerosi edifici furono ricostruiti ed ampliati rispetto agli impianti originari, adottando sezioni rastremate delle pareti agli angoli per aumentarne la stabilità di innesto.

Nel XIX secolo, una significativa trasformazione edilizia della città venne avviata a seguito della rivoluzione

industriale e della diffusione di nuove soluzioni costruttive in acciaio. Grazie alla disponibilità e alla capacità portante di travi metalliche, grandi aperture furono nuovamente modificate in corrispondenza dei piani terra per ospitare vetrine ed attività commerciali.

L'intensa opera di ricostruzione architettonica ha prodotto una complessa stratificazione strutturale del tessuto storico, con soluzioni morfologiche e differenti caratteristiche materiche apportanti un notevole impatto di disomogeneità nella meccanica degli apparati resistenti sia unitari che urbani. Ancora al centro del monitoraggio nazionale in quanto una delle città a più alto rischio sismico in Svizzera¹², lo ricerca in corso sul centro storico di Basilea si è orientata sullo studio del comportamento statico e dinamico delle tipologie strutturali edilizie per derivare mappature e quantificazioni affidabili dell'evoluzione di labilità e meccanismi di danno della forma strutturale in caso di sollecitazione sismica.

Lo studio archivistico dei meccanismi sollecitati e delle fasi di intervento ha indirizzato la ricerca verso lo studio della risposta di resistenza degli apparati strutturali nelle unità ed aggregati del centro storico, per la previsione di conformazioni di instabilità capaci di propagarsi ed influenzare interi comparti urbani nell'eventualità di un fenomeno sismico, e di opportune strategie di contenimento.



(6.20) Cantiere di costruzione del prototipo edilizio all'interno dei laboratori EUCENTRE di Pavia. La struttura è stata realizzata direttamente sopra la piattaforma vibrante di simulazione sismica, il cui perimetro di travi ha costituito vincolo di fondazione.

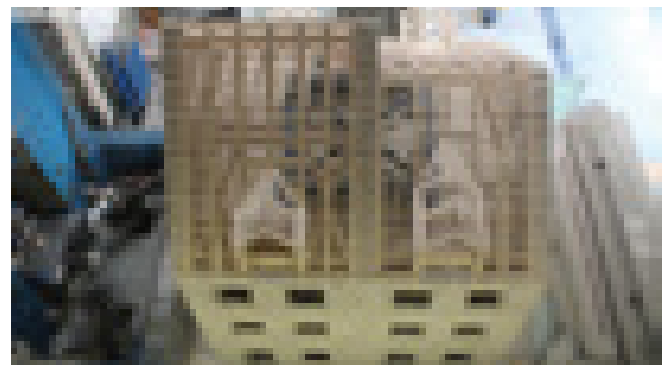
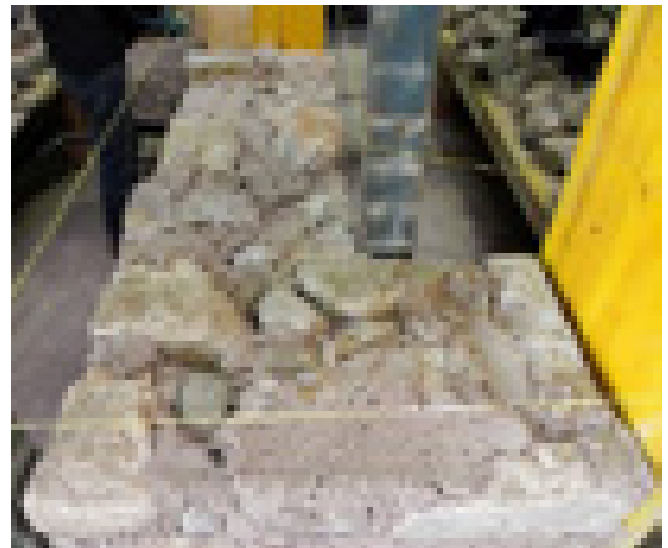


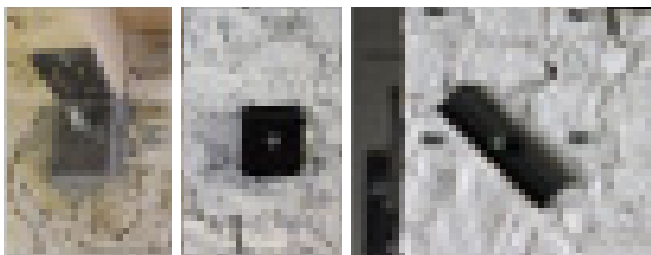
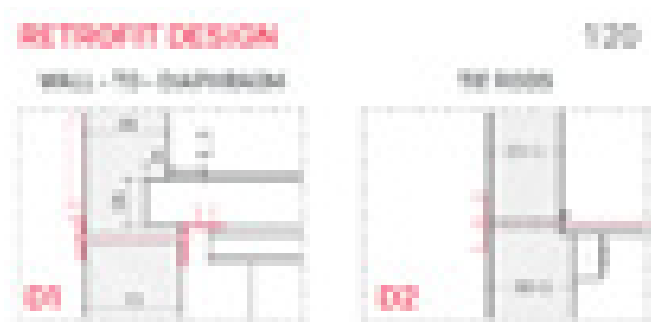
(6.21-6.24) Alcuni accorgimenti costruttivi per la realizzazione del prototipo in scala: tessitura dei paramenti murari a doppio paramento con blocchi in scala e malta additivata con polistirolo per la simulazione della componente di sabbia; orditura delle falde di copertura.

6.2.2. La predisposizione costruttiva del prototipo strutturale per la validità della risposta meccanica

Il prototipo edilizio per la simulazione è composto da due unità strutturali adiacenti separate da un setto intermedio di delimitazione, senza reciproco ammorsamento, ciascuna organizzata su tre livelli in alzato con copertura e solai flessibili in legno. Le dimensioni limitate della tavola vibrante (700x560 cm) hanno vincolato la dimensione del prototipo alla scala 1:2. Conseguentemente, le dimensioni di pareti, aperture ed elementi resistenti sono state proporzionate per mantenere i rapporti caratteristici della tipologia strutturale, curata anche nella resa tecnologica di dettagli e materiali costruttivi per garantire l'affidabilità della sperimentazione agli studi reali. Il prototipo presenta delle dimensioni di 597x558 cm in pianta, con altezza massima della copertura di 769 cm. Le facciate ovest ed est con aperture sono state orientate parallelamente alla direzione di oscillazione

La collocazione specifica del prototipo, relativa alla posizione della piattaforma oscillatoria necessaria per i test sismici, ha influenzato notevolmente le pratiche di ripresa e rilievo: in particolare il lato est, a ridosso della parete del laboratorio, è stato favorito dal fronte intonacato, permettendo una buona acquisizione da terra senza estesi coni d'ombra.





La fase di test sismici ha previsto anche la disposizione di specifici sistemi di consolidamento, con catene e piastre di acciaio, che sono state attivate in corrispondenza di specifici run di oscillazione per valutare la possibilità di contenimento del danno (6.25-6.29)

In particolare sono state applicate tre tipologie di catene a trazione, le cui piastre sui fronti hanno generato fenomeni puntuali di riflessione del raggio laser e rumori localizzari di 'dispersione del dato'.



(6.30-6.31) Attività di rilievo fotogrammetrico all'interno del prototipo strutturale. Le riprese interne sono state condotte con camera reflex e con supporto di treppiede, dai tempi di acquisizione più estesi per la ridotta luminosità interna. Il rilievo fotografico è stato eseguito per tutti e 3 i livelli della struttura, mentre all'esterno l'accesso alle porzioni di fronte più alte è stato facilitato con piattaforme elevatrici a ragno.

mono-assiale della piattaforma, simulando vetrine e porte di servizio caratteristiche dei piani terra nelle unità del centro storico. Per quanto riguarda le facciate nord e sud, sono state assunte rispettivamente le configurazioni di testata e di paramento intermedio, privo di aperture, caratteristiche di un aggregato tipologico in linea.

La muratura, costituita da due paramenti di blocchi di pietra sbozzati (dimensioni di 10-40 cm) con la presenza diffusa di ciottoli di fiume (10-40% della muratura con diametro medio di 5 cm) e diatoni, ha previsto degli spessori variabili da 35 cm al piano terra a 25 cm nel terzo livello, ulteriormente diminuita a 15 cm in corrispondenza dei timpani di testata. Per emulare la labilità di sconnessione in corrispondenza del setto trasversale tra unità, la connessione tra le unità strutturali è disposta con blocchi passanti solo ogni tre corsi di muratura, disposti alternamente tra il paramento interno e quello esterno. Questo tipo di connessione, comune nei casi di saturazione edilizia degli aggregati storici, ha reso la struttura più vulnerabile ai danni locali, simulando l'interazione di trasmissione dinamica tra gli adiacenti edifici.

La superficie strutturale esterna è stata interamente intonacata nel fronte est e parzialmente, in corrispondenza del giunto tra le unità, nel fronte ovest, mentre uno dei locali interni, al primo piano, ha previsto la realizzazione di uno strato di finitura in intonaco e stucchi decorativi. Le restanti superfici sono state lasciate a vista della tessitura muraria.

L'attenzione costruttiva al prototipo è stata condotta con l'obiettivo di fornire una fabbrica edilizia certificata sulla quale valutare meccanismi locali di sollecitazione sismica. A tal fine, il ciclo di test ha previsto una serie di prove dinamiche monodirezionali simulanti gli effetti di un sisma, con progressivi incrementi delle intensità di accelerazione e l'applicazione di strategie di retrofit¹³ per valutare l'effetto di soluzioni di intervento e consolidamento sulle strutture danneggiate.

6.2.3. La campagna di rilevamento digitale: caratteristiche e processi di acquisizione

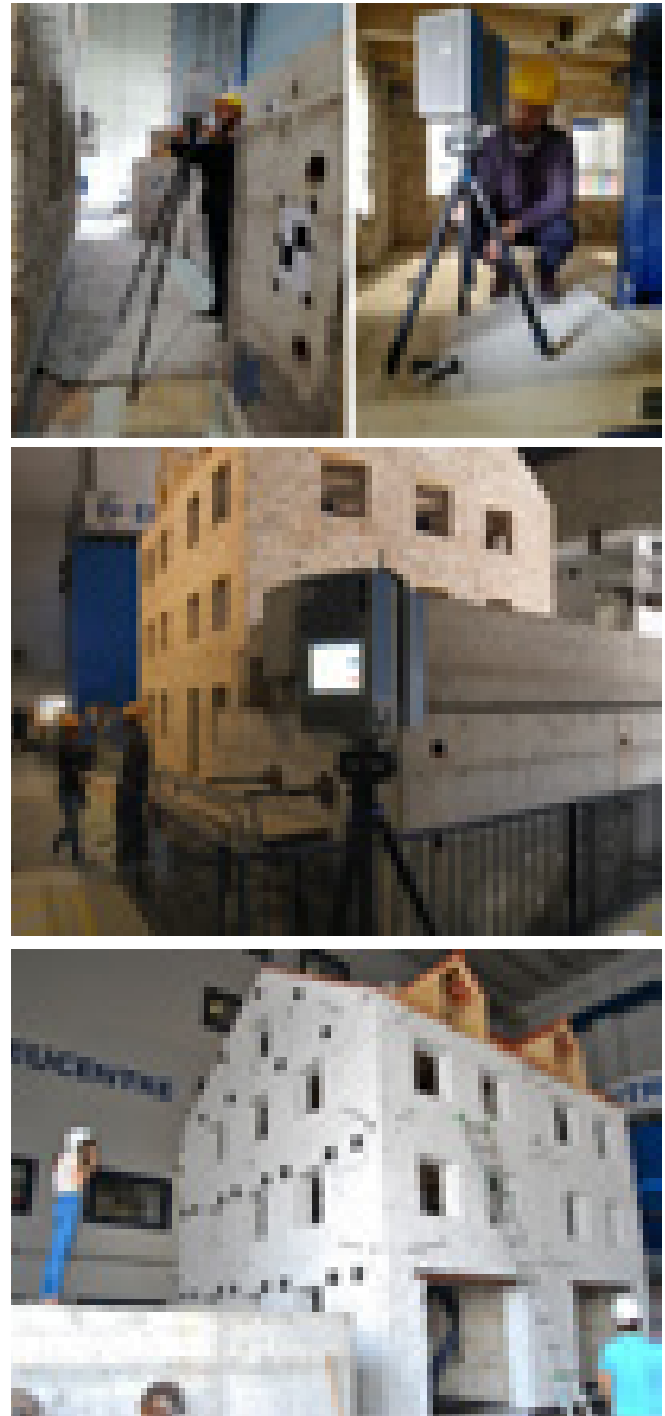
La pianificazione della campagna di rilevamento del prototipo durante le fasi di simulazione sismica ha evidenziato alcuni aspetti chiave di calibrazione ed organizzazione delle attività, portando sia ad

implementare l'accuratezza di dettaglio ed affidabilità richiesta per i dati acquisiti che ad adeguare le tempistiche e modalità strumentali per le necessità dello specifico programma di test.

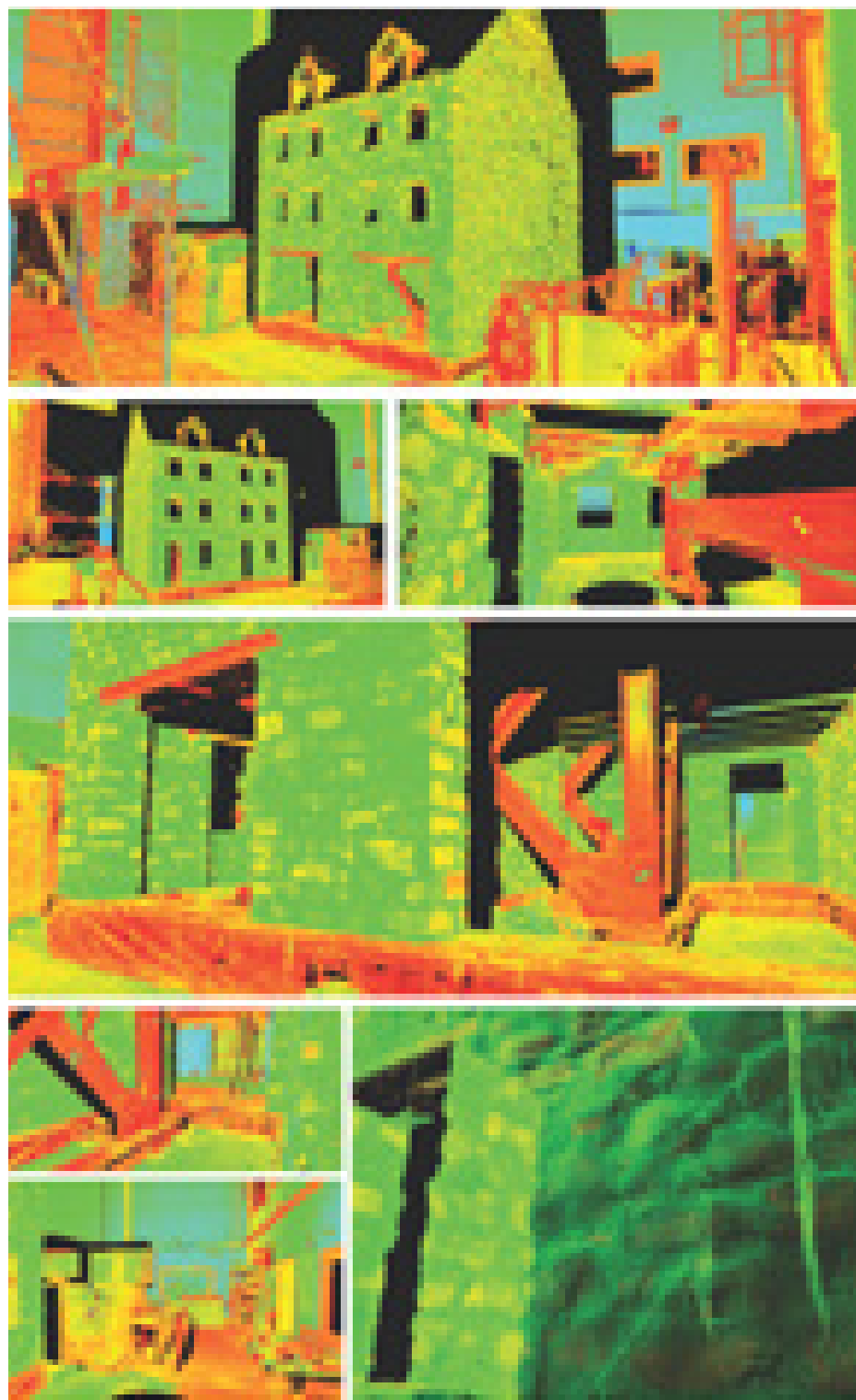
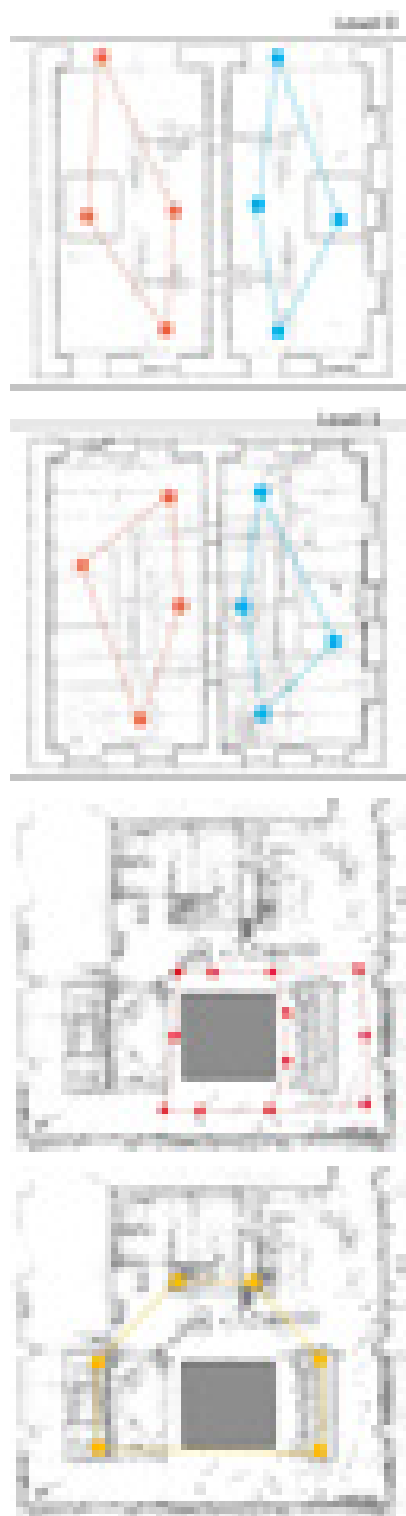
Le dimensioni ridotte del manufatto e l'ambiente di laboratorio controllato, in termini sia di condizioni ambientali, di illuminazione e disturbo dei sensori che di mobilità degli operatori, hanno garantito un contesto facilitato per la disposizione delle pratiche strumentali. Le superfici e le strutture murarie oggetto della documentazione hanno permesso di concentrare la calibrazione della qualità di dato morfo-metrico sulle proprietà di densità e affidabilità della misurazione ottica, facilitate dal raggio di copertura contenuto tra le postazioni di ripresa e dalla totale accessibilità agli ambienti del prototipo. Parallelamente, la scala di riduzione di tali spazi è risultata a sua volta fattore di limitazione in termini di manovrabilità e gestione geometrica dello spazio misurato, portando ad una maggiore attenzione sia sul rapporto di triangolazione presente tra ogni postazione di ripresa e le superfici di indagine, sia ad una più elevata soglia di affidabilità richiesta nella tolleranza di allineamenti ed approssimazioni del dato acquisito.

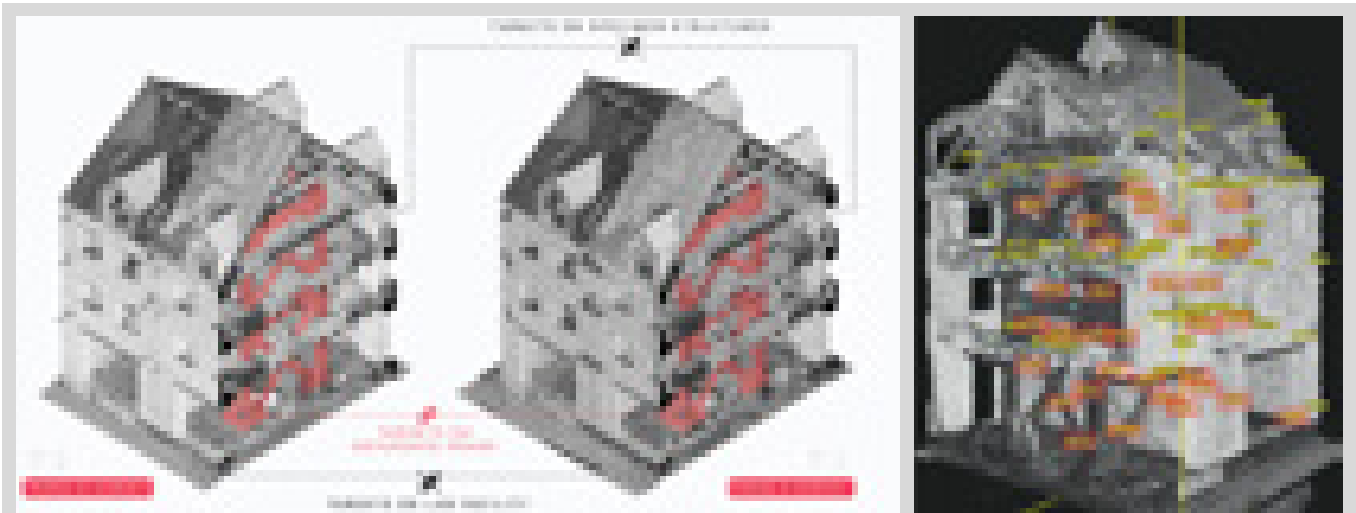
Inoltre, la rapida successione degli eventi di oscillazione sismica ha permesso di comparare in un'unica fase sperimentale di simulazione scale di danno strutturale critico normalmente apprezzabile a distanze temporali di più decenni, seppur vincolando le tempistiche del rilievo e riducendo le campagne di acquisizione (6) rispetto ai test totali (74, tra critici e di assestamento).

Le attività di rilevamento architettonico, parallelamente a quelle di monitoraggio e di rilevamento cinematico in fase di sollecitazione, hanno interessato le fasi di quiete tra gli eventi sismici indotti. La sperimentazione ha previsto globalmente 74 Run di simulazione sismica su piattaforma vibrante, condotti con intensità crescenti dal 25 al 275% rispetto al record di accelerazione naturale registrato in Montenegro nel 1979. Le operazioni di *retrofit* sono state attivate a partire dal Run#47, ad intensità M175%. I *database* di documentazione morfo-metrica corrispondono alle situazioni statiche di Pre-Run, Run#29 (M100%), Run#37 (M150%), Run#47 (M175%R), Run#64 (M225%R). Le campagne fotografiche sono state integrate con Run#33 (M125%), Run#42 (M175%) e Run#74 (M275%R).



(6.32-6.34) Attività di rilevamento laser scanner secondo le poligonali di ripresa esterne ed interne al complesso. (6.35) Attività di mappatura fotografica e fotogrammetrica dei singoli quadri di lesione.



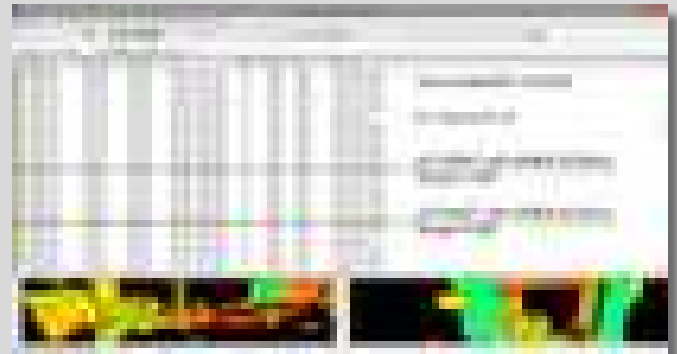


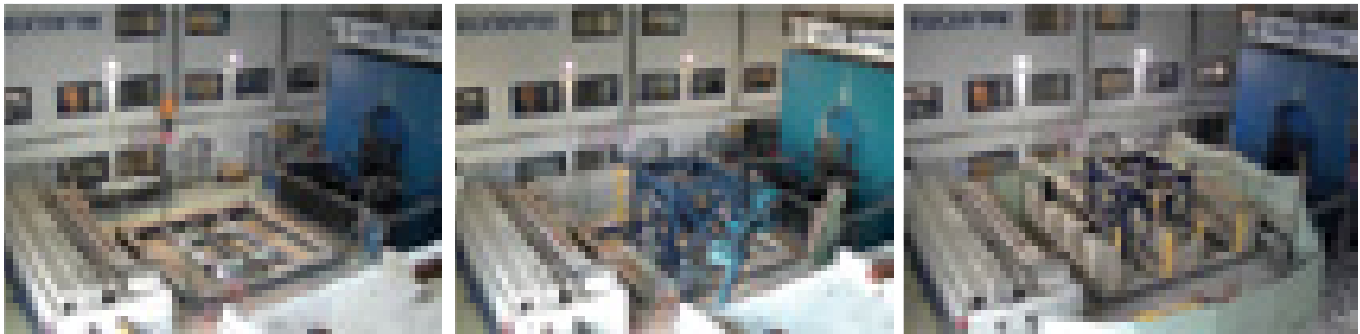
Nella pagina a fianco: poligonali delle stazioni di ripresa da laser scanner eseguite (6.36-6.37) nei locali interni del prototipo, (6.38) all'esterno da terra e (6.39) all'esterno da quote sopraelevate delle strutture del laboratorio. (6.40-6.45) singole scansioni del rilievo da laser scanner e (6.46) qualità di densità del dato.

Per la registrazione, solo i target collocati sulle strutture indeformabili (e solidali con il prototipo) sono stati adottati nelle referenziazione tra singole fasi (6.47-6.48)

(6.50-6.51) Parallelamente, il rilievo fotogrammetrico condotto sulle superfici murarie del prototipo ha fornito una mappatura morfologica ed RGB totale dell'involucro strutturale, successivamente implementata durante le fasi seguenti dalla referenziazione degli specifici modelli di danno. Il monitoraggio dei quadri di fessurazione ha previsto un'elevato dettaglio fotografico, fino a distinguere sia i blocchi murari che lo strato di malta.

(6.49) Set di registrazione delle Scanworld corrispondenti al rilievo morfometrico di ogni fase statica. A partire dal riferimento dei target, l'allineamento cloud to cloud è stato migliorato con tolleranze millimetriche.





Il processo di acquisizione per la documentazione digitale è stato svolto con un approccio integrato tra applicazioni *range-based* e *image-based*, affidando alle prime il ruolo principale nella definizione dei *database* morfo-metrici di riferimento, in funzione delle maggiori e certificate accuratèzze di misurazione, e sviluppando sequenze di acquisizione fotogrammetrica *Structure from Motion* per la mappatura localizzata di dettaglio dell'evoluzione cronologica di fessurazioni e fenomeni di danno. La rapidità di esecuzione delle prove dinamiche su tavola vibrante, condotte consecutivamente in 5 giorni ad intervalli di poche ore, ha influito temporalmente sulle operazioni di rilevamento, costringendo a limitare l'integrazione strumentale nonostante la necessità di elevate affidabilità metriche e morfologiche in fase sia di acquisizione che di restituzione dei prodotti diagnostici.

L'appoggio ad una rete topografica di supporto al rilievo laser scanner è stato superato in funzione delle dimensioni spaziali ridotte del prototipo e delle caratteristiche di precisione di misurazione della strumentazione adottata (6 mm a 10m per lo scanner Z+F 5006h, limite massimo di distanza di acquisizione adottato). Inoltre, le postazioni di scansione sono state organizzate su poligoni chiusi sia

all'esterno che all'interno degli ambienti strutturali, con distanza sequenziale contenuta a 5 m.

Parallelamente, il rilievo fotogrammetrico SfM ha condotto un monitoraggio speditivo ma focalizzato delle sole porzioni di struttura interessate da fessurazioni e lesioni¹⁴, utilizzando camere reflex Canon EOS 1200D e Nikon D3300 a 21 Megapixel per l'elaborazione di modelli *high poly* (media di 587.581 polyfaces in 0,5 mq) con ripresa da terra o da piattaforma articolata per permettere agli operatori di raggiungere le porzioni murarie in quota per la ripresa.

Sono state condotte un totale di 6 campagne di acquisizione laser scanner, 2 prima dei test per definire la fase "zero" di comparazione (al termine della costruzione e a seguito della stesura degli strati di finitura) e 4 al termine delle giornate dedicate alle simulazioni. Le campagne di acquisizione fotogrammetrica sono state 8, di cui una globale pre-test e le seguenti concentrate sulle porzioni lesionate e fessurate, per la definizione di un archivio di modelli 3D delle lesioni sviluppate sui diversi setti murari della struttura del prototipo. Le riprese sono state condotte sia manualmente che su treppiede per lunghe esposizioni, necessarie negli ambienti interni del prototipo privi di illuminazione. Mediamente, sono stati eseguiti almeno





10 scatti per porzioni superficiali di 20 cmq, incrementati in caso di lesioni ad ampio margine o più ramificata fessurazione.

Sopra: (6.52-6.57) Fasi costruttive del prototipo strutturale fisico, sotto (6.58-6.61) orbitazione e sezione del prototipo strutturale virtuale nelle nuvole di punti da laser scanner referenziate. (6.62) Sezione del prototipo dove è visibile il telaio della piattaforma vibrante solidale al sistema.

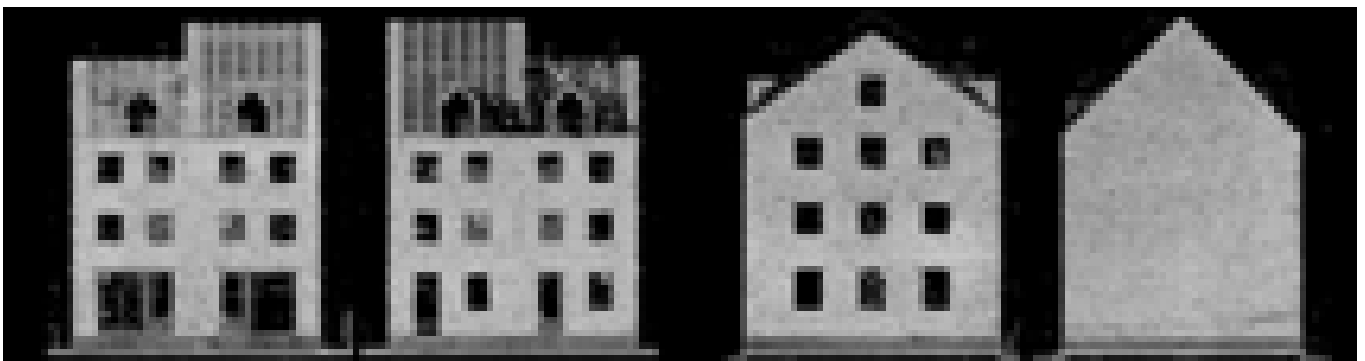
6.2.4. La finalizzazione del database morfologico

L'archivio di dati raccolti è stato catalogato per fasi statiche di ispezione del prototipo, corrispondenti ai quadri di danno residuo valutati a seguito degli specifici *run* di oscillazione. Attraverso tale sistema di classificazione è stato possibile instaurare una corrispondenza con le sequenze di *input* dinamici misurati dai sistemi strumentali di EUCENTRE durante le fasi cinematiche, ed operare un processo di confronto e convalida tra le misurazioni restituite dai diversi sensori ottici, statici e dinamici.

L'obiettivo preliminare è stato quello di controllare l'affidabilità metrica dei rilievi come garanzia della tolleranza descrittiva dei fenomeni meccanici concessa dal metodo proposto, nella volontà di definire una base morfo-metrica di dati certificata per le successive operazioni di ricostruzione digitale e lettura diagnostica delle deformazioni del sistema strutturale.



(6.63) Orthoimages estratte dalla nuvola di punti 3D, rettificate ed applicate per la redazione di disegni ed elaborati grafici della ricerca. Si nota la presenza di rumore strumentale nella banca dati grezza, criticamente rimosso durante il processo di disegno.



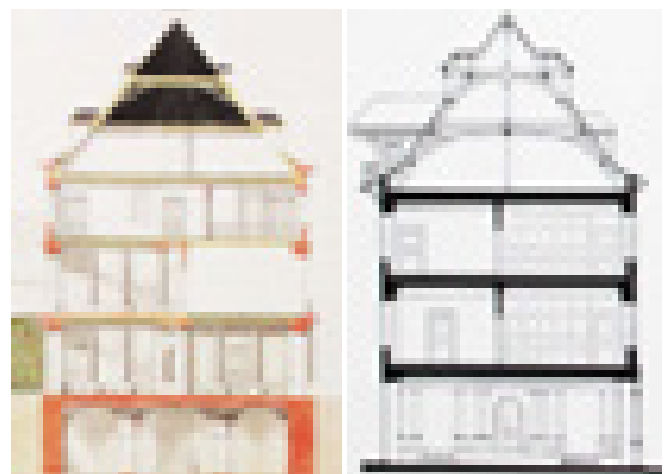


(6.64) Confronto parallelo del programma di test e documentazione del prototipo di Basilea: sopra i test sismici e i rilievi statici (rosso), sotto la sequenza dei run rilevati con strumenti di mappatura dinami-

La scala ridotta del prototipo edilizio ha influenzato notevolmente le tolleranze accettate ai fini della lettura dei meccanismi di dissesto. In funzione dell'“effetto scala”, le intensità di deformazione sono risultate ridotte di oltre la metà rispetto ai casi reali di danno strutturale, rendendo necessari accorgimenti metodologici in fase di allineamento oltre la soglia architettonica di 1 cm e quella della normativa NTC di 5 mm, fino ad apprezzare spostamenti fuori piano di tolleranza minima di 1mm. Tali imposizioni hanno caratterizzato l'intero processo di documentazione morfo-metrica, dall'acquisizione alle fasi di registrazione dei dati, definendo sia i parametri di densità superficiale delle nuvole di punti (*laser spot* non superiore a 1 mm sulle superfici discrete) sia verificando gli errori di registrazione tra scansioni e *database* parziali su target *Black&White* di controllo e superfici discrete in *cloud-to-cloud* (accettati nel valore massimo di 1 mm ed adeguatamente pesati nell'allineamento)¹⁵.

Ad ultimazione della registrazione delle singole nuvole di punti, corrispondenti ad ogni fase statica residua monitorata, è stato definito un ulteriore *database* collettore per il collegamento e la referenziazione unificata delle fasi distinte. Il processo di referenziazione dei dati metrici ha impostato un sistema di riferimento spaziale UCS fisso tra le diverse sequenze sismiche, e non alterato dai fenomeni cinematici subiti dalla fabbrica. Considerata la possibile deformabilità dei paramenti resistenti e degli orizzontamenti lignei dell'intera unità, tali supporti sono stati esclusi, così come le pareti e i supporti fissi del laboratorio, alterati dalla non perfetta corrispondenza di ritorno posizionale della tavola vibrante al termine di ogni *run*. L'allineamento tra i *database* statici è stato controllato tramite la selezione di *target* posti in aderenza alla tavola vibrante (59), sia nella piattaforma di base che nel telaio di elevazione, unico sistema interamente solidale al prototipo al termine di ogni fase dinamica¹⁶.

Il *database* 3D globale di nuvole di punti, comprendente quelle acquisite globalmente da laser scanner e le parziali fotogrammetriche¹⁷, ha definito un quadro virtuale “cristallizzato” degli effetti delle fasi di sciame sismico, permettendo di virtualizzare la memoria statica del prototipo, demolito a conclusione delle prove, attraverso la sua morfologia digitale. I primi dati restituiti, elaborati in disegni e quadri di lesione, sono serviti ad una descrizione preliminare dei danni e delle deformazioni apportate, ripercorrendo le vicende del sisma ed apprezzando l'incremento delle lesioni all'aumentare delle sollecitazioni. Tali supporti hanno costituito una prima ricostruzione qualitativa del comportamento statico a sollecitazione della fabbrica.

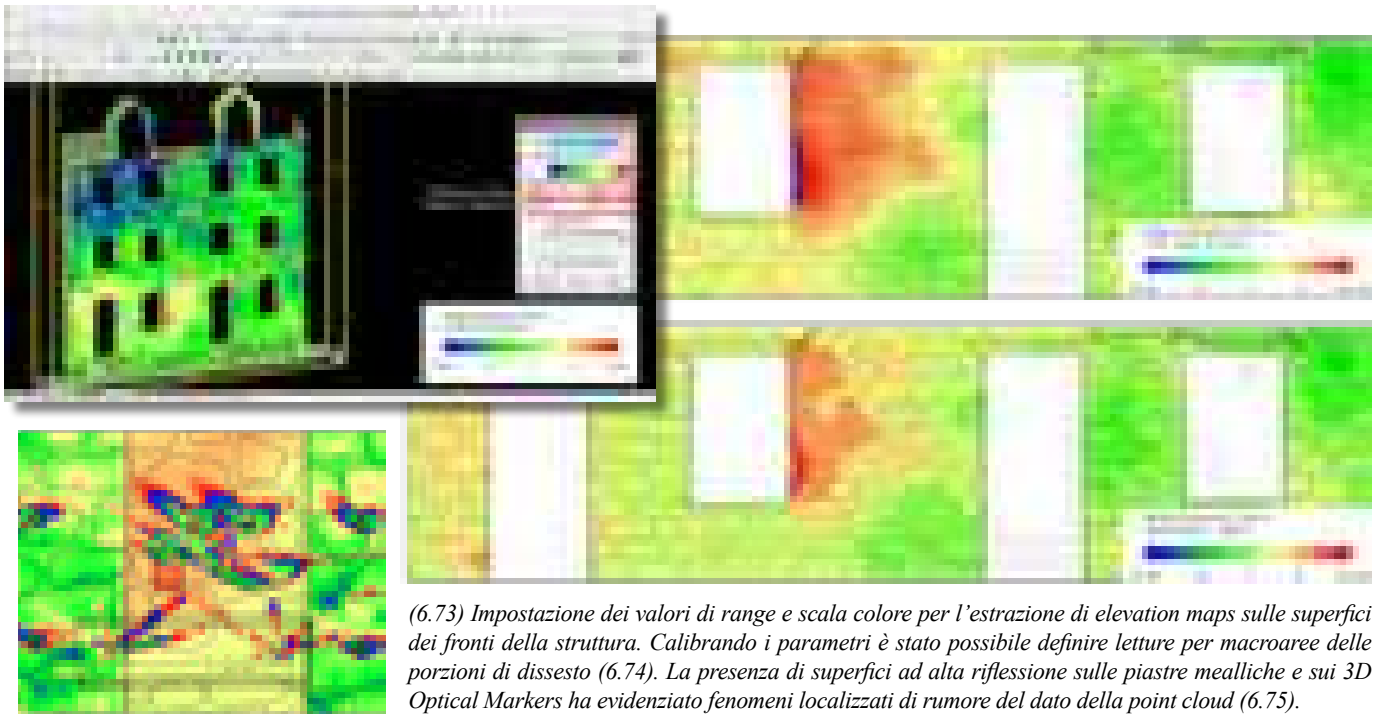


(6.65) Elaborati tecnici e disegni storici (XVIII-XIX secolo) per lo studio degli impianti strutturali di matrice medievale della tipologia edilizia nel centro storico di Basilea.



(6.66-6.72) Disegni vettoriali CAD integrati ai fotopiani materici elaborati dal rilievo digitale del prototipo strutturale di Basilea.





(6.73) Impostazione dei valori di range e scala colore per l'estrazione di elevation maps sulle superfici dei fronti della struttura. Calibrando i parametri è stato possibile definire letture per macroaree delle porzioni di dissesto (6.74). La presenza di superfici ad alta riflessione sulle piastre metalliche e sui 3D Optical Markers ha evidenziato fenomeni localizzati di rumore del dato della point cloud (6.75).

6.2.5. Letture deviazionali delle point clouds dalla referenziazione delle fasi statiche

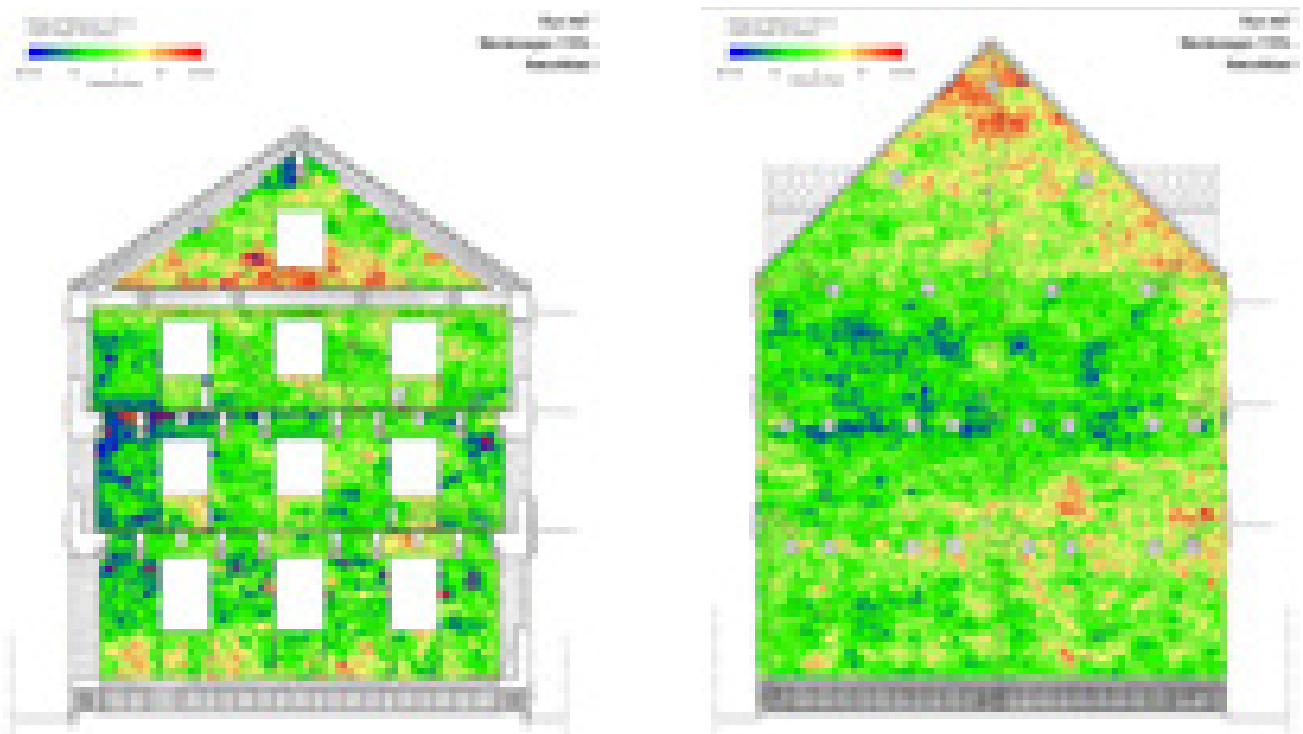
La referenziazione del database 3D globale ha consolidato la base geometrico-spaziale sulla quale valutare compiutamente gli spostamenti e le evoluzioni deformative indotte sui paramenti murari, determinando variazioni posizionali e deviazionali dei dati discreti descrittivi la struttura.

L'interrogazione colorimetrica delle *point clouds* sui fronti verticali tramite *elevation maps* è stata valutata attraverso il test di differenti *range* di tolleranza e scale colore, finalizzate ad una visualizzazione più funzionale degli scostamenti spaziali per la comprensione diagnostica in rapporto a piani 2D fissati come riferimento. La soglia minima più adeguata di intervallo colore è risultata quella di 1 mm, valore utile per una corretta evidenziazione delle porzioni di *drift* fin dalle prime fasi di evoluzione cinematica (influenzate da "effetto scala" con intensità da 2 mm nelle prime oscillazioni a 15 mm nei *run* finali). Una possibile lettura dell'andamento morfologico dei fronti per curve di livello è stata resa superflua dal comune ordine

di grandezza intercorrente tra fenomeni deviazionali e dettaglio formale delle superfici, dove le forme lapidee al rustico e le variazioni di livello sono state interpretate dal sistema algoritmico in analogo codice RGB.

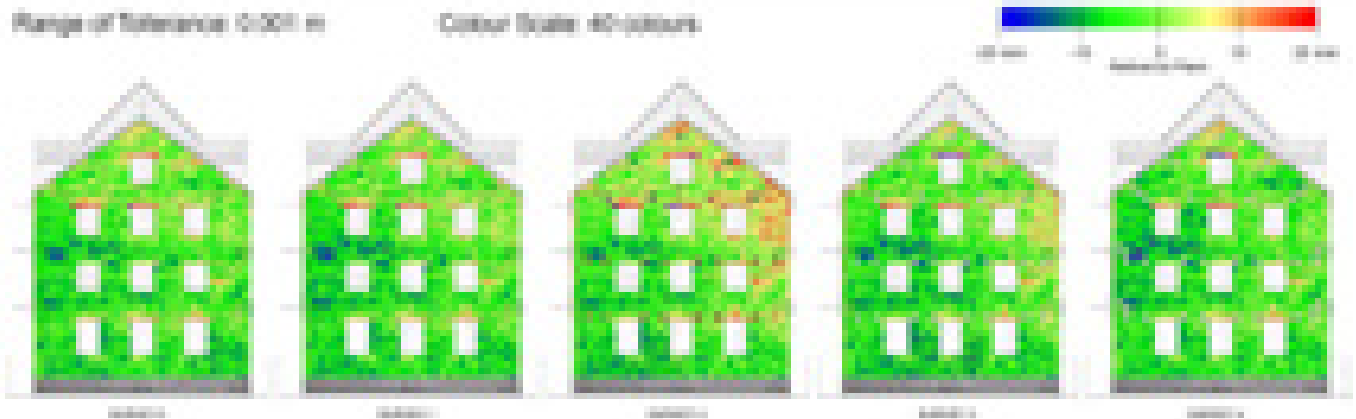
La gestione ed elaborazione dei dati del rilievo digitale, la registrazione dei *database* e la produzione di disegni affidabili hanno permesso di comparare le diverse condizioni della struttura per lo studio del comportamento degli apparati murari. La rasterizzazione di immagini ortogonali delle nuvole di punti, integrate con fotopiani texturizzati da modelli SfM referenziati al database metrico, ha permesso di sviluppare elaborati bidimensionali delle configurazioni del prototipo, adottate come basi vettoriali di maggior corrispondenza rispetto agli elaborati progettuali sulle quali inquadrare le informazioni grafiche ottenute dalle successive operazioni di comparazione e ricostruzione dei fenomeni di danno.

Un'applicazione ha riguardato in particolare la finalizzazione della mappatura eseguita sulle lesioni durante la sequenza di simulazione. Per referenziare tra loro sia i dati di monitoraggio raccolti da EUCENTRE che l'esteso apparato



fotografico, ogni lesione è stata classificata con un codice alfanumerico corrispondente al fronte di localizzazione, al *run* di oscillazione durante il quale si è presentata la faglia di origine, ed un numero progressivo di identificazione. A tale archiviazione sono corrisposti anche i *chunk* SfM elaborati dalle singole riprese fotogrammetriche.

Elevation maps estratte al run 47 (Montenegro 175%) in corrispondenza del fronte Nord interno (6.76) e fronte Sud esterno (6.77) La calibrazione dei range colore della mappatura permette di leggere uno sviluppo del quadro del dissesto alla scala dei singoli blocchi murari, la cui deformazione morfologica è enfatizzata per singolo elemento per la mancanza di uno strato di intonaco soprastante.



(6.78) *Elevation maps dell'evoluzione di drift per il fronte nord. E' possibile osservare un incremento graduale del danno fino alla fase di rilievo Survey 2, corrispondente al maggior stato di danno in condizioni non consolidate. Dalla fase di Survey 3 sono state attivate le cantene di conteni-*

6.2.6. Il controllo multi-strumentale comparato e la certificazione della sequenza statica

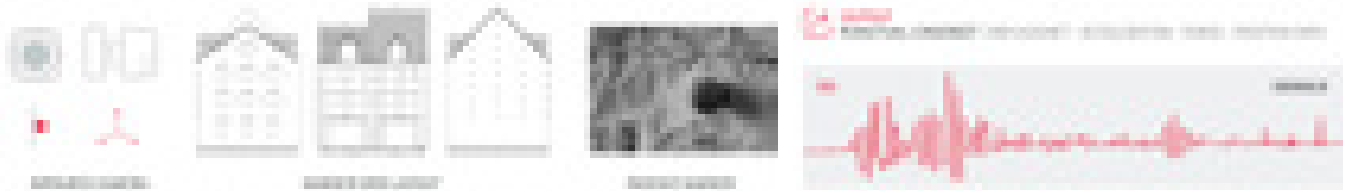
Uno dei primi traguardi della sperimentazione è stato quello di convalidare l'affidabilità del protocollo di rilevamento digitale alla scala architettonica rispetto alla lettura condotta su dati puntuali più sensibili, registrati nelle misurazioni a contatto della pratica strutturale.

Parallelamente alle attività descritte, è stata curata da EUCENTRE un'intensa campagna di monitoraggio degli *input* trasmessi da segnalatori ad alta precisione, sollecitati in corrispondenza di picchi dinamici e residui statici di oscillazione della struttura muraria. I dispositivi di trasmissione delle alte frequenze di campionamento, costituiti da geofoni¹⁸, accelerometri¹⁹, potenziometri²⁰, *pattern* geometrici di controllo, celle di carico ed estensimetri²¹, sono stati collocati in corrispondenza di nodi caratteristici di concentrazione delle tensioni nella struttura del prototipo, ed hanno fornito segnali di *input* successivamente filtrati e gestiti per trarne delle chiare letture puntuali. I quadri di danno hanno previsto un controllo di corrispondenza della forma strutturale nelle sue variazioni di continuità deformativa, espresse attraverso la valutazione di parametri sia spaziali (spostamenti 1D, 2D, 3D e deformazioni) che fisico-cinematici (velocità, accelerazioni, forze).

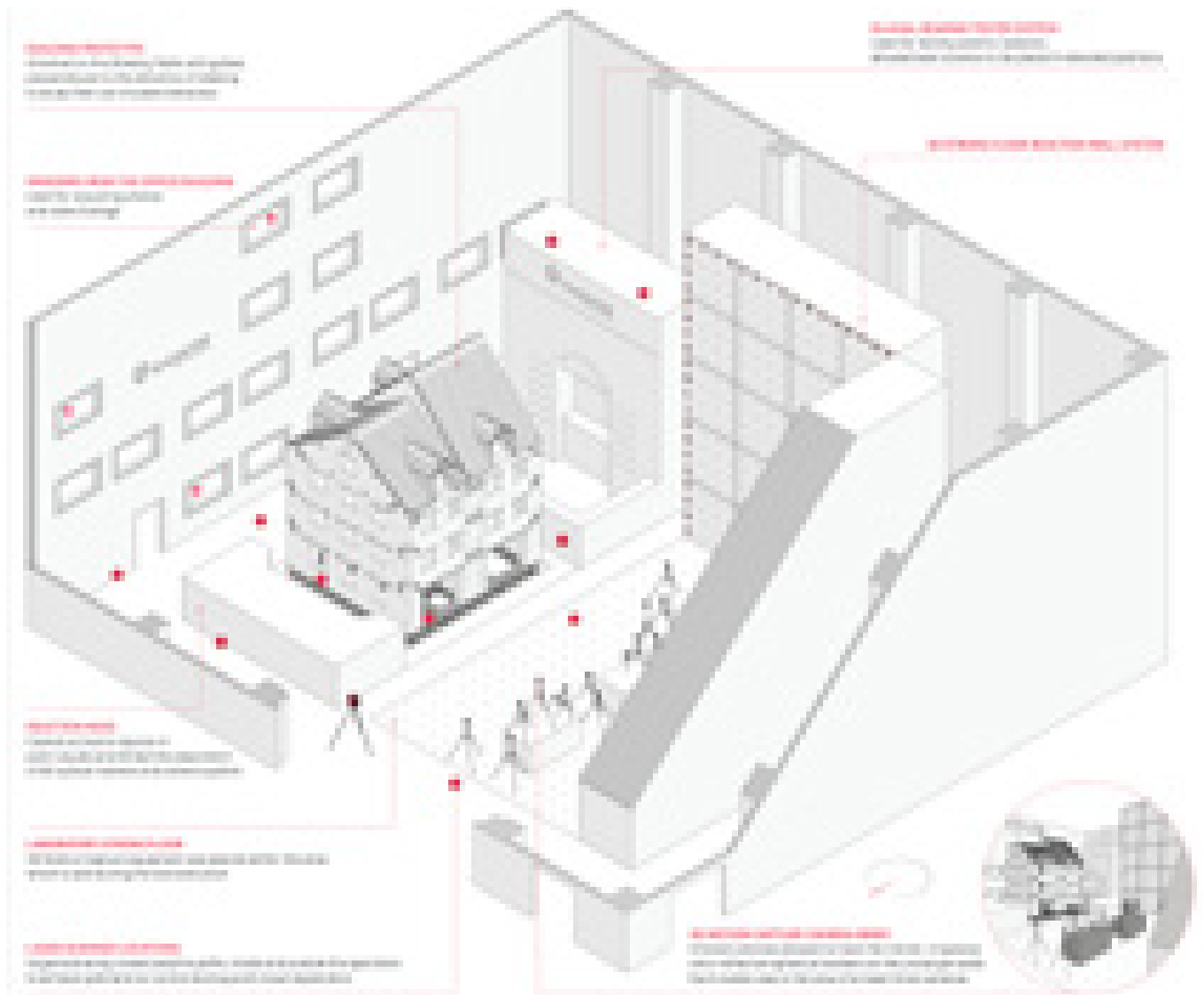
Ad integrazione del monitoraggio dinamico, è stata sperimentata l'applicazione di *3D Optical Markers*²², distribuiti su 3 fronti esterni secondo una griglia regolare e monitorati da camere combinate per conseguire una più distribuita e diffusa mappatura del comportamento meccanico dei paramenti²³. L'accuratezza delle posizioni misurate è stata relazionata ai parametri registrati dalle telecamere, quali risoluzione del sensore, frequenza di fotogrammi, distanza, angoli di triangolazione, illuminazione generale, integrità superficiale dei *marker*, riflettanza di superfici di incidenza simili. Nella configurazione ottimale di tali caratteristiche, l'accuratezza complessiva nelle misurazioni dei *marker* è stata stimata in 0,01-0,1 mm in termini di errore RMS (Root Mean Square, "valore quadratico medio").

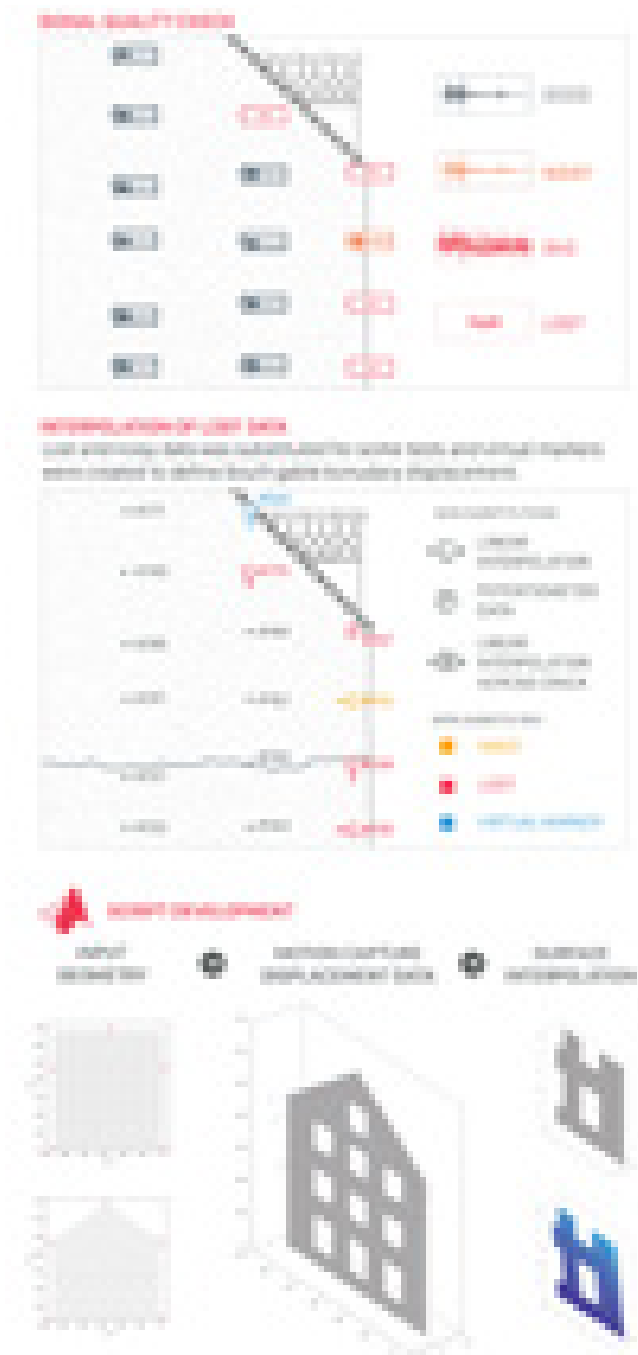
(6.79) Set strumentali e tipologie di dato ottenute dall'applicazione di sistemi di documentazione e monitoraggio multi-sensoriale durante la sperimentazione di test sismici. In particolare è possibile distinguere tra gli strumenti di misura durante i test dinamici, con raccolta di dati in modalità di 'segnale di frequenza', e strumenti di misura statica, con dati restituiti in forma di 'coordinate spaziali'.





Sopra (6.80) 3D Optical Markers applicati per il monitoraggio degli spostamenti delle superfici esterne durante i test di oscillazione dinamica. Sotto (6.81) Allestimento del laboratorio di EUCENTRE per le simulazioni dinamiche e le riprese di monitoraggio del prototipo strutturale. E' visibile l'organizzazione delle postazioni di ripresa delle camere ottiche e delle scansioni condotte con laser scanner (punti rossi).





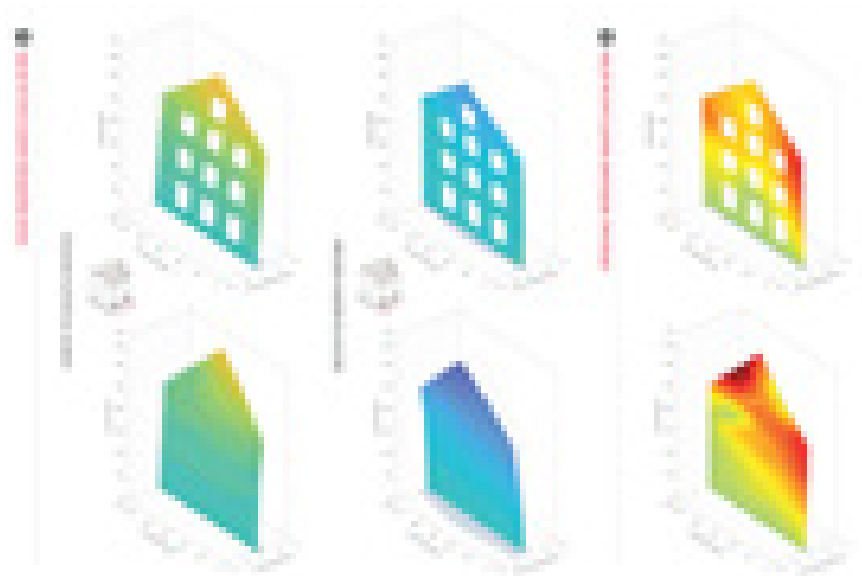
(6.82) Dati di spostamento ottenuti dalle frequenze di segnale misurate da potenziometri e marker ottici 3D. I segnali hanno presentato fattori di rumori dovuti all'angolo di ripresa delle camere ed a condizioni di disturbo dell'ambiente di ripresa. Tramite script di interpolazione dei dati, sono state ricostruite mesh semplificate dei quadri di spostamento (6.83).

Per ogni *run*, è stata creata una mappa dei segnali del sistema *3D Motion Capture*, tracciando le storie temporali di ciascun marcatore e rappresentando graficamente gli *input* registrati come sovrapposizioni su mappe ottenute da sondaggi statici. I segnali posizionali sono stati distinti in *set* temporali, a loro volta classificati tra dati validi, dati parzialmente persi o troppo rumorosi per risultare significativi, o *set* caratterizzati da valori di risposta di picco validi ma spostamenti residui troppo rumorosi per la valutazione. I dati posizionali presentanti un buon rapporto di segnale-rumore (SNR), attraverso il picco e la risposta residua di spostamento, sono stati usati per derivare una griglia *mesh* a parametri UV calcolata analiticamente, sulla base della quale è stato supportato il controllo inter-strumentale comparando sia i dati direttamente rilevati che quelli interpolati dalla *mesh*.

Una volta convertiti tutti gli *input* in un formato di referenziazione metrica e spaziale, la fase di certificazione ha previsto una comparazione tra i valori deviazionali presentati dai potenziometri, dal rilievo LiDAR e dai *3D Optical Markers*. Complessivamente, gli spostamenti morfo-metrici misurati da laser scanner hanno mostrato una deviazione dai dati del potenziometro lungo l'altezza dell'edificio contenuta a 0,1 mm fino a 4 m di altezza ed entro 0,3 mm dai 5,5 m di altezza alla sommità dell'edificio. Tale osservazione è stata ricondotta, oltre ai livelli di accuratezza strumentale, anche alla variazione di densità nelle nuvole di punti LiDAR nelle porzioni superiori dei fronti, causata della distanza incrementata in quota rispetto alla stazione di scansione. Parallelamente, i marcatori ottici 3D hanno registrato la stessa tendenza crescente di deviazione dello spostamento residuo lungo l'altezza della facciata rispetto ai dati da laser scanner, ma con intervalli di variazione maggiore in accordo all'amplificata rumorosità di segnale riscontrata.

I controlli condotti hanno certificato la corrispondenza dei dati morfo-metrici acquisiti rispetto ai segnalatori ad alta precisione, confermando la validità del metodo di documentazione applicato ad integrazione dei set di sensori predisposti. Il protocollo di documentazione digitale ha così definito un supporto ad alta implementazione della densità di informazione meccanica distribuita sulle superfici strutturali, tale da garantire un metodo alternativo di efficienza del monitoraggio.

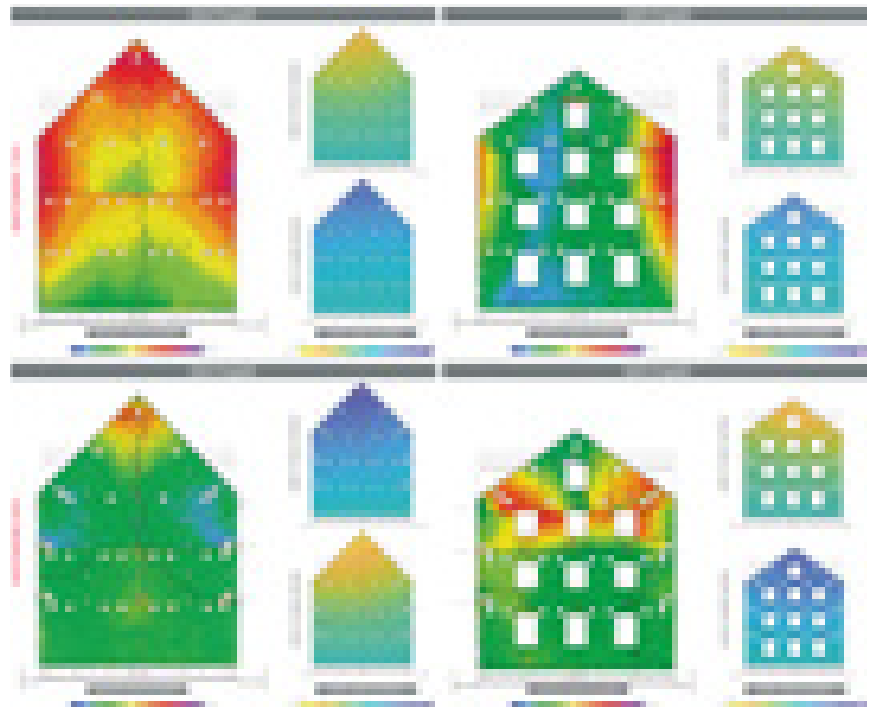
(6.84) Confronto della corrispondenza tra gli spostamenti misurati da 3D Optical Markers, potenziometri, e laser scanner (valutati per intorni circolari di dato filtrato in corrispondenza dei marker). Negli ultimi due la differenza massima è di 0.7 mm.



Sopra (6.85) Mesh di interpolazione calcolate a partire dai dati dinamici di oscillazione, con la sintesi di mappature delle aree maggiormente sollecitate.

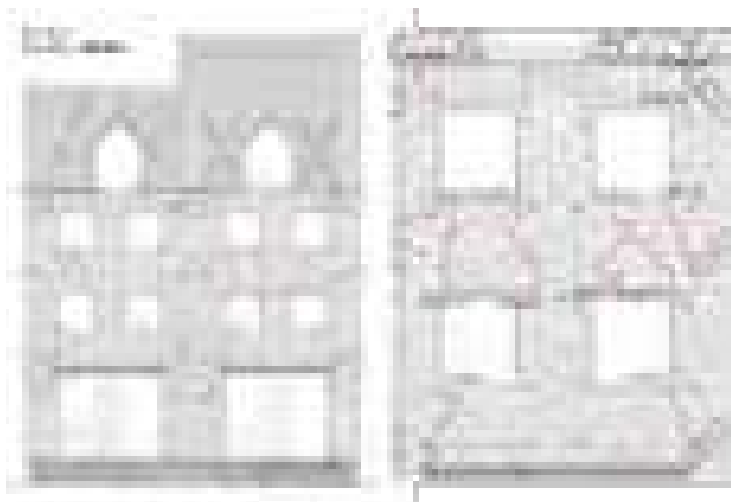
Sotto (6.86) Confronto tra i dati di spostamento calcolati dalla nuvola di punti morfo-metrica (dataset di 3 scansioni triangolate) e le mesh di sollecitazione dinamica durante i test.

Lo studio dei meccanismi di deformazione e danno è stato condotto con una comparazione tra i diversi dati visualizzata nella modalità di mappe colorimetriche.

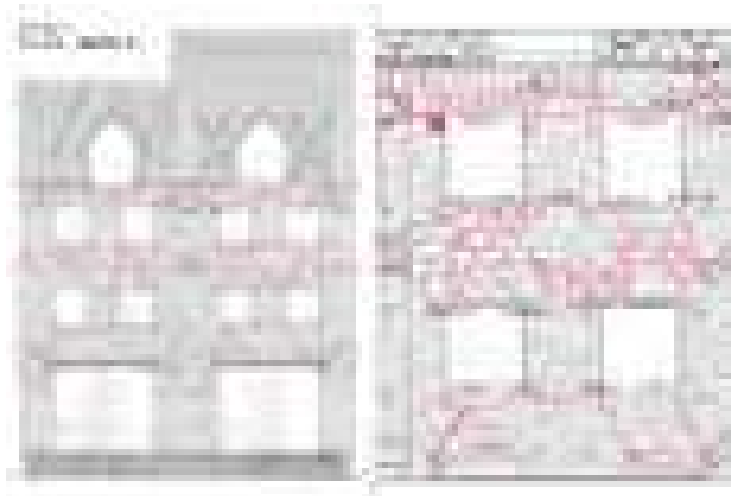


La mappatura dei quadri di fessurazione ha rappresentato un importante supporto nella documentazione diagnostica, identificando faglie di lesione dipendenti dai meccanismi di spostamento e deformazione. Tali quadri di insieme, localizzati sulle specifici dei fronti e vettorializzati su CAD a partire dalle mappe realizzate in sito durante gli intervalli tra le prove, sono stati confrontati con le letture successive dai modelli, verificandone la corrispondenza. Ciascuna fessurazione è stata catalogata con un codice alfa-numerico, corrispondente al fronte di collocazione, al run di sviluppo ed al numero identificativo (6.87). E' stata inoltre prevista una suddivisione per layer; per ogni run, tramite la quale è possibile risalire all'estensione di ogni crack durante il test.

La lettura complessiva fornita permette di valutare qualitativamente, dall'immagine, e quantitativamente, dalle polilinee vettoriali, lo stadio di evoluzione del danno. (6.88-6.89)

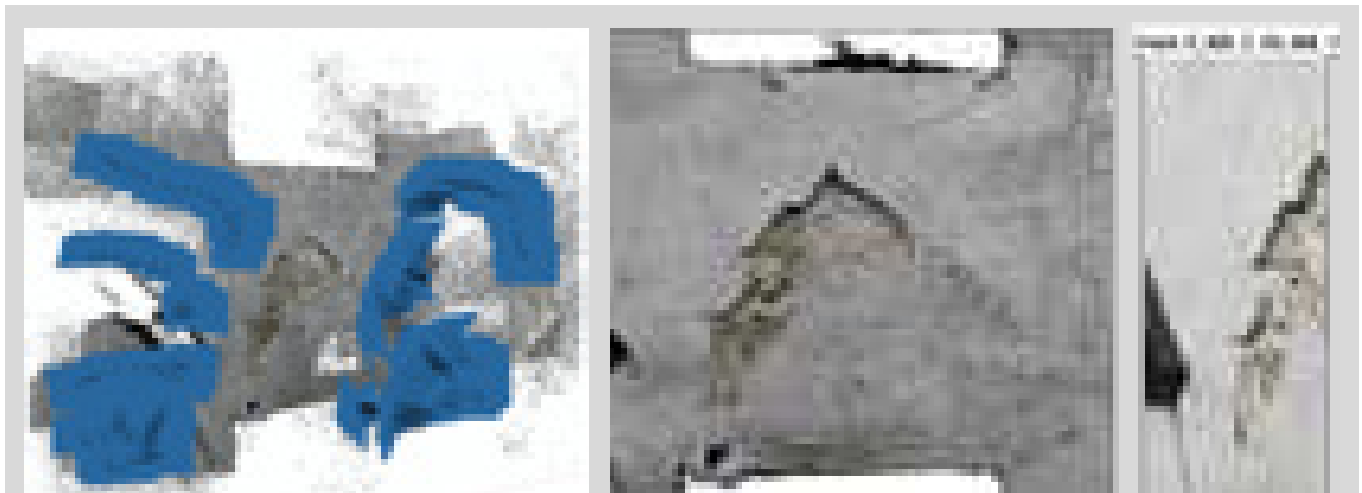


(6.90) Criticità di danno 1 _ Bielle compresse delle aperture. Una delle estensioni maggiori di danno è stata riscontrata in corrispondenza dei tamponamenti interpiano delle aperture. Le aree, soggette al comportamento di bielle compresse, hanno subito fessurazioni estese e frequenti distacchi.



(6.91) Criticità di danno 2 _ Martellamento della copertura. Altro danno diffuso ha riguardato le aree in corrispondenza degli appoggi di travi dei solai e della copertura. Le fasce murarie sono state soggette a fenomeno di martellamento, con fessurazioni esterne estese e localizzati distacchi.

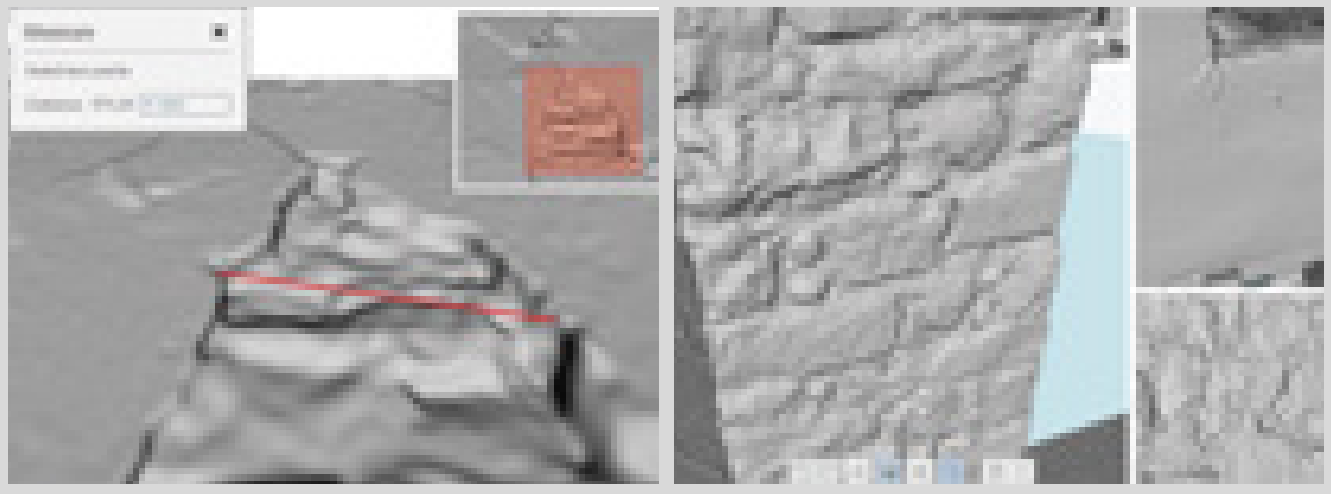
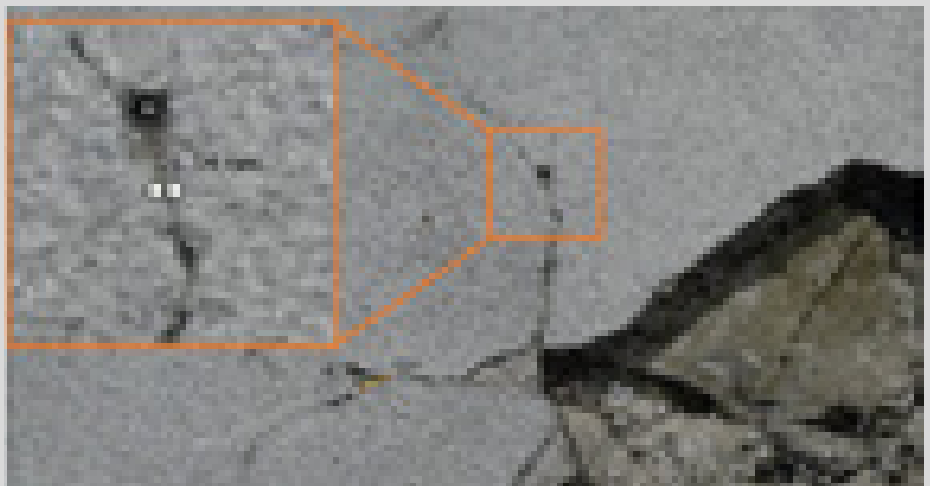




Le lesioni di fessurazione hanno previsto anche una dedicata campagna di ripresa fotogrammetrica, concentrata su ciascuna porzione durante l'evoluzione del quadro di danno strutturale.

Ciascuna lesione ha previsto un set di ripresa Structure from Motion (6.92) per la ricostruzione di nuvole di punti ad alta densità (6.93) archiviate in corrispondenza di ogni crack (6.94) e dell'archivio da laser scanner.

Il dettaglio morfo-metrico raggiunto ha permesso la lettura dimensionale di ciascuna faglia di frattura (6.95), trasponendola anche nella triangolazione dei singoli dataset in modelli poligonali mesh di aree locali (6.96).

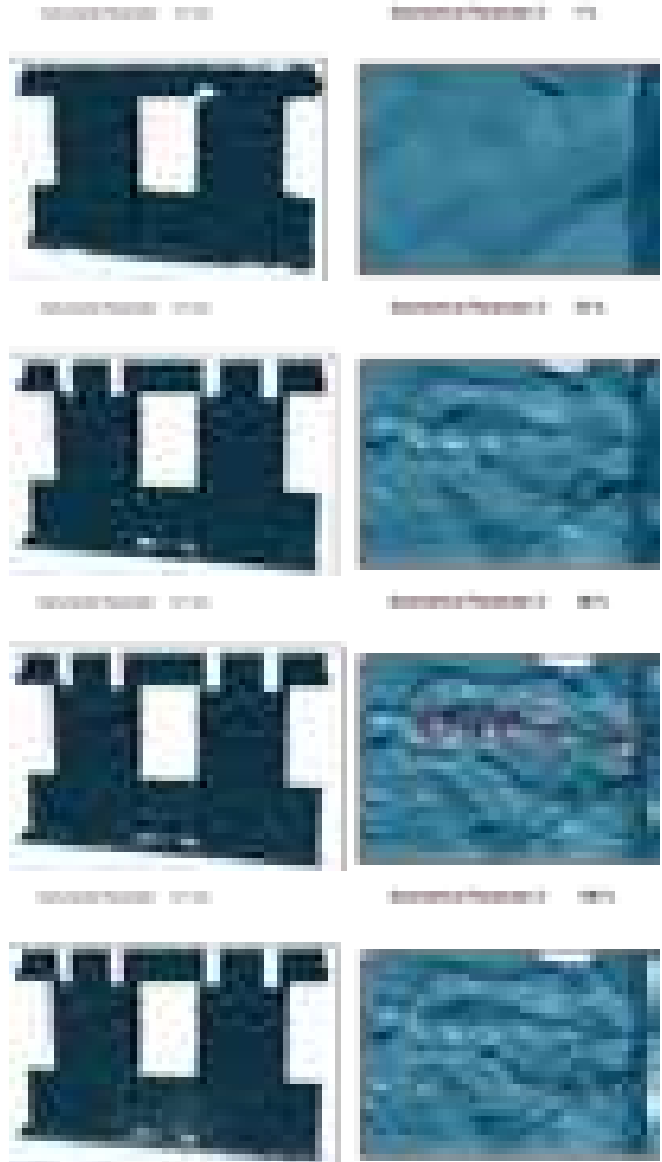


6.3. LA MODELLAZIONE REALITY-BASED OTTIMIZZATA PER LA DIAGNOSTICA STRUTTURALE: CRITICITÀ ED ESIGENZE DI CERTIFICAZIONE A SUPPORTO DELLA STRATEGIA METODOLOGICA.

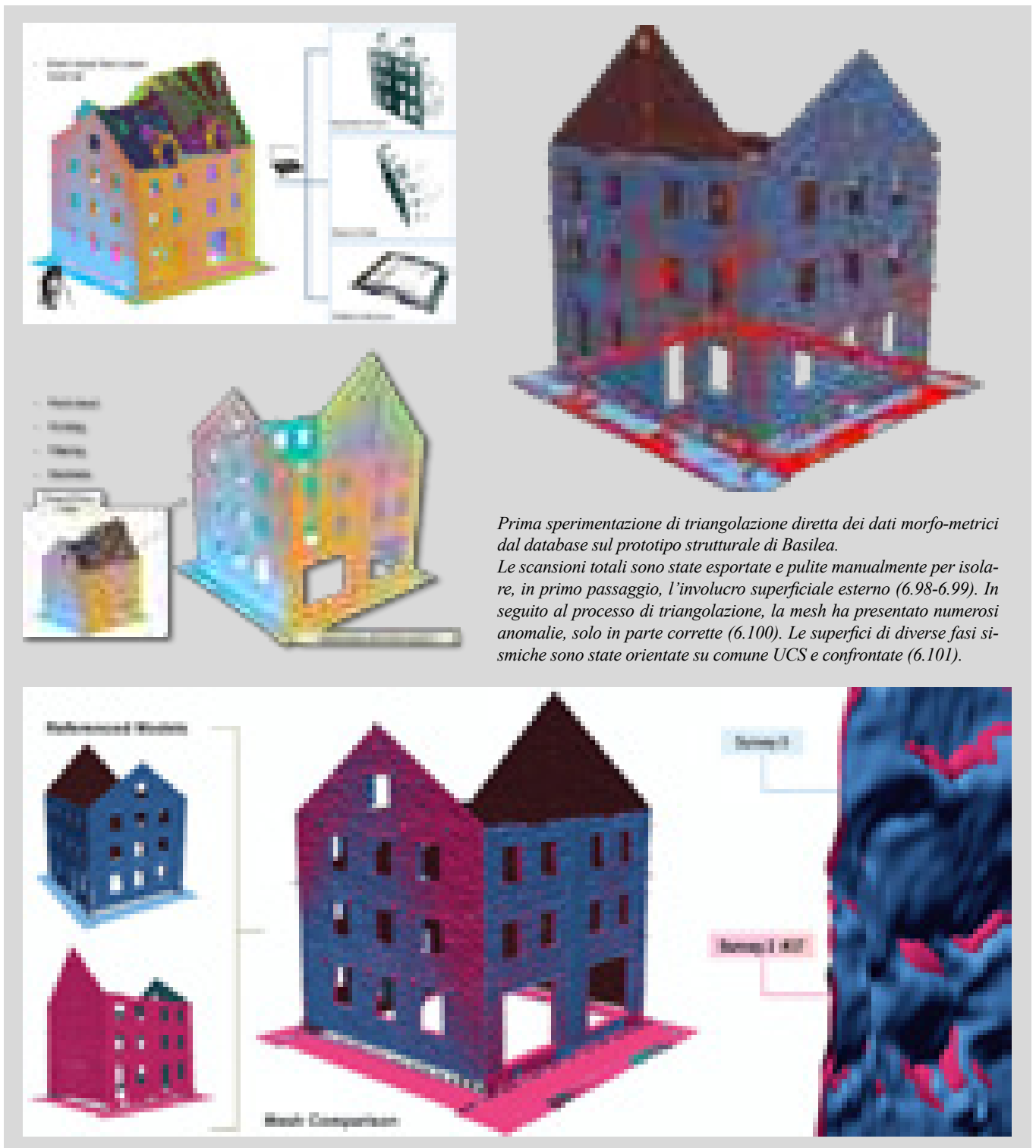
Il conseguimento delle letture derivate dal *database* morfo-metrico digitale sul prototipo di Basilea, fondamentale risultato di conferma della qualità e funzionalità del rilievo architettonico applicato agli apparati strutturali, evidenzia la potenzialità di elaborazione dei suoi dati in virtù delle specifiche proprietà tridimensionali, rispetto alle relazioni 2D restituite dai segnalatori statici e dinamici. Il tentativo di conservare la qualità morfologica restituita dal rilievo, senza riparare nella ricostruzione di sistemi geometrici semplificati e privati della ricchezza informativa di dettaglio, indirizza verso la linea di ricerca della modellazione *Reality-based*, sviluppata per componenti *mesh*.

La stessa richiesta di interrogazione quantitativa dei dati spaziali, in termini analitico-vettoriali, illustra il differente metodo di estrazione numerica tra i *database* discontinui ed i modelli triangolati continui. Mentre il secondo caso rispecchia effettivamente il criterio di confronto tra elementi 3D a *vertex* e *edges* interagenti come *unicum*, la comparazione tra *point clouds* come elementi separati è affidata necessariamente ad algoritmi temporanei di virtualizzazione con domini complanari, senza essere adeguatamente processati da opportuni filtri. Questi processi, criticamente applicabili nel caso di grandi moli di dati, generano modelli *cache* come temporaneo supporto di calcolo, con quantificazioni errate alle scale sensibili e senza essere preservati alla fine del processo per permettere adeguate correzioni di deriva²⁴.

Lo sviluppo di *software* sempre più sofisticati di *Reverse Modelling* ha comportato l'adozione nella pratica della modellazione di piattaforme e pannelli di controllo semplificati per *tools*, legati alla gestione dei dati densi fino ai processi di triangolazione e cura delle superfici finali. Tali pratiche hanno incoraggiato il diffondersi dell'uso di modelli poligonali, sia *high* che *low-poly*, facilmente derivati dai dati di acquisizione ed applicati per la divulgazione del Cultural Heritage o per ambientazioni virtuali immersive, dove la componente RGB è spesso inclusa a soddisfare, a finalità visuale, l'approssimazione locale della forma. Tali opportunità rischiano però di ingannare metodologicamente sulla conservazione dell'accuratezza nel dettaglio meccanico, richiamando opportune valutazioni sulle procedure di triangolazione e



(6.97) Gradi di decimazione applicabili nel processo di triangolazione dei dati morfo-metrici discontinui in un modello *mesh reality-based*. Riducendo la qualità geometrica, è possibile ottenere superfici molto semplificate ma prive di criticità superficiali. All'aumentare del grado di dettaglio morfologico, e quindi di densità di triangolazione, richiesto, il pattern superficiale diventa sempre più aderente alla realtà materica della struttura, ma genera anche la comparsa di alterazioni della *mesh*.



Prima sperimentazione di triangolazione diretta dei dati morfo-metrici dal database sul prototipo strutturale di Basilea.

Le scansioni totali sono state esportate e pulite manualmente per isolare, in primo passaggio, l'involucro superficiale esterno (6.98-6.99). In seguito al processo di triangolazione, la mesh ha presentato numerosi anomalie, solo in parte corrette (6.100). Le superfici di diverse fasi sismiche sono state orientate su comune UCS e confrontate (6.101).



(6.102) Evidente disallineamento delle mesh in corrispondenza della piattaforma indeformata.

continuità dei dati rispetto alle pratiche automatizzate di *wizard systems*. La ricchezza di risultato formale calibrabile con algoritmi specifici è sempre più comunemente sostituita da parametri sintetici di valutazione qualitativa sulla morfologia della superficie *mesh*, spesso decimando o alterando all'interno dei processi i dettagli formali meno densi dell'apparato discontinuo.

La valutazione dei gradi di approssimazione applicabili su *mesh* per finalità strutturali rappresenta un parametro dalla complessa standardizzazione, legato alla specificità del contesto di modellazione. In mancanza di approfonditi controlli multi-sorgente capaci di orientare l'accuratezza del rilievo oltre la sola lettura del dato strumentale (quale il caso della sperimentazione congiunta con EUCENTRE), il rischio maggiore è di destinare un eccessivo grado di affidabilità alla risoluzione del *database* morfo-metrico conseguito, senza in realtà disporre di controllo sull'effettiva discretizzazione che avviene nel suo passaggio a modello. Una prima sperimentazione di modellazione *mesh* è stata

condotta sui *database* del prototipo edilizio di Basilea applicando una sequenza *standard* di gestione, filtraggio e triangolazione dei dati spaziali.

Nonostante la verifica di certificazione dell'allineamento operata sul *database* discontinuo tra le differenti fasi sismiche (confermata alla sensibilità millimetrica), le superfici *mesh* ottenute con procedure di triangolazione automatizzata dei dati hanno evidenziato dei disallineamenti di dispersione del dato estesi fino all'intorno di 2mm, compromettenti in tal modo l'affidabilità di lettura degli specifici meccanismi locali.

Tale disallineamento, riscontrato nel *mesh model* ma non nella *point cloud* delle medesime fasi sismiche (ulteriormente rivedicate a seguito della criticità), ha innescato un principio di revisione dei processi e parametri di settaggio assegnati nel passaggio dalla nuvola di punti alla superficie poligonale, re-orientandoli su *check* intermedi di controllo sia della qualità di allineamento del dato sparso che della coerenza di orientamento di poligoni e macro-geometrie nel modello.²⁵

6.3.1. Ottimizzazione, triangolazione e rigenerazione per il conseguimento della mesh

Il passaggio dei dati spaziali su piattaforme di modellazione è avviato attraverso una serie di azioni di *import*, che riformulano in modalità di *script* (come la conversione ASCII) le informazioni tra i due ambienti morfologici (per *point clouds* e *mesh*), coerenti ma di programmazione differente. In tale ottica, il riassetto incontrollato di coordinate posizionali x,y,z, come la variazione di impostazioni di precisione (*float* o eventualmente *double*) e caratteristiche di *vertex*, condiziona una critica alterazione nella referenziazione dei dati, influenzante sia i punti sparsi alla base che il successivo sviluppo della superficie continua. A questo presupposto, si vanno aggiungendo ulteriori considerazioni legate alla triangolazione dei punti ed alle griglie di ordine e suddivisione che regolano le superfici 3D, influenzanti sia la gestione della maglia stessa che la compatibilità del modello finale per dimensione *byte* e dinamicità di visualizzazione.

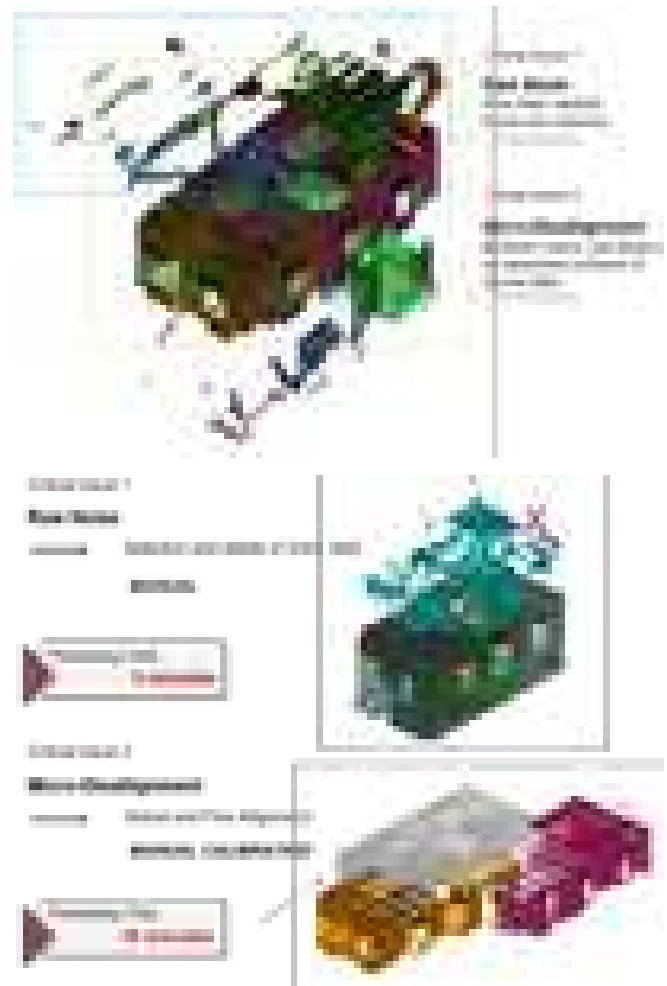
A tal fine, la strategia di controllo ed ottimizzazione delle *mesh* strutturali 3D da modellazione *reality-based* è stata sperimentata con un percorso di calibrazione a doppia sequenza di azioni: 'Azioni sulla *point cloud*', con processi di filtraggio e gestione dei dati di origine, ed 'Azioni sulla *mesh*', nel controllo di parametri e poligoni per il conseguimento di una morfologia aderente alla realtà fisica.

Azioni sulla Point Cloud

Finalizzate a ristabilire l'accuratezza di allineamento dei settori di dati spaziali, oltre a definire il target della modellazione con una tipologia media di qualità superficiale oggetto della triangolazione.

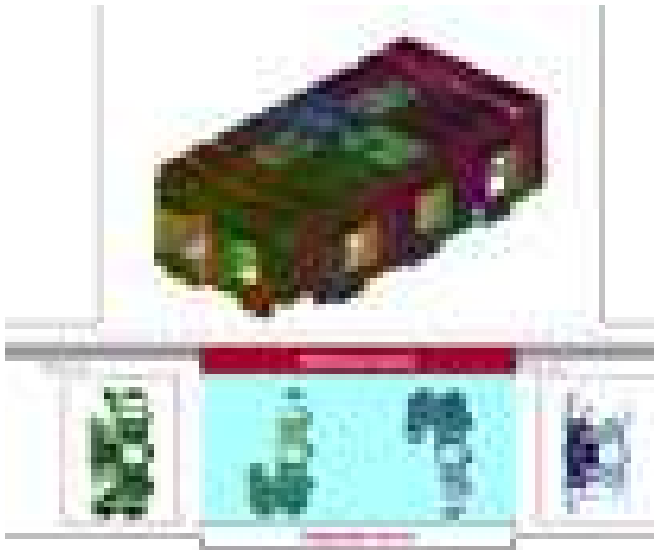
- *Point Cloud Fencing (manual)*: isolamento dei dati morfo-metrici soggetti al processo di modellazione. L'identificazione del sistema strutturale all'interno della *point cloud* complessiva ha comportato la rimozione manuale dei punti criticamente interpretati come *raw noise*, ovvero superfici frammentate da coni di acquisizione o altre aree (come il contesto di ripresa) non interessate dagli obiettivi di analisi, che disperderebbero la calibrazione degli algoritmi di triangolazione in quanto aree anomale di distribuzione dei dati.

- *Global and Fine Alignment (semi-automatic)*: a supporto del micro-disallineamento tra set di dati, interpretati come discreti, è stata operata un'ulteriore ottimizzazione dell'allineamento delle scansioni. Tale fase ha permesso di iterare la deviazione presente tra i *scansets*, prima eseguendo una pulizia manuale dei punti criticamente interpretati come *raw noise*, ovvero superfici frammentate da coni di acquisizione o altre



La seconda sperimentazione di modellazione *reality-based* si è concentrata su una più mirata calibrazione dei passaggi e dei parametri di gestione dalla nuvola di punti al modello.

(6.103) Selezione delle unità spaziali per la procedura di allineamento ottimizzato, classificazione e rimozione manuale dei dati frammentati esterni all'unità, non necessari alla referenziazione di dettaglio e costanti fattore di dispersione per gli algoritmi di calcolo.



(6.104) Selezione delle scansioni di 'contenimento' (delimitanti la cellula strutturale e con maggior affidabilità di ripresa) come dataset di riferimento, e (6.105) affinamento del processo di allineamento con Global and Fine Alignment (deviazione a 6 sigma); (6.106) unione dei dati.



aree non interessate dagli obiettivi di analisi (come il contesto di ripresa), in modo da concentrare la calibrazione degli algoritmi di triangolazione evitando dispersioni su aree anomale di distribuzione dei dati. Successivamente sulla porzione formale conservata (*over-noised cloud*) è stato eseguito un allineamento di dettaglio calibrato sulle micro-morfologie della tessitura superficiale. L'allineamento è stato calibrato su una percentuale di 50%-100% *sampling* dei punti, comprendente una adeguata densità di valutazione anche su scorci di ripresa, e una deviazione massima accettata di ordine strumentale, in tal caso 0,7 mm. Le scansioni di riferimento sono state selezionate considerando la distribuzione 3D dal dato discontinuo e una geometria di controllo globale. In particolare, in caso di morfologia scatolare, le migliori prestazioni sono state garantite dalle scansioni in corrispondenza degli angoli, con dati di coordinate x,y,z distribuiti su allineamento multiplo ed un controllo più omogeneo della distribuzione spaziale di riferimento. Il numero massimo di iterazioni è stato stimato almeno 9 volte il numero dei *dataset* di allineamento, così da garantire almeno una valutazione algoritmica distinta per ogni coordinata spaziale (posizionale ed angolare). Tali accorgimenti hanno soddisfatto le richieste di allineamento, presentando un valore $\pm 6\sigma$ pari a 100%²⁶.

- *Scans Combining (automatic)*: la combinazione dei dati di singola scansione in un unico *dataset* ha permesso un primo processo implicito di filtraggio con l'eliminazione delle regioni di punti sovrapposte da scansioni multiple, contribuendo sia all'ottimizzazione dell'allineamento che all'omogeneizzazione della distribuzione e qualità di dato spaziale.
- *Filtering Noise and Smoothing (automatic)*: filtraggio automatico sul dato disperso nell'intorno del dominio discreto, e liscio del bordo del dominio. Il valore di conteggio massimo dei vertici ha influito sul riconoscimento automatico dei *cluster* per il filtraggio, ed è stato quindi valutato a 1.000 considerando l'obiettivo di un involuppo continuo (privo di micro-porzioni disperse) del dato distribuito sulla superficie strutturale. L'intensità di liscio è stata controllata attraverso il parametro di massima

deviazione consentita, impostata sulla tolleranza di dettaglio del modello, in tal caso 1 mm.

- *Masonry surfaces target (manual)*: il dato morfometrico è stato pulito manualmente dalle macro-porzioni di punti non appartenenti all'involuppo del sistema strutturale interessato dall'analisi meccanica, quali solai, strutture lignee, travature metalliche, cablaggi e supporti ai sistemi di misurazione collocati negli ambienti e sulle superfici del prototipo. Tali porzioni si configurano come condizioni di *noise* nei confronti delle necessarie analisi morfologiche, decentrando il riconoscimento dell'involuppo superficiale dal *target* di modellazione del sistema strutturale.

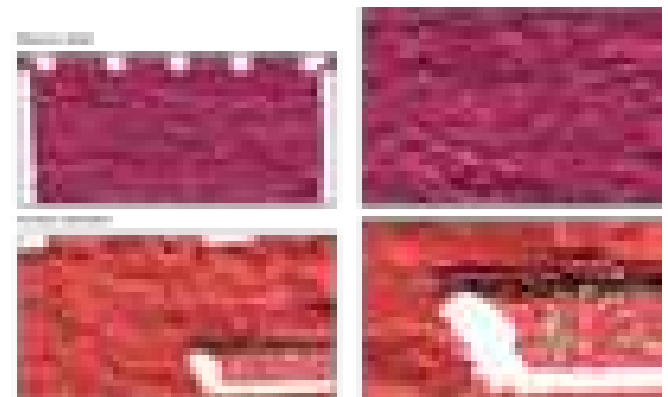
Sviluppo della continuità geometrica: *Mesh Surface Generation*.

- *Mesh Triangulation*: il processo di *meshing* è stato calibrato in funzione di due obiettivi tipologici del prodotto desiderato, la conservazione della morfologia di dettaglio 3D (di ricostruzione spaziale e non proiettata su piani o sfere virtuali) e la continuità tipologica (prediligendo la ricerca di relazioni di continuità tra *vertex* e *edges* di tessitura). Nella valutazione di profili semi-automatici, è stata adottata una modalità di *3D Adaptive Triangulation*, riproponendo il valore di sensibilità dello scanner di 0,7 mm e settando le variabili percentuali di accuratezza geometrica per la preservazione del dettaglio di tessitura muraria, in tal caso valutato a 66% considerando la lavorazione lapidea a vista. La specifica conformazione del prototipo di studio ha generato lacune e criticità di deformazione sulla superficie poligonale, sia nella maglia che nel profilo di *boundary*. Tale fenomeno si è verificato in corrispondenza di porzioni di dato assente, oscurato da profili fissi o rimosso per cablaggi e strumenti di misurazione affissi alle superfici murarie, come potenziometri e sonde. Per lo stesso motivo, non è stato possibile procedere in questa fase applicando un profilo *HD Triangulation*, per superfici prive di interruzioni e direttamente "a tenuta stagna", senza lo svilupparsi di soluzioni anomale di curvatura in corrispondenza dei confini di dominio di dato.

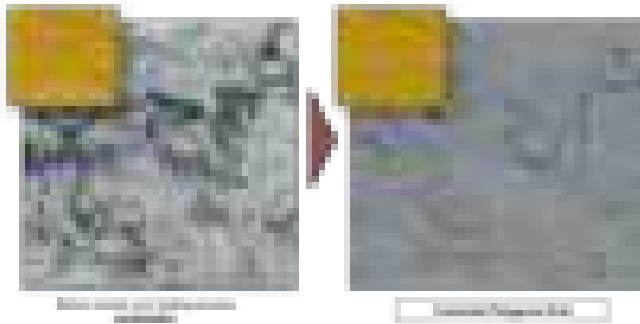


(6.107) Pulizia manuale dei dati morfo-metrici corrispondenti agli apparati non strutturali, costituenti fattore di rumore rispetto alla superficie muraria di *target* dell'analisi.

(6.108) Conseguimento delle superfici discrete finali dai dati originali acquisiti direttamente durante il rilievo.



(6.109) Criticità ed anomalie della mesh ottenute in corrispondenza delle diverse superfici materiche. Le porzioni in muratura hanno evidenziato *holes* diffuse ma dai poligoni ordinati, le porzioni ad alta riflessione del raggio laser, come travi e catene in acciaio, hanno presentato irregolari manipolazioni dei poligoni in soluzioni non strutturate.



(6.110) Fase di remesh della maglia poligonale, dalla configurazione di poligoni triangolata alla revisione ordinata della loro disposizione, mantenendo fattore di semplificazione nullo (1).



‘Azioni sulla Mesh’

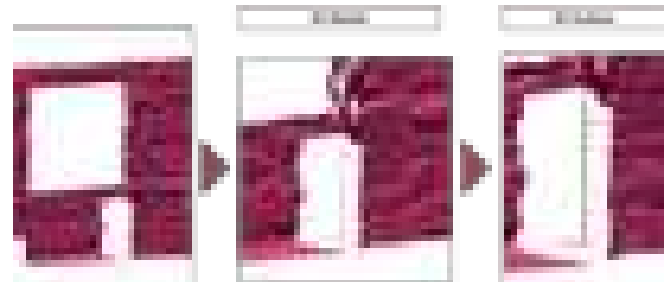
- *Healing (automatic)*: il dato continuo della triangolazione è stato sottoposto ad un processo di correzione delle irregolarità poligonali, nella tipologia di *tunnels*, poligoni isolati, piegati, *non-manifold*, *clusters* ed auto-intersezioni. Per ciascuno di essi, considerata la densità millimetrica della *mesh* generata, i parametri di categorizzazione sono stati automatizzati senza comportare correzioni anomale (mentre nel caso di superfici *low-poly*, con dimensione di *edge* superiore ai 5 cm, il settaggio diviene necessario per evitare che la griglia stessa della *mesh* possa essere considerata come irregolarità).
- *Remesh (automatic)*: tale passaggio rappresenta il primo stadio di manipolazione della superficie *mesh* generata, con la finalità di regolarizzare la maglia poligonale derivata dalla diretta triangolazione dei dati. È stato eseguito un ricalcolo complessivo della superficie volto ad uniformare le dimensioni e la disposizione dei poligoni, con un parametro di impostazione relativo alla dimensione degli *edges*. In tal caso è stato conseguito un fattore di *sampling* pari a 1.00, verificando l'ordine di grandezza della lunghezza media di bordo (non superiore a 2 mm per garantire il dettaglio di lettura morfologica). In funzione del riordino della maglia di superficie, è stata comportata anche la correzione automatica di alcuni fenomeni di *holes*.
- *Filling Holes/Fix Geometry (manual)*: tale azione ha rappresentato il secondo stadio di manipolazione della superficie *mesh*, con l'obiettivo di completamento delle porzioni di dato mancante e loro riconduzione alla geometria strutturale. L'accuratezza ricercata nel processo ha esteso le tempistiche, ricostruendo una continuità globale di dato nell'involuppo superficiale.

Casi di *bullet holes* (6.111) e *shield holes* (6.112) risolti con sistemi automatici o semi-automatici di riempimento dei fori. Nel caso degli *shield holes*, il tool semi automatico ha permesso di generare ponti di supporto tra le faglie della *hole*, facilitando l'interpolazione della curvatura.

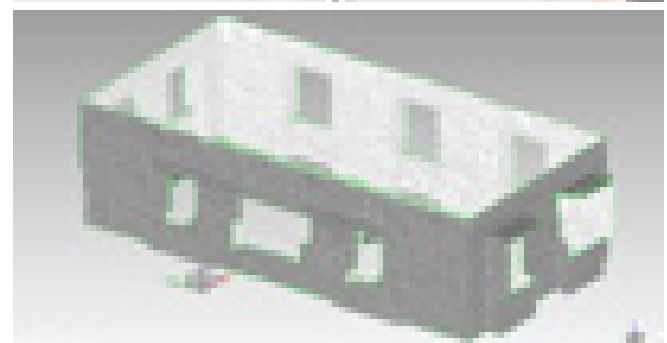
Le porzioni di lacuna sono state classificate secondo 3 tipologie, definite sulla base dell'estensione degli *holes*, delle caratteristiche poligonali al contorno e della complessità formale di correzione coinvolta: i *bullet holes*, micro-coni di ombra strumentale dovuti alle caratteristiche formali della stessa tessitura muraria o a rumore di dato pervenuto in fase di triangolazione; i *corner holes*, relativi a più ampi coni di ombra per tagli geometrici della disposizione strutturale stessa; infine gli *shield holes*, per oscuramento dovuto ad elementi terzi tecnologici o costruttivi, o ancora impianti di misurazione e cablaggio.

A priori della chiusura delle lacune, per garantirne l'efficacia di computazione dell'orientamento al contorno, sono stati eseguiti dei processi di lisciatura delle *mesh*, riducendo le anomalie topologiche di bordo presenti. Nei primi due casi, l'integrazione è stata condotta con supporto semi automatico di *tools* predisposti per la correzione della maglia poligonale, creando ponti di suddivisione e mediando la curvatura di ricostruzione dalle informazioni a contorno. Il caso degli *shield holes* invece ha implicato un'azione più complessa di *3D Sketching* geometrico a supporto della modellazione *mesh*, riconducendo attraverso assi vettoriali e piani di riferimento interpolati alla ricostruzione di patch UV per delimitare profili ed *edge* della macro-morfologia strutturale, successivamente integrati all'involuppo *mesh* con operazioni di conversione poligonale e *fitting holes*.

- *Rewrap (automatic)*: l'ultimo processo di rigenerazione della maglia *mesh* è stato finalizzato all'omogeneizzazione della distribuzione e conformazione poligonale alla fine delle operazioni di gestione ed integrazione del dato, ed a conseguire il carattere *watertight* complessivo, riunificando le porzioni in cui il modello globale era stato suddiviso per consentire una più agevole lavorazione. Il *Rewrap* è stato eseguito con fattore di *sampling* pari a 1.00, mantenendo al massimo il parametro scala di Accuratezza ed al minimo la Lisciatura. Particolare attenzione è stata dedicata al settaggio della curvatura di riferimento, mantenuta mediata nell'estensione al contorno e densificata in corrispondenza delle porzioni formalmente più accentuate.



(6.113) Correzione di casi di *corner holes*, attraverso estrazione dei piani di superficie e vettori fondamentali della geometria strutturale, e generazione di patch 'a filetto' come guida per la ricostruzione della corretta geometria progettuale.



6.3.2. Fattori di discontinuità e procedure di correzione, verso la qualità 'watertight'

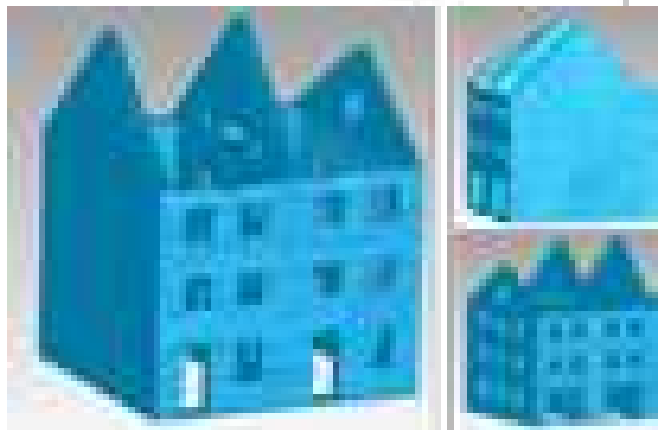
La ricostruzione delle lacune, operazione già complessivamente dispendiosa nei processi di gestione delle superfici triangolate, ha rappresentato in tal caso una fase caratteristica del metodo di modellazione in funzione delle condizioni di accuratezza assunte.

L'esteso intervento manuale di *editing* si è reso critico per le aree dove l'assenza di dato o la sua inferiore densità hanno privato il sistema di riferimenti spaziali di interpolazione della *mesh*, contraendone il *boundary* di contorno. È il caso degli *shield holes* e dei *corner holes*, spesso così ampi da compromettere lo stesso schema di geometrie fisse e da chiedere la ridefinizione degli allineamenti primari, affidandosi ai disegni di progetto o, direttamente e con maggior corrispondenza alla fabbrica reale, all'interpolazione delle superfici murarie di intersezione.

L'affidabilità delle operazioni di *Filling Holes* non ha potuto prescindere dall'estensione delle lacune in termini di parametri di curvatura: se le superfici intonacate, purché ridotte, hanno costituito zone planari di facile ripristino della curvatura corrispondente, l'estensione delle superfici di muratura a vista ha definito uno dei casi più complessi di orientamento angolare relativo dei poligoni locali, prevedibile in corrispondenza di texture paramentali dalla morfologia superficiale accentuata. Gli improvvisi cambi di curvatura sulla superficie o sullo spigolo sono interpretati analiticamente come dati di picco, o di valle, nel processo di mediazione locale per il *fitting*, ed hanno spesso rappresentato cause di alterazione sia nella diretta triangolazione "di chiusura" che nell'istituzione di *bridges* di supporto per il collegamento *inter-boundary*. Gli scenari prodotti dagli algoritmi di calcolo ad interpolazione sulle aree di connessione hanno inoltre evidenziato l'automatizzazione di anomalie poligonali come poligoni *non-manifold*, normali invertite, *crossing polygons* e porzioni sovrapposte.

A tal proposito, la gestione manuale sulla generazione delle *mesh* di chiusura è stata incrementata, proporzionalmente a dimensioni e localizzazioni delle aree, fornendo nuovi dati di controllo e forzando il dominio numerico delle superfici richieste, oltre ad identificare e correggere i contesti singolari secondo parametri limite.

I risultati di modellazione *mesh* concentrati sull'unità strutturale, ed impostati sui target di 'continuità' e



(6.114) Referenziazione di tutte le unità di modellazione nello stesso workflow e finalizzazione dei *corner holes* in corrispondenza dei profili interpiano e di sommità, fino alla definizione della *mesh* continua dell'intero involucro strutturale (6.115).

'risoluzione' delle superfici di involucro, hanno evidenziato così una criticità di gestione automatica dei dati in condizioni sia di alta che di limitata densità. La necessità di contenere le approssimazioni degli *edge* poligonali (altrimenti comportanti una relativa semplificazione delle irregolarità della maglia e, per causa diretta, dei processi di calcolo) rimane centrale, così da non sbilanciare la *mesh* verso una sintesi di astrazione della micro-morfologia locale tale da vanificare sia l'obiettivo di lettura formale dei

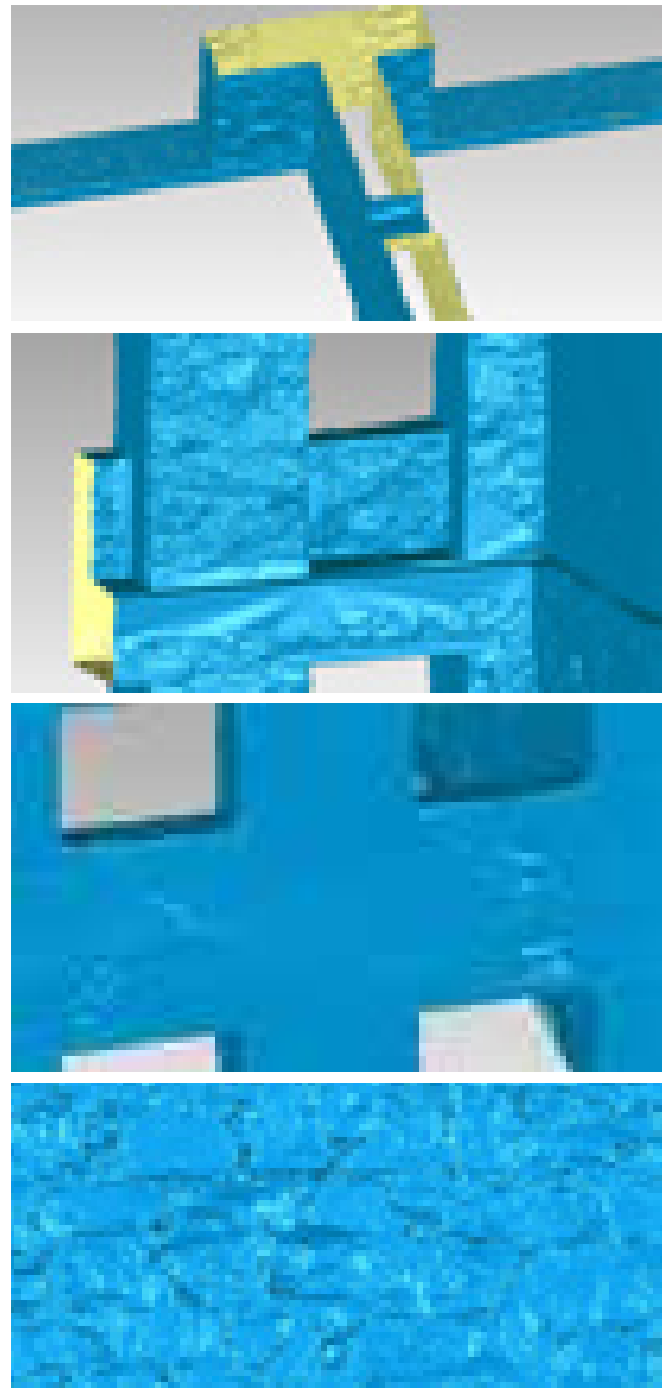
meccanismi che gli sforzi del processo particolareggiato di *reverse modelling*.

La risoluzione di tali criticità ha costituito una necessaria fase di modellazione propedeutica all'ultimo *step* metodologico, la referenziazione delle unità *mesh* suddivise per conseguire il sistema morfologico globale. Le singole superfici di involuppo, fino ad ora elaborate separatamente per un migliore controllo sia operativo che computativo, sono state unite in un unico *workset* (grazie all'orientamento congiunto dei dati di origine). L'interpolazione delle aree di connessione dello spessore murario, in tal caso necessariamente condotto in modalità manuale per limiti della documentazione, ha orientato il prodotto finale verso una qualità "*watertight*", "a tenuta stagna", intesa come integrazione dell'involuppo strutturale in tutte le sue componenti parziali fino a risaldare i *boundary* "tecnici" sui corrispondenti domini materici "reali". Il modello risultante, seppur ancora superficiale, risulta di completa potenzialità per l'interrogazione volumetrica.

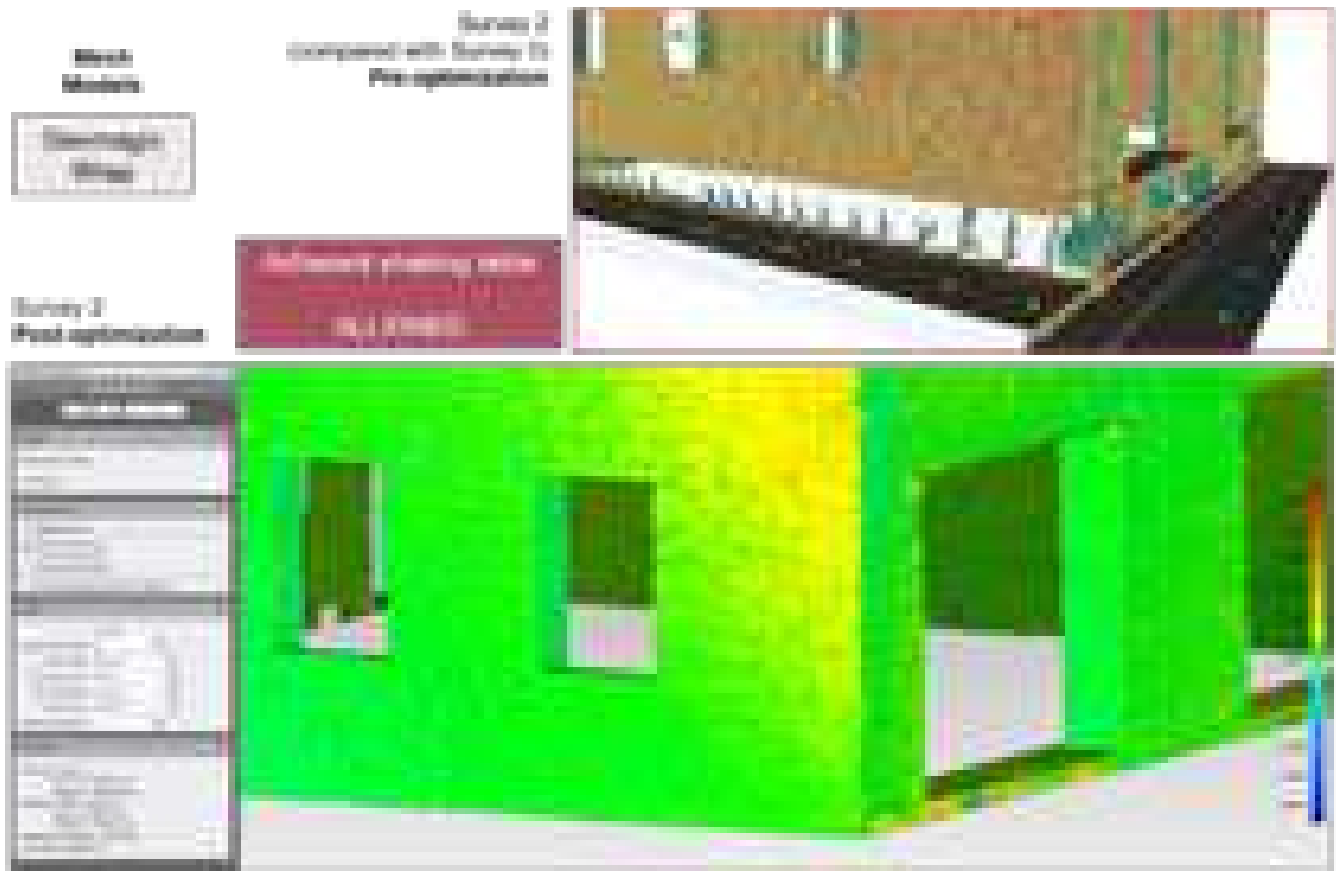
La strategia di modellazione consegue così il superamento della discontinuità della forma strutturale, per controllata rigenerazione, con il conseguimento di delimitazioni continue sia nell'interrogazione certificata di sezioni di deformazione che nell'isolamento di placche volumetriche 3D per quantificare i meccanismi locali. Tipologicamente, il prodotto è inoltre predisposto a triangolazioni solide tetraedriche, in spessore, compatibili con le piattaforme di analisi virtuale per elementi finiti.

6.3.3. Certificazione dei modelli e conseguimento dell'immagine diagnostica

A seguito del processo di modellazione ottimizzata, è stata eseguita una nuova comparazione tra i modelli delle singole fasi statiche. La referenziazione globale, coerente con quella certificata nel *database* discreto, è stata riscontrata dalla corrispondenza tra le strutture fisse della piattaforma vibrante, permettendo di procedere al confronto diretto dei modelli numerici 3D anche in corrispondenza delle superfici murarie. Le valutazioni di *Mesh Deviation* sono state condotte impostando il modello della Fase 0 come *Reference model* di comparazione, ed analizzando lo scostamento delle superfici generate nelle successive fasi, *Target models*. Per definire un'adeguata lettura meccanica, sono stati sperimentati intervalli di tolleranza dei valori da 5 a 1 mm sui quali calibrare



Qualità morfologiche della superficie strutturale mesh finale: (6.116) involuppo *watertight* del modello, (6.117) integrazione geometrica in corrispondenza dei profili geometrici, (6.118) conservazione del dettaglio di forma sulle lesioni e (6.119) sulla tessitura muraria di insieme.

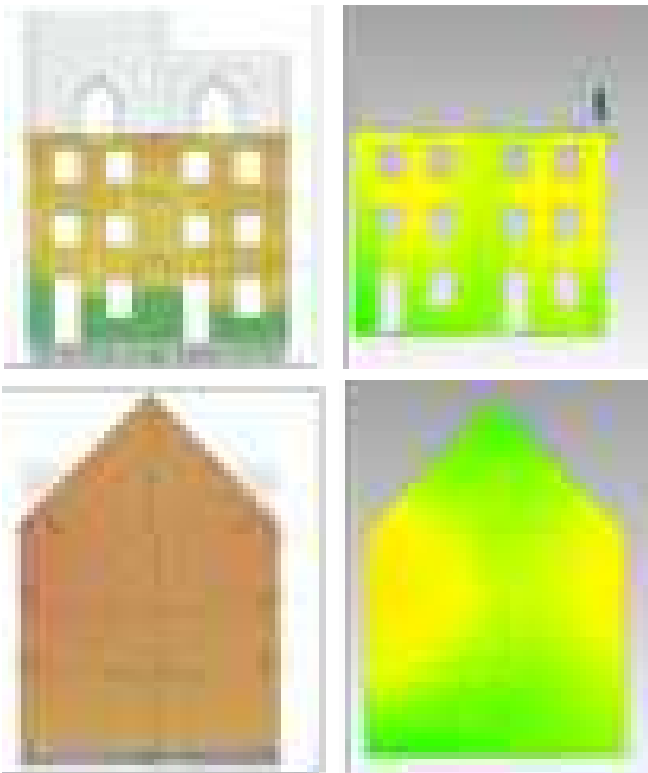


la *color map*. Anche in tal caso, rispetto alle *elevation map* estratte dalla nuvola di punti, il codice comunicativo è stato impostato su una scala colorimetrica, ma con un differente criterio legato alla 'deviazione' tra entità, non alla loro 'elevazione'. La *color map* ha evidenziato valori di aderenza o scostamento delle superfici numeriche dal modello di riferimento: il verde ha rappresentato le aree di tollerata aderenza, la scala del rosso la deformazione in oggetto, quella del blu lo spostamento verso l'interno.

Le analisi condotte hanno mostrato risultati coerenti con i sistemi di misurazione a segnale, ed una più logica identificazione dei meccanismi locali. Le pareti murarie hanno espresso fenomeni di ribaltamento con spostamenti fuori piano fino a 20 mm, concentrati nei setti di più critica sollecitazione, nei diaframmi tra maschi murari e nei fronti di testata. Con le azioni di *retrofit*, il quadro di danno si è al contempo ridotto e frammentato, ripristinando la configurazione deformativa iniziale ma incrementando il

Il processo di ottimizzazione adottato sulla seconda sperimentazione di modellazione mesh ha dimostrato una maggior corrispondenza di lettura quantitativa delle deformazioni plastiche rispetto ai primi modelli prodotti. (6.120) Le problematiche di deviazione alterata sono risultate risolte, garantendo un'aderenza di dato coerente tra le superfici strutturali, validata anche dalla corrispondenza nella porzione indeformabile della piattaforma vibrante.

quadro di danno delle porzioni instabili (tamponamenti dei vani di apertura e timpani soggetti a martellamento), con spostamenti da 2 a 15 mm. La lettura dell'involuppo totale tra esterno-interno, garantita dal modello *watertight*, ha permesso di identificare la corrispondenza dei meccanismi sugli interi setti murari, confermando il comportamento solidale dei blocchi o evidenziando la disgregazione indipendente dei paramenti. Con l'isolamento delle placche



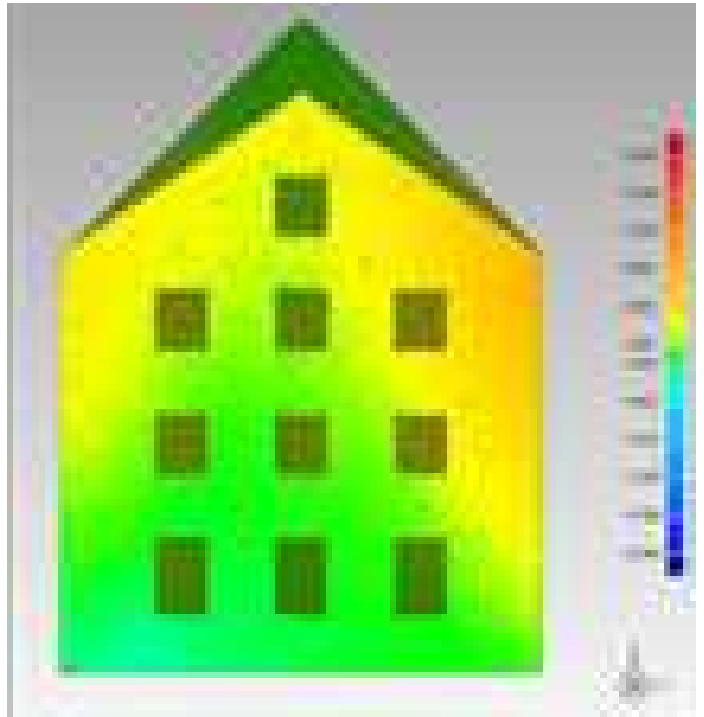
e l'unione "tecnica" dei *boundaries*, è stato possibile derivare anche considerazioni quantitative sui volumi di collasso.

La comparazione tra le *deviation map* ottenute secondo il processo di modellazione *standard* e quello certificato ha permesso di confermare la necessità di calibrazioni intermedie e processi di ottimizzazione nelle fasi di *reverse modelling*, a garanzia di un'affidabilità dimensionale imprescindibile nel caso della modellazione a carattere strutturale.

Dai modelli ottimizzati, è stato possibile eseguire un confronto tra le letture quantitative delle influenze meccaniche esercitate sulla fabbrica strutturale durante i diversi test sismici, certificando la globalità del database rispetto alla lettura parziale su singole scansioni.

In generale, i dati dei modelli non ottimizzati sono risultati coerenti con quelli elaborati per macro-aree di danno, ma con una differenza dimensionale di più di 10 mm (in condizioni di effetto scala) sulla reale entità della deformazione (quindi molto al di sopra, in contesto reale, delle soglie limite di analisi da normativa). Tale discordanza, interpretata graficamente attraverso una color map, ha portato in molti casi ad alterare la mappatura delle porzioni plastiche sul fronte, leggibili con miglior evidenza e corretto valore numerico sui modelli ottimizzati.

Confronto tra color map di deviazione dei modelli senza (a sinistra) e con (a destra) ottimizzazione: (6.121) fronte est, (6.122) fronte sud, (6.123) fronte nord.



NOTE

1 “È oggi convinzione diffusa che non si possa definire un primato tra le diverse metodologie di rilevamento in uso, in quanto ognuna di esse fornisce risultati utili e significativi in rapporto al fine del rilievo, al livello di dettaglio richiesto e alle caratteristiche dell'oggetto da rilevare”, relative sia alla pratica strumentale adottata che alla pratica metodologica messa in atto verso la scienza delle strutture. Così, “il modello tridimensionale risultante da queste elaborazioni può costituire, attraverso interventi di altre competenze, la base per una serie di studi e ipotesi di tipo strutturale, consentendo la spiegazione e la simulazione delle dinamiche trasformative verificatesi sulla struttura originaria fino a determinarne la configurazione attuale.” Cit. Vernizzi C. (2007), *op.cit.*

2 Cfr. De Rubertis R. (1994). *op.cit.*, p. 18

3 Ibidem.

4 Ibidem.

5 Cit. Gadamer H. G. (1989) “*Verità e metodo*”, Milano: Bompiani, 1989, p.144.

6 I principali parametri legati alla misurazione tridimensionale sono perseguiti anche per la sua traduzione in modello. In particolare, si intende: ‘risoluzione’ come più piccola variazione di parametro formale costitutivo, in tal caso il poligono; ‘accuratezza’ come errore tra il pattern poligonale interpolato ed il vero valore del database discontinuo di origine; ‘precisione’ come dispersione dell’algoritmo di triangolazione in funzione di dati rumore, ovvero dati noise. Per approfondimenti, cfr. Guidi G., Russo M. Beraldin J. A. (2010) *op.cit.*, p. 126.

7 Cit. De Rubertis (1994), *op. cit.*, p. 26

8 Ibidem

9 La piattaforma appartiene allo ShakeLab presso la sede di EUCENTRE, composto da un simulatore di terremoti mono-assiale in grado di riprodurre eventi sismici su prototipi di grandi dimensioni ed edifici in scala reale; un sistema per prove su dispositivi di appoggio ed isolamento in scala reale, a cinque gradi di libertà; una struttura di contrasto composta da un piano e due muri di riscontro ortogonali che consente l’esecuzione di prove pseudo-statiche e pseudo-dinamiche, su prototipi di grandi dimensioni, con applicazione del carico secondo le tre direzioni principali.

10 Per una più estesa trattazione, cfr. Fäh D., Gisler M., Jaggi B., Kästli P., Lutz T., Masciadri V., Matt C., Mayer-Rosa D., Rippmann D., Schwartz-Zanetti G., Tauber J., Wenk T. (2009) “The 1356 Basel earthquake: an interdisciplinary revision.” *Geophysical Journal International*, 178(1), pp. 351-374.

11 Tra i provvedimenti, si ricordano: il divieto dei “Weichdächer”, “tetti soffici” in paglia, introdotto nel 1417, e le disposizioni sulla divisione delle unità edilizie a schiera con setti murari perpendicolari al fronte strada. Cfr. Fouquet G. (1999). “*Bauen für die Stadt. Finanzen, Organisation und Arbeit in kommunalen Baubetrieben des Spätmittelalters. Eine vergleichende Studie vornehmlich zwischen den Städten Basel und Marburg*”. Institut für vergleichende Städtegeschichte, Münster, Germany.

12 Nella mappa di zonizzazione sismica presentata in SIA 261: 2014, Basilea si trova nella Zona 3a con un valore di progetto per l’accelerazione del terreno di picco orizzontale (o PGA) su roccia di 0,133, valutata considerando uno smorzamento viscoso del 5% e un periodo di ritorno di 475 anni. La classificazione esposta è indicativa ma non esaustiva, e sono in sviluppo operazioni di microzonazione più dettagliate che introducono spettri di risposta localizzati per aree più piccole, tenendo conto degli effetti locali dell’amplificazione (o della deamplificazione) causata dalla microstruttura del suolo specifica per zona. La micro-zonizzazione è sviluppata su dati storici della domanda di spostamento del terremoto del 1356, con un periodo di ritorno stimato di 2500 anni. Cfr. Fäh D., Wenk T. (2009). “*Mikrozonierung für die Kantone Basel Stadt und Basel Landschaft, Optimierung der Form der Antwortspektren und der Anzahl der Mikrozononen*.” Abschlussbericht: Teilbericht B, Report, Swiss Seismological Service, ETH Zurich.

13 Con il termine *retrofit*, inteso in campo architettonico strutturale, si intende un’operazione di adeguamento del sistema strutturale a richieste di resistenza, in questo caso nei confronti di azioni sismiche. Nel caso di ricerca, le operazioni hanno riguardato l’inserimento di 2 sistemi diffusi di catene in acciaio di collegamento tra fronti opposti, azionati a differenti run sismici (Run#47 per nord-sud, Run#64 per est-ovest).

14 La mappatura delle lesioni negli intervalli tra le fasi sismiche, necessaria come primo supporto di identificazione per la pianificazione delle porzioni di acquisizione fotogrammetrica, è stata eseguita in collaborazione con i professionisti operatori di EUCENTRE, che hanno fornito un importante e speditivo supporto nell’esperienza di identificazione e nominazione dei quadri fessurativi. I dati raccolti durante l’ispezione sul campo sono stati successivamente verificati ed implementati dalla lettura delle informazioni morfologiche digitali processate.

15 La densità di acquisizione dei dati range è stata incrementata a laser spot spacing di 0,7mm per 2 metri di distanza, e di 6mm per 10 metri. I target sono stati abilitati per la registrazione con peso [1.000] per errori di 0.000m, e [0.001] per errori di 0.001m.

16 La campagna ha previsto l’uso complessivo di 202 target Black&White, di lato variabile tra i 5 e 20 cm, di cui 59 posti sulla tavola vibrante, 22 sulle pareti del laboratorio e 121 sui solai lignei.

17 Le campagne laser scanner (6) hanno generato nuvole di punti di circa 1.500.000.000 punti ciascuna, con un database finale di circa 150 Gb. Le campagne fotografiche (8) hanno prodotto più di 20.000 foto tra immagini generali e di dettaglio per i quadri fessurativi, per un archivio fotografico di circa 300 Gb.

18 I geofoni sono utilizzati per eseguire l’identificazione modale preliminare di test necessaria per identificare le proprietà dinamiche del prototipo non danneggiato, grazie alla loro capacità di quantificazione del rumore ambientale rilevato in fase di misurazione. I geofoni misurano le velocità e di solito sono posizionati ad ogni livello della struttura monitorata, anche direttamente sulla tavola vibrante, e distanziati il più possibile.

19 Gli accelerometri sono generalmente classificati in

mono, bi e triassiali. Il loro posizionamento in punti significativi sul prototipo consente di caratterizzare localmente la risposta dinamica del campione, attraverso la misurazione del diagramma di accelerazione percepita nella specifica posizione.

20 I potenziometri, suddivisi in lineari (LVDT, Linear Variable Differential Transformers) e a filo, hanno monitorato l'intensità di spostamenti e le dimensioni di deformazione.

21 Le celle di carico vengono utilizzate per registrare forze, come il tensionamento delle catene. Gli estensimetri producono deformazioni in uscita (allungamenti o accorciamenti), misurando piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche.

22 Questo metodo consiste nel rilevamento del movimento di indicatori sferici posizionati a griglia sull'edificio usando un set di telecamere a infrarossi ad alta risoluzione e un software proprietario in grado di eseguire il motion tracking in tempo reale. I marker 3D sono costituiti da sfere retroriflettenti, di dimensione tra 25 e 40 mm di diametro, e sono fissato sulla superficie strutturale in corrispondenza delle posizioni di mappatura. In funzione del peso irrisorio (polistirolo) e dell'assenza di un necessario cablaggio, consentono un elevato grado di libertà nel posizionamento vincolato solo dalla loro visibilità rispetto al campo di ripresa delle telecamere di localizzazione (almeno tre telecamere per derivare la posizione nello spazio 3D).

23 L'applicazione dei marker sul prototipo nello specifico contesto del laboratorio di EUCENTRE è stata regolamentata dalla possibilità di allestire le corrispondenti telecamere ad infrarossi necessarie per la generazione del segnale. Questo è stato effettuato sui fronti esterni nord, ovest e sud; il fronte est, posto a ridosso del perimetro di laboratorio non ha disposto dello spazio necessario per il set di ripresa, così come le superfici interne al prototipo, i cui ambienti sono direttamente poggiati sulla base della piattaforma vibrante e sottoposti ai moti dinamici.

24 Diversi metodi possono essere adottati nel caso di comparazione di due dataset costituiti da nuvole di punti. In particolare, le strategie principali riguardano il confronto tra: deviazioni point-to-point, point-to-surface, surface-to-surface.

L'approccio point-to-point è praticabile solo quando si monitorano i punti identificati da target di posizione precisi. L'approccio point-surface triangola momentaneamente una delle due nuvole a confronto in una mesh poligonale di superficie o, usando un algoritmo di adattamento, in superfici planari, sferiche e cilindriche definite numericamente, consentendo di calcolarne le distanze. L'approccio surface-to-surface adatta entrambe le nuvole di punti a superfici mesh temporanee per il confronto, con tempi di elaborazione più estesi. Alcune sperimentazioni sono state condotte nella modalità point-to-surface attraverso l'algoritmo M3C2 (Lague et al., 2013) nel software CloudCompare 2.10, selezionando solo alcune scansioni di copertura per ogni fronte. Per approfondimenti, cfr. Mukupa, Wallace et al. (2017). "A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures". In: *Survey Review* 49.353, pp. 99–116;

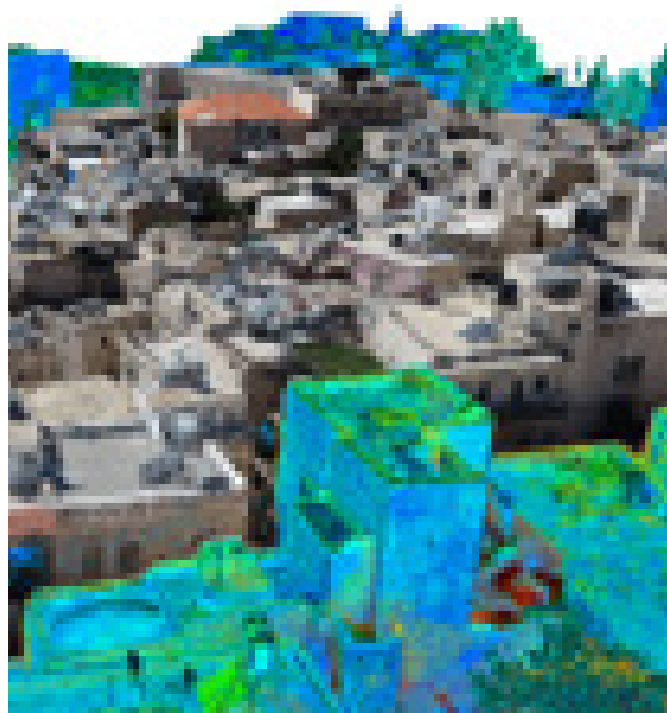
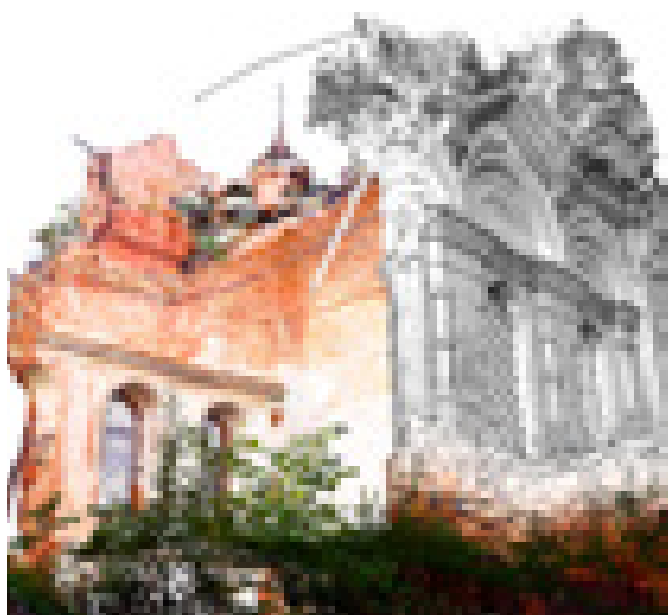
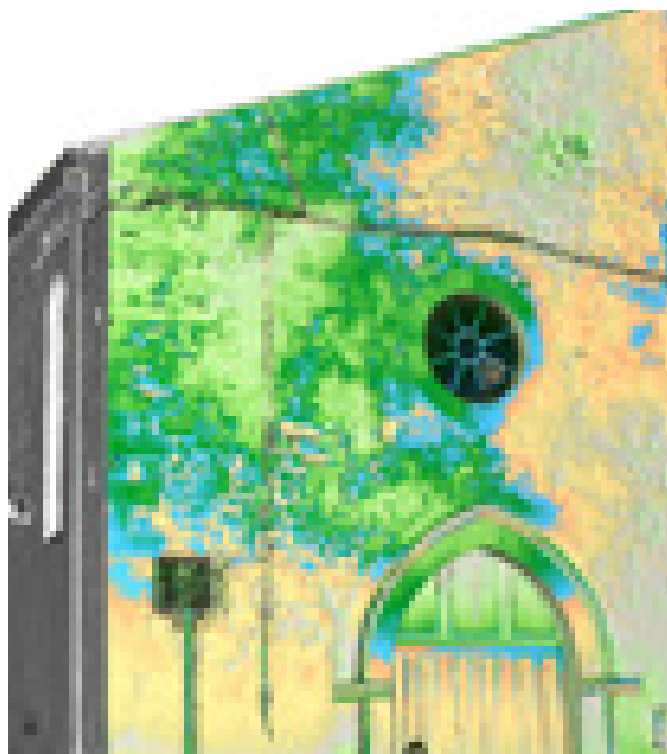
Walton, Gabriel, Danielle Delaloye, and Mark S Diederichs (2014). "Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 43, pp. 336–349; Lague, Dimitri, Nicolas Brodu, and Jérôme Leroux (2013). "Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ)". In: *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 82, pp. 10–26; Lindenbergh, Roderik and Norbert Pfeifer (2005). "A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock". In: Proceedings of the 7th Conference on Optical, pp. 61–70; Barnhart, Theodore B and Benjamin T Crosby (2013). "Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik River, Alaska". In: *Remote Sensing* 5.6, pp. 2813–2837.

25 Le sperimentazioni a seguire sono state condotte prevalentemente sulle piattaforme di modellazione Geomagic e Rapidform. È però possibile riscontrare gli stessi step metodologici anche su altri software disponibili, eventualmente in grado semplificato con minori o più limitati tools di applicazione.

26 La metodologia Six Sigma si riferisce alla dispersione di un processo attorno al suo valore medio, nel caso di una distribuzione statistica gaussiana, c'è il 99.9997% di probabilità che un valore cada all'interno dell'intervallo compreso tra -6σ e $+6\sigma$, quindi il Six Sigma è inteso come standard di eccellenza per la valutazione quantitativa della deviazione. Per approfondimenti, cfr. Hahn, GJ, Doganaksoy, N., & Hoerl, R. (2000). "The evolution of Six Sigma. Quality" *Engineering*, 12 (3), 317-326; Narottam, Mathiyazhagan K., Sharma V. (2020) "Defect Reduction in Manufacturing Industry Using Lean Six Sigma Approach." In: Kumar H., Jain P. (eds) Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.

PARTE III

MODELLO E STRUTTURA



CAPITOLO 7**Replicabilità e declinazione del protocollo ottimizzato su casi studio tipologici di configurazione strutturali complesse**

La finalità per la rappresentazione strutturale di sviluppare un protocollo di modellazione numerica continua *mesh*, arricchita delle qualità *reality-based*, consegue l'obiettivo di indirizzare le potenzialità del rilevamento digitale e dei suoi apparati di dettaglio verso più consapevoli sviluppi di forme virtuali. Tali forme, controllate e certificate all'interno del limite di involuppo dell'oggetto strutturale, introducono necessariamente un bisogno di gestione della maglia geometrica poligonale che le definisce, i cui processi sono però ricompensati dalla restituzione di un dettaglio morfologico tale da essere esso stesso fonte di riflessioni diagnostiche sui meccanismi dei sistemi di analisi.

I modelli prodotti, in tal senso, non solo perseguono le necessarie analisi di deviazione, ma consolidano una prassi certificata che li definisce sia come elaborati "finiti", direttamente applicabili per le letture statiche, che come dati di input a disposizione di ulteriori implementazioni, sia formali che di calcolo. Si instaura così un processo di elaborazione dei dati del rilievo digitale che conduce esponenzialmente allo sfruttamento delle potenzialità del prodotto tridimensionale, dalla sorgente, il *database* discreto, al modello, a sua volta metadatao di opportunità di implementazione. I canali di applicazione, dalle piattaforme FEM alla gestione informativa, fino alla fruizione virtuale, possono così spingersi a coinvolgere i modelli attraverso linguaggi comuni, adattandoli opportunamente. Il supporto di disegni vettoriali o *dataset* di segnale, dalle evidenti discordanze di formato in caso di applicazione congiunta, è così confrontato con la diretta derivazione di prodotti 3D, sia nelle tempistiche (gradualmente ridotte al procedere delle sperimentazioni) che nelle potenzialità descrittive (progressivamente aumentate in funzione delle più complesse e dettagliate esigenze conoscitive).

L'opportunità di disporre di un manufatto edilizio costruttivamente certificato e di un ambiente di monitoraggio controllato, quale quello fornito dal caso studio del prototipo strutturale di Basilea, ha permesso di sviluppare un procedimento intensivo di documentazione digitale difficilmente realizzabile in un contesto reale,

sia in termini di calibrazione estesa dell'acquisizione strumentale che per il controllo della qualità di dato nei fattori di influenza del contesto. La ricerca sviluppata ha concesso di delineare con precisione cause ed effetti prodotti dal rilievo strutturale nei processi di ripresa, registrazione e triangolazione sui dati morfo-metrici, validando le compatibilità e corrispondenze dei modelli prodotti con il confronto multi-strumentale delle pratiche di misurazione normalmente applicate in ambito strutturale.

La ricerca mira ora a validare la strategia proposta a differenti casi di studio, dedicati alla definizione di modelli grafici digitali *reality-based* sulle condizioni strutturali di apparati storici. Tali contesti, differenti per scala dimensionale, esigenze conoscitive e condizioni diagnostiche, sono chiamati ad esplicitare attraverso il conseguimento dei modelli le caratteristiche strutturali del loro sistema architettonico, sfruttando sia le configurazioni alla data del rilievo che possibili fasi sequenziali monitorate nel tempo. Si vogliono in tal modo offrire prospettive possibili di sviluppo per la diagnostica non invasiva ed il monitoraggio preventivo, disponendo di procedure speditive e ad ampia mappatura validate ai fini strutturali.

La scala del manufatto è in tal senso applicata come principio di categorizzazione per individuare dimensioni comuni di pianificazione ed esecuzione delle campagne di ripresa, gestione dati ed elaborazione modelli, in luce delle finalità conoscitive e di supporto all'intervento. Il contenimento spaziale, se facilitante le operazioni di allineamento e triangolazione, si unisce alla visibilità dei profili morfologici, accentuati alla grande scala per la segmentazione e l'isolamento dei componenti 3D a potenziale volumetrico.

In tal modo, la strategia metodologica applicata vuole configurarsi come un esempio scientifico capace di orientare la modellazione attraverso specifici parametri ed obiettivi di finalizzazione, costituendo uno schema documentativo capace poi di declinarsi alla riproduzione in contesti reali architettonicamente più dispersivi e meccanicamente meno prevedibili.

*Database morfo-metrico referenziato delle nuvole di punti
di intradosso ed estradosso dell'ambiente F20bis
nel complesso degli Uffizi.*



7.1 IL COMPONENTE COSTRUTTIVO

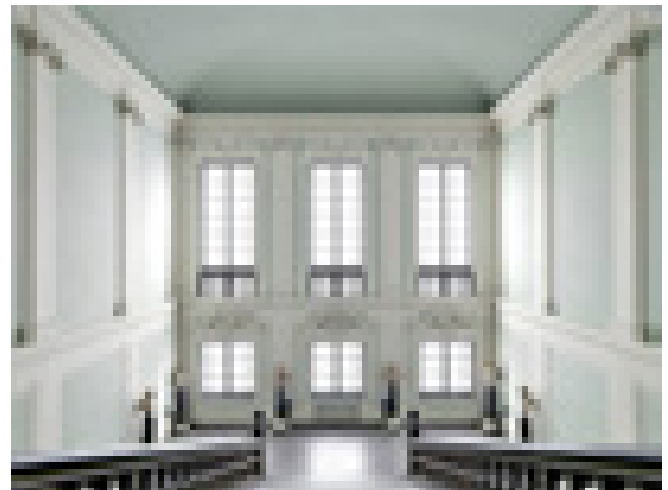
MONITORAGGIO DEL SISTEMA STRUTTURALE VOLTATO NELLO SCALONE LORENESE, PRESSO IL COMPLESSO DEGLI UFFIZI (FIRENZE, ITALIA)

Il complesso storico degli Uffizi di Firenze, commissionato da Cosimo I de' Medici nel 1560 su progetto di Giorgio Vasari come sede amministrativa delle Magistrature, è costituito da un corpo di fabbrica a "U" aperto verso Palazzo Vecchio. La nuova costruzione del complesso ha incluso corpi edilizi già esistenti del precedente rione di Baldracca, comportando demolizioni e sventramenti che solo in parte hanno risparmiato l'edificato esistente, come per la Chiesa di San Pier Scheraggio. Tale condizione ha influenzato il progetto vasariano, organizzandolo in due ali di nuovi ambienti scanditi con moduli regolari ma di differente lunghezza per l'inclusione delle strutture già esistenti, in particolare in corrispondenza dell'ala orientale che ha inglobato la citata chiesa e l'antico Palazzo della Zecca. Alla morte del Vasari (1574) i lavori proseguirono fino alla conclusione della Loggia dei Lanzi nel 1580, e dal 1587 si vide la prima destinazione per allestimenti museografici nella Galleria.

Con il passaggio alla famiglia Lorena, è il Granduca Pietro Leopoldo ad aprire ufficialmente la Galleria al pubblico nel 1769, provvedendo alla costruzione di un nuovo ingresso nel 1781 collocato nell'ala orientale e realizzato su progetto di Zanobi del Rosso (allievo di F. Fuga e L. Vanvitelli) atto a promuovere una radicale trasformazione della Galleria¹. L'ingresso si compone di un doppio ambiente al secondo piano, con un vano scala e un vestibolo realizzati su forme neoclassiche. L'accesso dal piano terra è permesso da una doppia rampa che conduce al vano scala principale a doppia altezza (ambiente F20 bis²), dove essa si riunifica per condurre al secondo piano in corrispondenza del vestibolo (ambiente F20).

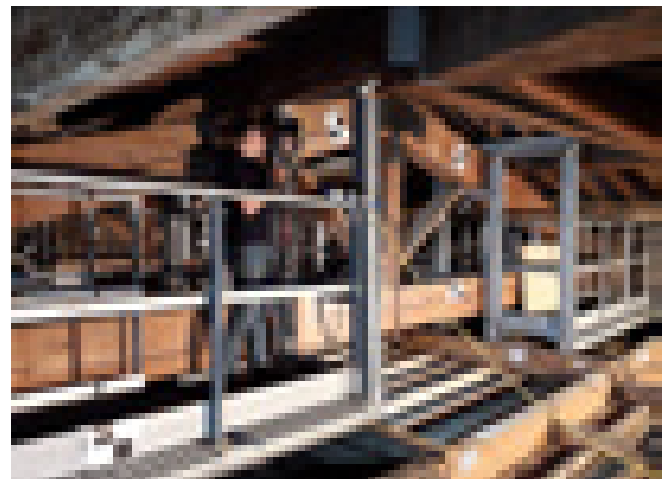
Oltre alla planimetria della scatola muraria degli ambienti, di particolare interesse in relazione alla condivisione di parte delle murature portanti con l'originario complesso di San Pier Scheraggio³, è rilevante la conformazione della copertura specialmente per l'ambiente F20bis (vano scala). L'interno dello scalone è coperto da un'estesa volta a schifo "in cannucciato" (o "incannicciata"), intonacata

semplicemente all'intradosso e sorretta da una complessa struttura lignea a carena nell'estradosso, nell'ambiente di sottotetto, dove è presente anche un'imponente struttura a capriate lignee di sostegno della copertura.



Sopra (7.1) Sala dello scalone Lorenese, attuale ingresso alla Galleria degli Uffizi, coperta dalla volta incannicciata di analisi.

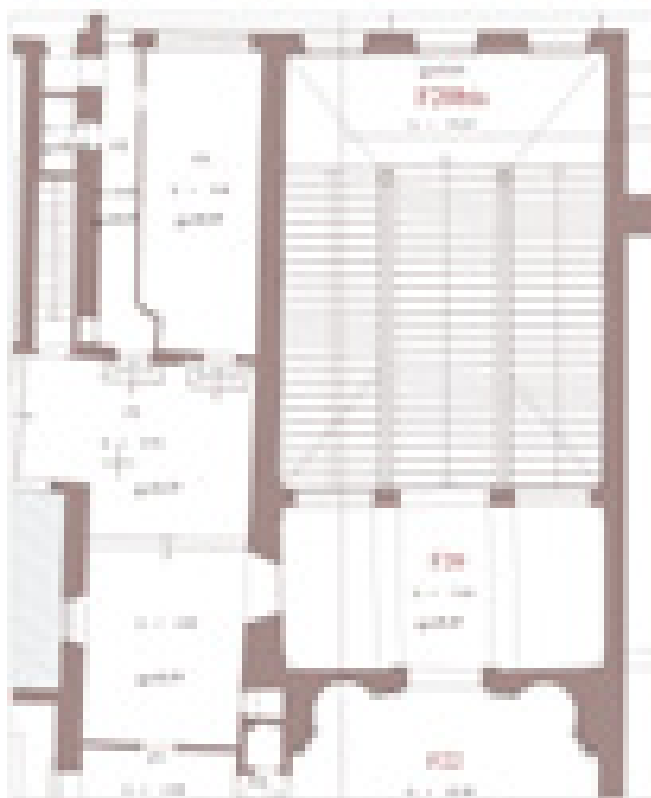
Sotto (7.2) Estradosso del locale, occupato dalle strutture a capriate. E' presente una passerella per il passaggio sopra la volta centinata.





(7.3) Ubicazione dell'ambiente F20bis all'interno degli Uffizi. L'intero complesso, sviluppato a lato di palazzo Vecchio attorno ad una galleria centrale aperta, prosegue a sud snodandosi con il Corridoio Vasariano attraverso Ponte Vecchio ed oltre l'Arno, fino a Palazzo Pitti.

(7.4) L'ambiente F20bis collega direttamente l'ingresso dalla corte al piano terra con la Galleria al primo piano, attraverso un atrio (F20), non interessato da danni strutturali.



(7.5) Corrispondenza tra la struttura muraria dell'ambiente F20bis ed il precedente complesso di San Pier Scheraggio, demolito per l'espansione soprastante degli Uffizi. Rilievo eseguito da SAT Survey.

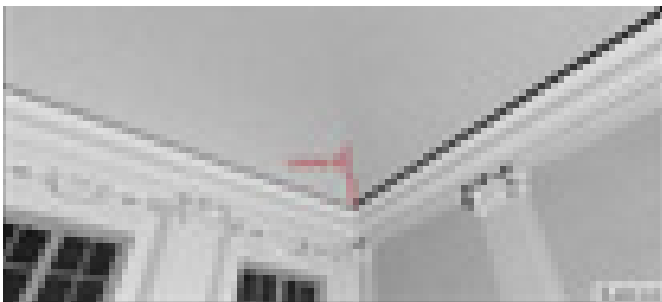
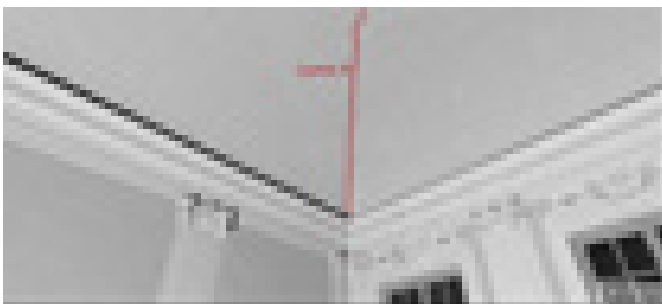
La volta è composta da uno “stuoiato” di supporto all’intonaco dell’intradosso, realizzato canne intessute a formare una maglia con doppia tessitura ortogonale, e appeso al proprio sistema di orditura con un apparato di chiodatura. La struttura portante della volta è in centine lignee indipendenti dall’impalcato sovrastante, tra le quali si riconoscono in particolare due mezzoni principali, trasversali al corpo dell’ambiente F20bis ed inseriti nelle pareti murarie, ai quali si giungono le altre membrature secondarie e per le quali essi costituiscono elementi di irrigidimento. Per condizioni precauzionali, o forse a seguito di primi accertati cedimenti, le centine angolari della volta sono agganciate attraverso cavi tiranti in acciaio alla struttura di copertura, 2 ai cantonali angolari verso la parete finestrata e 2 a travi dell’orditura primaria sul lato opposto.

7.1.1. Le criticità osservate e la richiesta conoscitiva.

A partire dal 2013 il riscontro di alcune lesioni sull'intradosso della volta ha allarmato la Direzione degli Uffici sulle condizioni di sicurezza della soffittatura dello Scalone Lorenese, quotidianamente percorso da numerosi turisti in visita presso il complesso museale. L'Università degli Studi di Pavia, interpellata dalla direzione del cantiere, ha avviato un'indagine morfologica pianificata sull'ambiente voltato F20bis da subito intesa, oltre ad un aggiornamento della documentazione planimetrica sul complesso, come un programma di monitoraggio morfo-metrico digitale pluri-campagna volto a meglio apprezzare eventuali comportamenti cinematici della struttura. Le operazioni di rilievo, condotte con integrazione di campagna laser scanner, fotografica e fotogrammetrica, hanno impostato un archivio di materiale digitale dedicato alla conoscenza geometrica e di lesione delle superfici dell'ambiente, con una tolleranza millimetrica di controllo.

Il monitoraggio, tutt'ora in corso, ha previsto 7 campagne di documentazione: le prime 3 (12/2013, 05/2014, 12/2014)

(7.6) Localizzazione ed estensione delle lesioni rilevate sull'intradosso della volta con la prima campagna di rilevamento del 2013. Lo strato intonacato ha permesso di notare con più facilità la presenza di deformazioni in corso sul sistema strutturale.





sono state inizialmente condotte sulla superficie voltata di intradosso; la 4 (04/2015) ha implementato il monitoraggio con la superficie di estradosso, mantenendo entrambi gli ambienti di documentazione anche nella 5 (02/2016)⁴. Successivamente, su richiesta della direzione, le fasi 6 (09/2018) e 7 (04/2019) sono state condotte rispettivamente solo sulla superficie di intradosso ed estradosso.

La motivazione di tale organizzazione risiede in una considerazione più complessa delle possibili cause di deformazione della volta, saggiate nella loro reale sussistenza con le prime campagne di documentazione e successivamente mirate con sguardo più analitico durante i successivi monitoraggi. In tutte le campagne, la lettura dei dati del rilievo è stata concentrata maggiormente sull'interrogazione dei dati delle nuvole di punti in corrispondenza della struttura voltata tramite *elevation map*, mentre solo nell'ultima è stato introdotto un maggiore supporto da modellazione *mesh Reality-based* esteso anche al sistema di capriate della copertura.

La prima campagna di rilevamento è stata condotta con l'obiettivo di impostare un quadro base di documentazione morfo-metrica (Fase 1 – 2013), come “condizione zero”, sul quale instaurare tutte le successive comparazioni. L'ipotesi iniziale suggeriva la natura delle fessurazioni come fenomeno relativo alle variazioni di umidità dell'ambiente, in particolare di condizione stagionale. Tale assunto ha motivato la pianificazione della campagna 2 nella stagione primaverile immediatamente successiva (Fase 2 – 2014), riscontrando deboli cinematismi non aggravanti lo stato di deformazione già riscontrato nella configurazione morfologica della volta.

La campagna 3 condotta nell'inverno seguente (Fase 3 – 2014) ha però evidenziato notevoli scostamenti delle curve isometriche monitorate (fino a 2 cm), tali da

(7.7-7.13) Documentazione fotografica dell'ambiente di estradosso corrispondente alla copertura dello scalone Lorenese. Il locale è molto contenuto, quasi interamente occupato dalle due capriate lignee e dalla passerella in acciaio che ne consente il movimento all'interno, senza calpestare e sfondare la volta in canniccio sottostante.

Il sistema voltato presenta una struttura lignea a centine, ammassata al perimetro murario anche con il supporto di due mezzoni trasversali, posti circa in corrispondenza delle capriate. Risulta poi collegata al sistema di copertura attraverso due tiranti in acciaio con asola inserita nei cantonali di angolo.

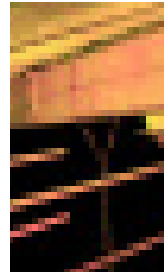
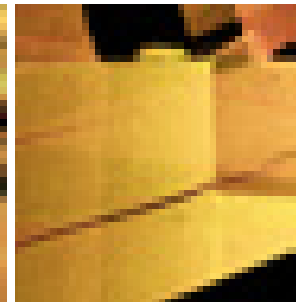
introdurre la valutazione di cause non condizionali bensì strutturali della componente voltata. È stata in tal modo adottata l'integrazione delle successive campagne con il rilevamento digitale dell'ambiente di estradosso, con l'obiettivo di definire una documentazione dell'intero involucro dell'apparato ligneo analizzando in modo combinato la corrispondenza deformativa del sistema tra la superficie interna, intonaca, e quella esterna, di centine e canniccio. Parallelamente, la predisposizione di tiranti in acciaio collegati dalla volta alla struttura di copertura ha riassetato un quadro deformativo (Fase 4 – 2015) molto simile alla Fase 2.

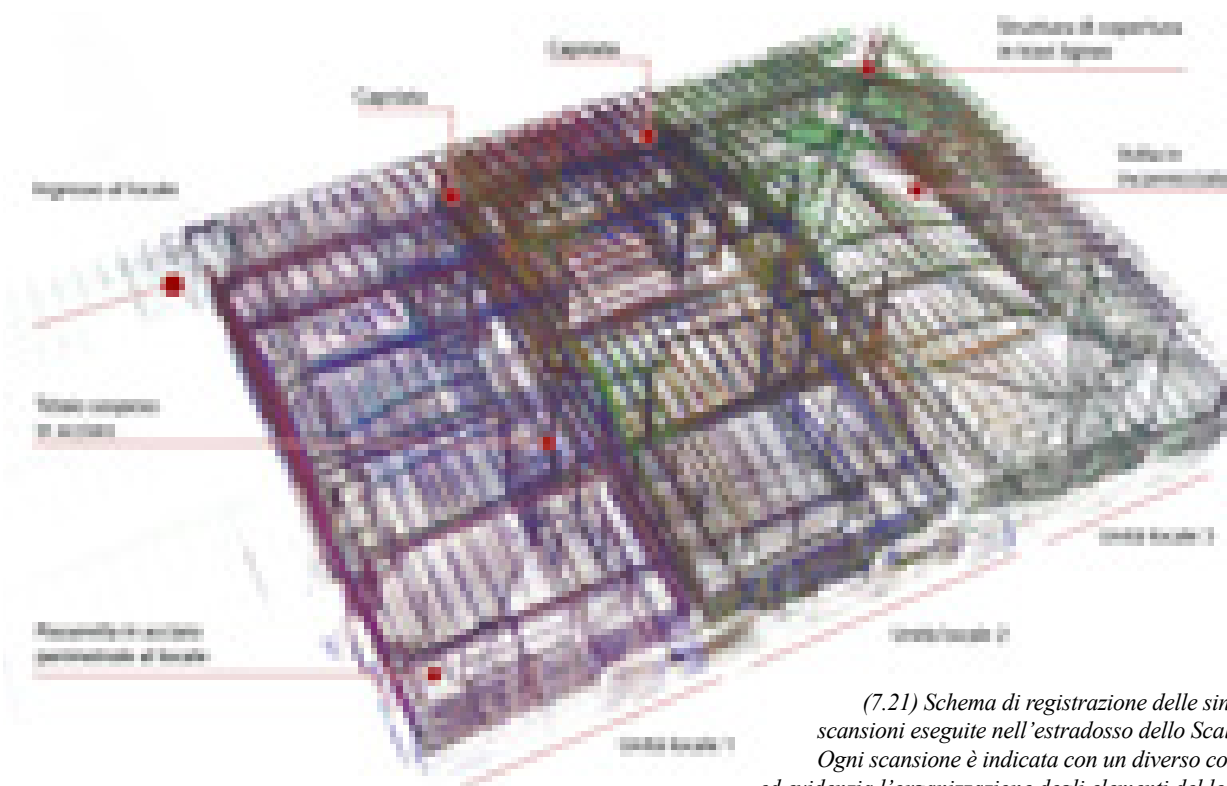
L'espandersi delle lesioni precedentemente riscontrate ha condizionato un'ulteriore campagna di monitoraggio (Fase 5 – 2016), la quale ha evidenziato un nuovo cedimento della struttura voltata ripristinante le condizioni pre-intervento della Fase 3 (2014). La volta non solo si è abbassata sensibilmente, in un range medio di 2 cm, ma ha anche dimostrato delle deformazioni locali di irregolare intensità localizzate negli angoli, maggiormente in quello sud-est.

7.1.2. L'azione di documentazione 2018-2019

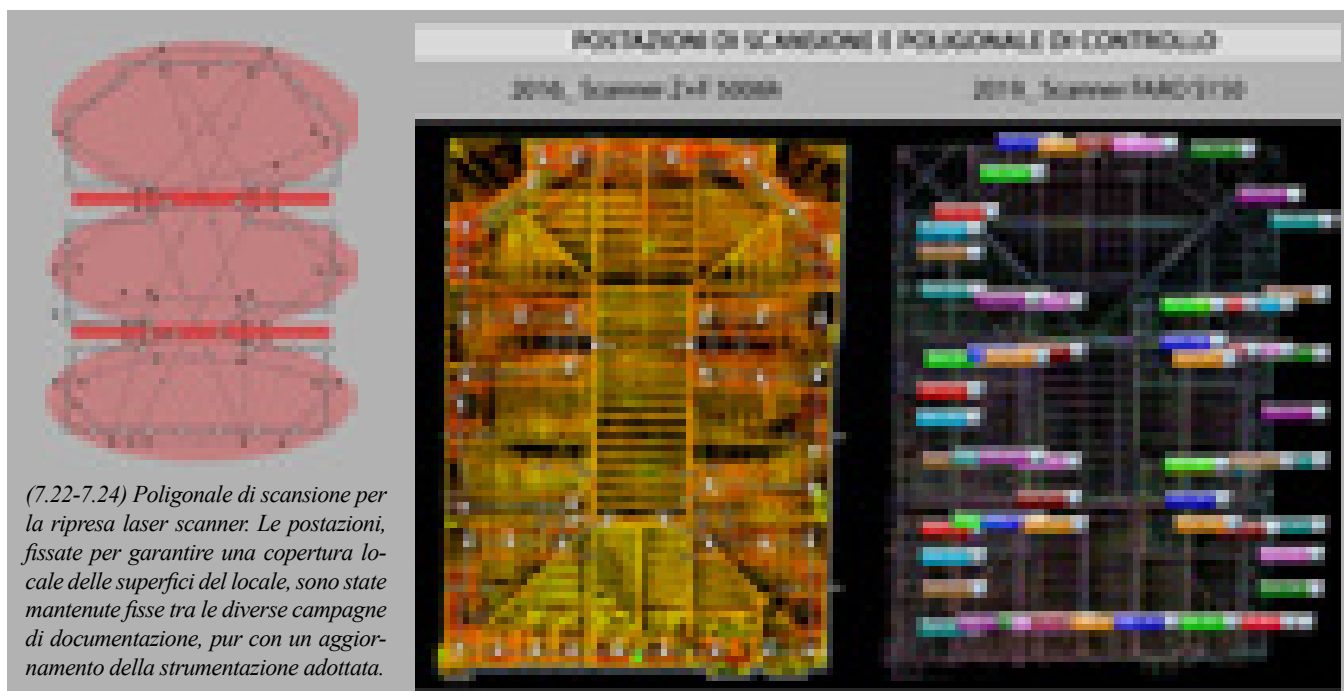
La campagna di aggiornamento del monitoraggio eseguita sull'intradosso nel 2018 (Fase 6) ha confermato un cedimento incrementante della struttura della volta. La nuova nuvola di punti acquisita con laser scanner FARO S150 Focus è stata riallineata al database complessivo delle precedenti attraverso la referenziazione su capisaldi posizionati durante la prima campagna, e mantenuti per tutte le seguenti. I target Black&White selezionati, distribuiti lungo il perimetro del vano scala, hanno garantito una tolleranza di errore di allineamento inferiore ad 1 mm.

(7.14-7.20) Viste prospettiche della nuvola di punti da laser scanner terrestre eseguita nel 2019 all'interno del locale di intradosso. La densità adottata in fase di ripresa, oltre al numero e posizione delle scansioni, ha permesso di coprire quasi interamente le superfici del sistema strutturale. Il rilievo si è presentato come particolarmente complesso a causa dei numerosi elementi di ostacolo per la ripresa del sistema centinato della volta, tra i quali la passerella e le capriate stesse.

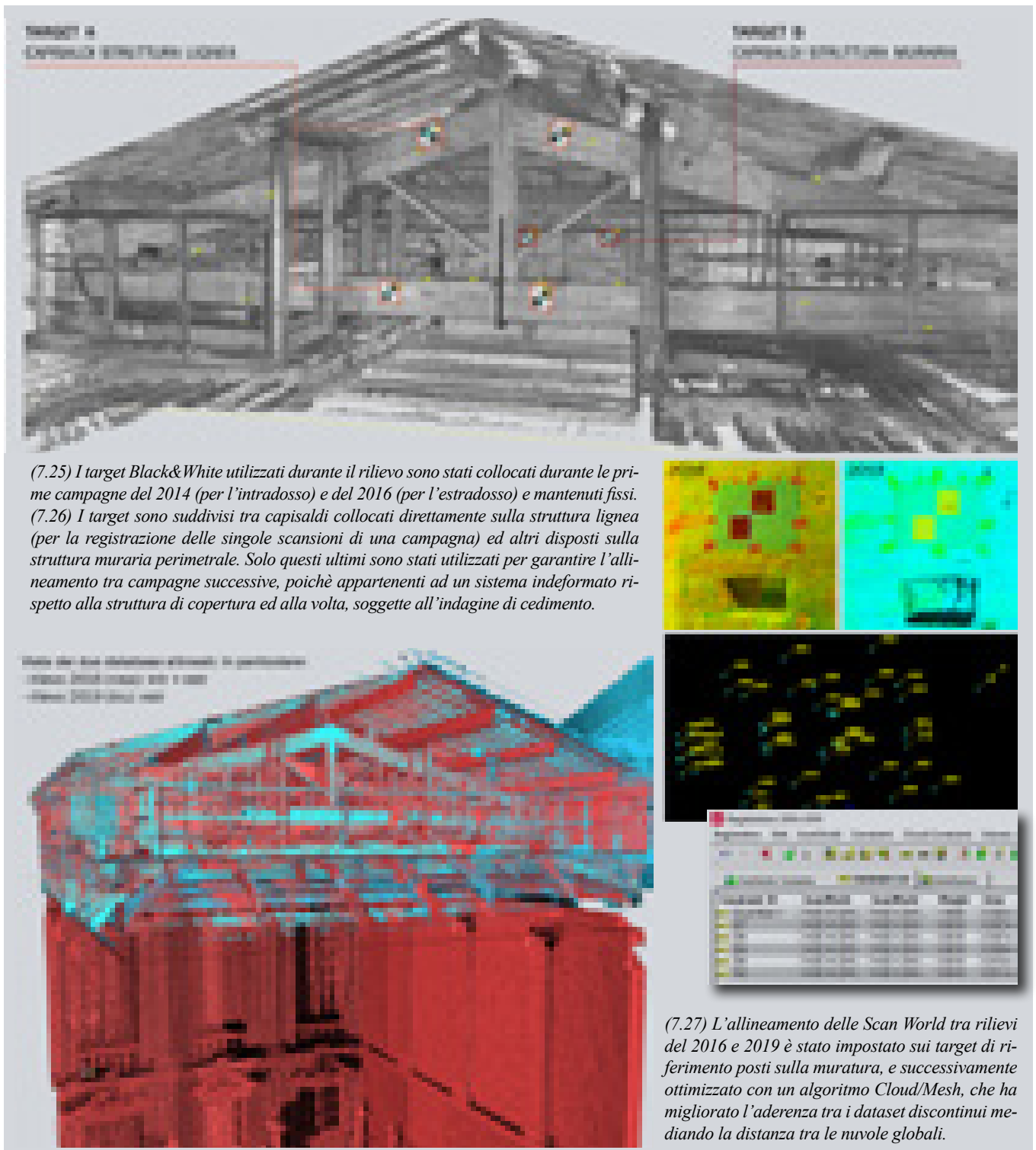


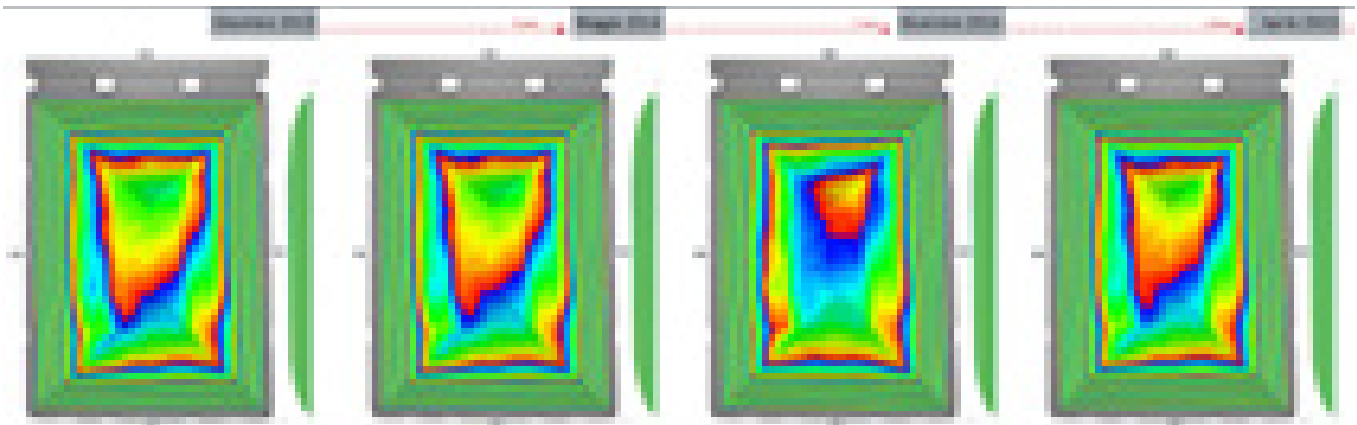


(7.21) Schema di registrazione delle singole scansioni eseguite nell'estradosso dello Scalone. Ogni scansione è indicata con un diverso colore, ed evidenzia l'organizzazione degli elementi del locale.



(7.22-7.24) Poligonale di scansione per la ripresa laser scanner. Le postazioni, fissate per garantire una copertura locale delle superfici del locale, sono state mantenute fisse tra le diverse campagne di documentazione, pur con un aggiornamento della strumentazione adottata.





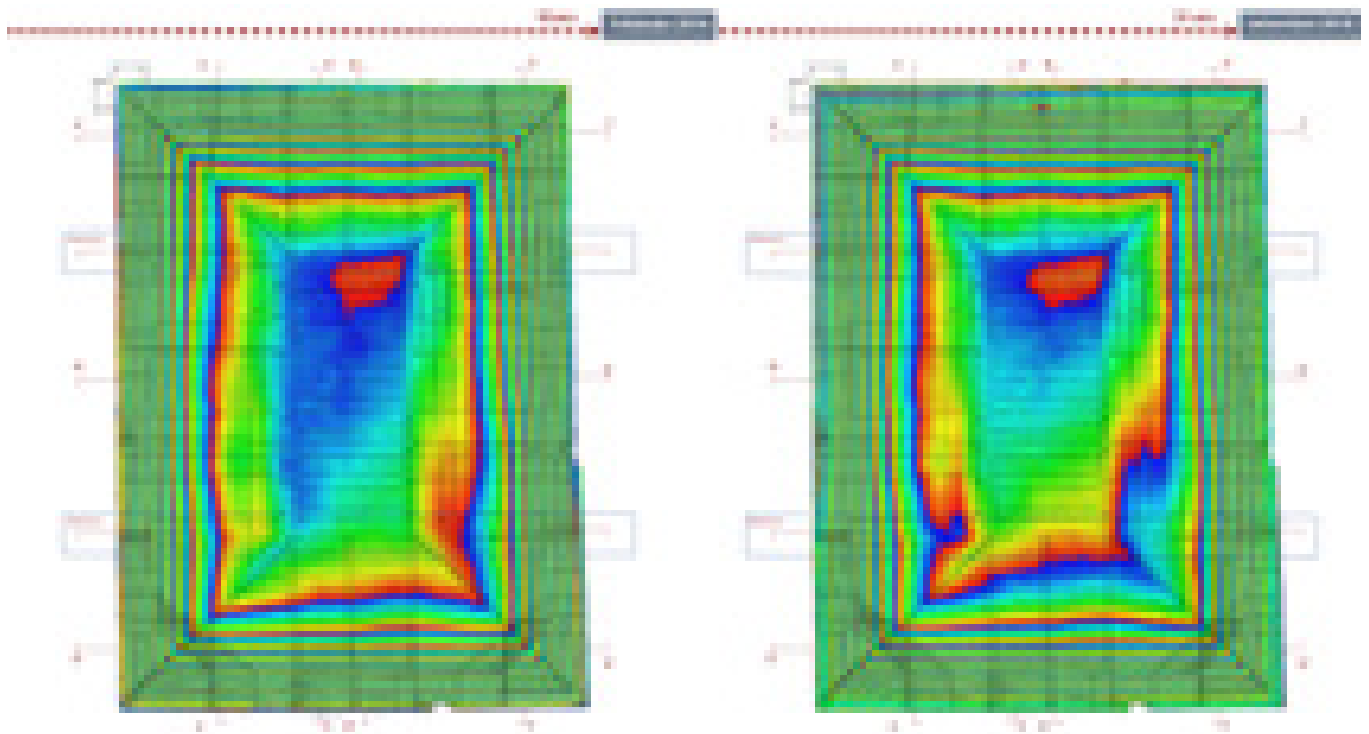
La lettura dell'aggiornata *elevation map* dell'intradosso è stata eseguita in comparazione con la planimetria strutturale dell'estradosso, per permettere una correlazione con la struttura delle centine, ed ha evidenziato un cedimento diffuso in sommità, pendente verso la parete finestrata, ed un incremento di quelli angolari. Se la deformazione al centro può essere ricondotta alla regolare sollecitazione a flessione propria delle volte in canniciato, generalmente a bassa curvatura ma ugualmente poco resistenti per forma, la deformazione differenziale agli angoli si trova in questo caso relazionata ad una più probabile perdita di efficienza delle sospensioni delle centine⁵. In particolare, il fenomeno di abbassamento è in questo caso riferito al mezzone A, nodo di collegamento delle centine angolari, con la conseguente variazione di forma e fessurazione di intonaco segnalata in corrispondenza dell'intradosso.

L'aggiornamento delle precedenti sezioni impostate e mantenute referenziate alle nuvole di punti delle diverse campagne, grazie al riallineamento UCS delle stesse ed alla conoscenza delle coordinate spaziali dei piani di taglio, ha permesso di estrarre le *slice* 2D corrispondenti alla campagna 2018 e di confrontarle con l'archivio delle precedenti. La misurazione millimetrica degli abbassamenti differenziali, resa possibile dall'errore certificato sull'allineamento dei database morfo-metrici e dalla buona lettura della densità della nuvola di punti filtrata, è stata condotta anche sullo storico dei dati relativi ai mezzoni A e B, evidenziando in particolare sull'elemento A un cedimento all'appoggio nella struttura muraria, maggiore nel lato sud-est.

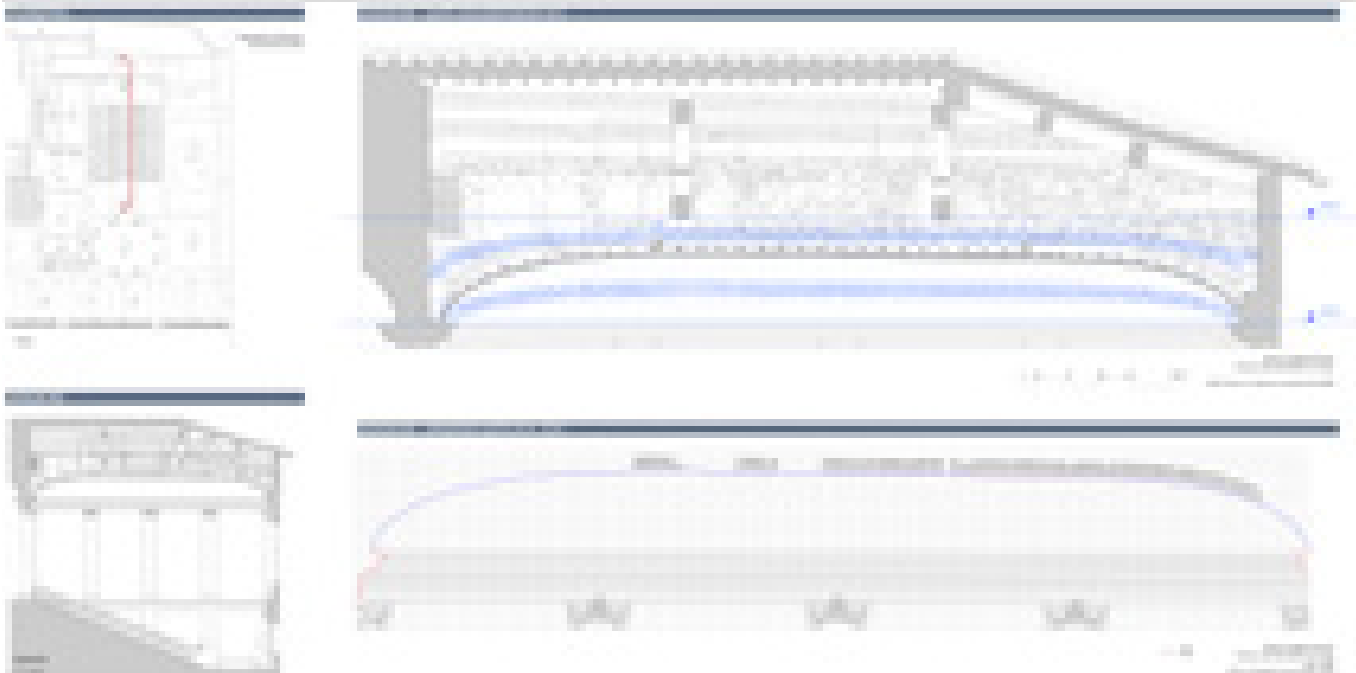
(7.28) Sequenza temporale delle *elevation map* eseguite sull'intradosso della volta, evidenzianti i cedimenti progressivi della struttura incanniciata. A destra (7.X) ultime *elevation map* del 2016 e 2019 sovrapposte alla struttura centinata della volta, dove si evidenzia l'aumento dei valori di deformazione in corrispondenza del mezzone A.

Le nuove sezioni impostate, anomale dal punto di vista rappresentativo poiché eseguite esattamente in corrispondenza del volume pieno del mezzone, sono state necessarie per garantire una corretta comprensione e quantificazione dei fenomeni plastici presenti in esatta corrispondenza dei meccanismi di criticità evidenziati dal rilievo morfologico della struttura. In tal modo, l'attenzione dell'analisi diagnostica è stata orientata dalla volta incanniciata stessa, considerata maggior elemento di labilità dell'opera, alla struttura primaria di sostegno, interamente affidata ai due mezzoni per bilanciare la flessione di forma del canniccio rispetto ai sostegni murari longitudinali⁶.

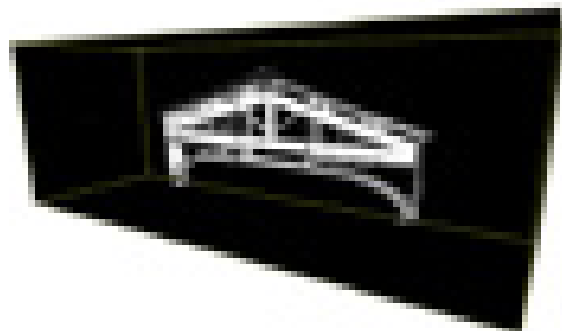
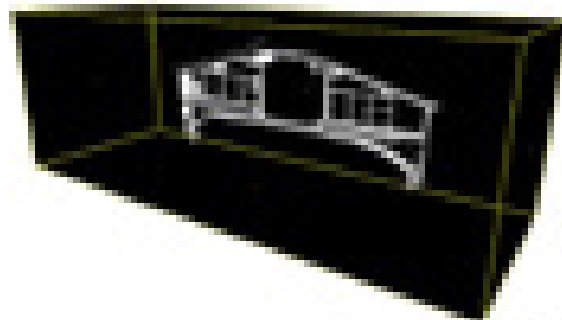
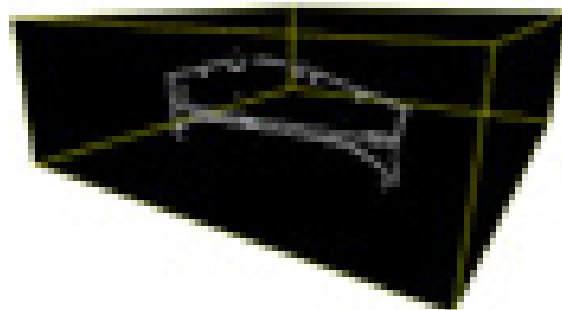
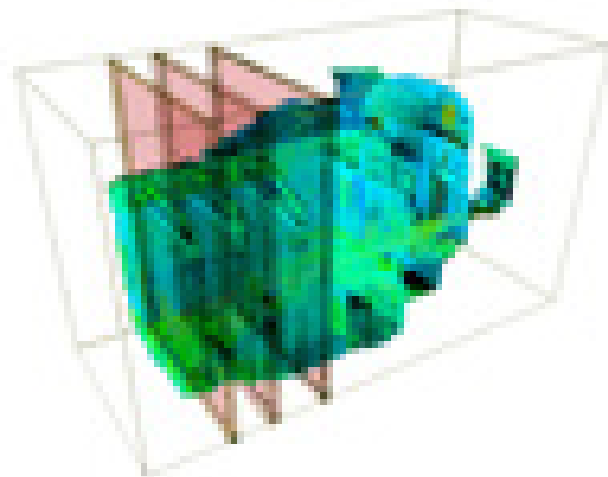
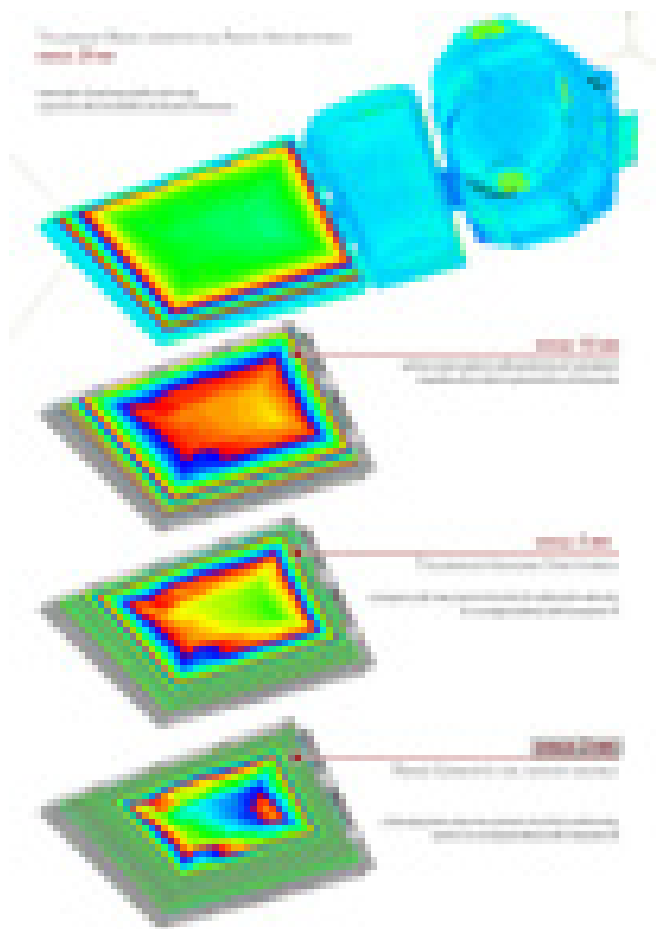
L'identificazione delle cause cinematiche nel sistema dalla struttura di estradosso ha avanzato l'ipotesi di un controllo più esteso anche al sistema di copertura, motivando la richiesta di una campagna di aggiornamento 2019 nell'ambiente di sottotetto (Fase 7), la cui comparazione è stata effettuata con l'ultimo archivio utile raccolto nella Fase 5 – 2016. Tale campagna è stata richiesta anche a seguito del riscontro, da parte di alcuni tecnici del cantiere, di fenomeni localizzati di flessione nel telaio della passarella dell'ambiente, direttamente vincolato al sistema delle capriate e da esso ricevente la trasmissione di sforzi con eventuali punti di flesso.



(7.29) Le sezioni bidimensionali, quotate con affidabilità consentita dal database dell'ordine del millimetro, sono state effettuate sezionando la nuvola di punti integrata (tra intradosso ed estradosso), così da ricavare lo spessore della volta. Le sezioni, confrontate tra i rilievi coerentemente alle elevation map, hanno evidenziato dei cedimenti nella porzione angolare in corrispondenza del mezzone A.

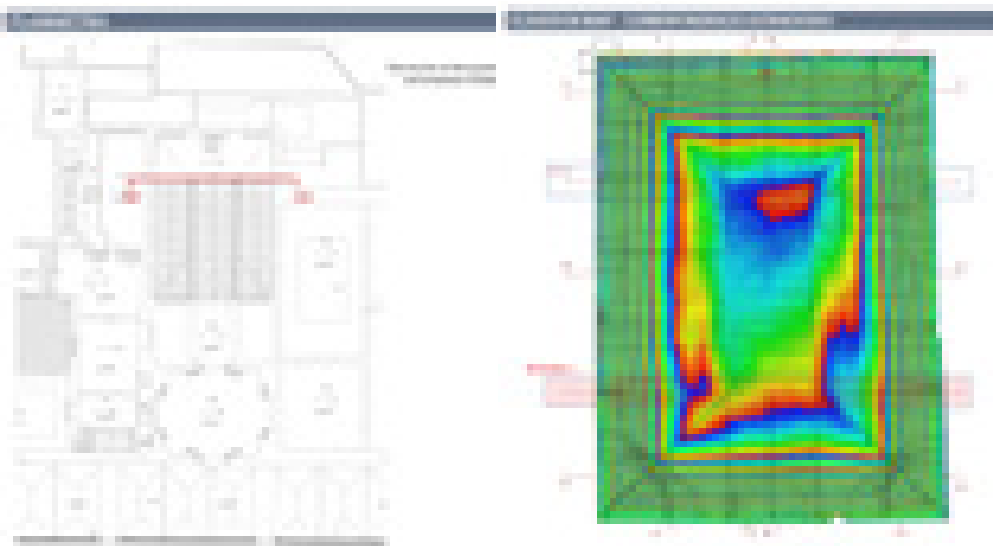


(7.30) L'esportazione delle elevation map relative all'intradosso della volta ha previsto una fase di valutazione degli intervalli di range deformativo impostati per la color map. Tale valore è risultato particolarmente influente nella valutazione dello stato di danno, evidenziando secondo il suo ordine di grandezza l'estensione reale del fenomeno di deformazione. L'intervallo di 2 mm è risultato essere il range ottimale per garantire al contempo una lettura critica del danno sia qualitativa che quantitativa.



Le gestione della nuvola di punti ha permesso di interagire con i dati morfo-metrici operando una segmentazione dei punti nello spazio. Le porzioni di nuvola corrispondenti alle capriate, al mezzone A, all'estradosso ed intradosso della volta, sono state analizzate ed esportate separatamente per procedere con una valutazione più dettagliata delle caratteristiche morfo-metriche dei componenti, interessate dall'influenza del fenomeno meccanico di cedimento del sistema.

(7.31) Segmentazione con limit box ed esportazione delle nuvole parziali sui componenti principali della struttura di analisi (7.32-7.34)



Letture integrata dello stato di deformazione da (7.35) elevation map e (7.36) sezione quotata di dettaglio sulla porzione del mezzone A.

Si evidenzia un cedimento diffuso interessante sia il mezzone che la struttura voltata dell'incanniccio, mantenuta nell'ordine millimetrico e confrontata con le variazioni di livello documentate dal 2013. Il mezzone B non ha presentato fenomeni analoghi di spostamento, confermando il quadro inalterato dell'intradosso mostrato dall'elevation map.

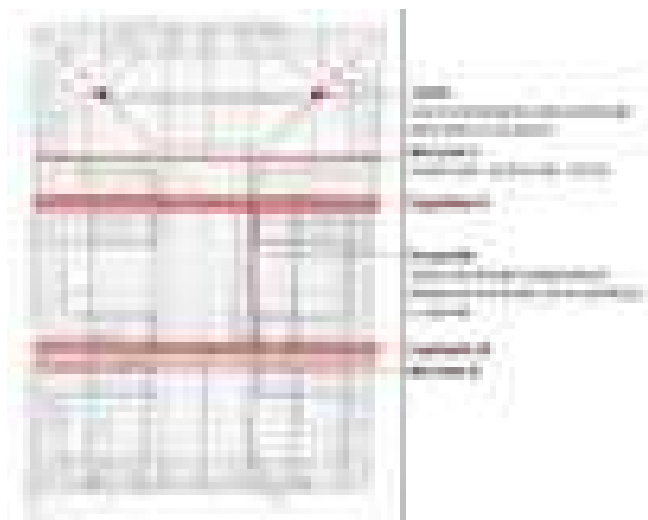


7.1.3. Il contributo della modellazione all'esigenza diagnostica dei componenti costruttivi

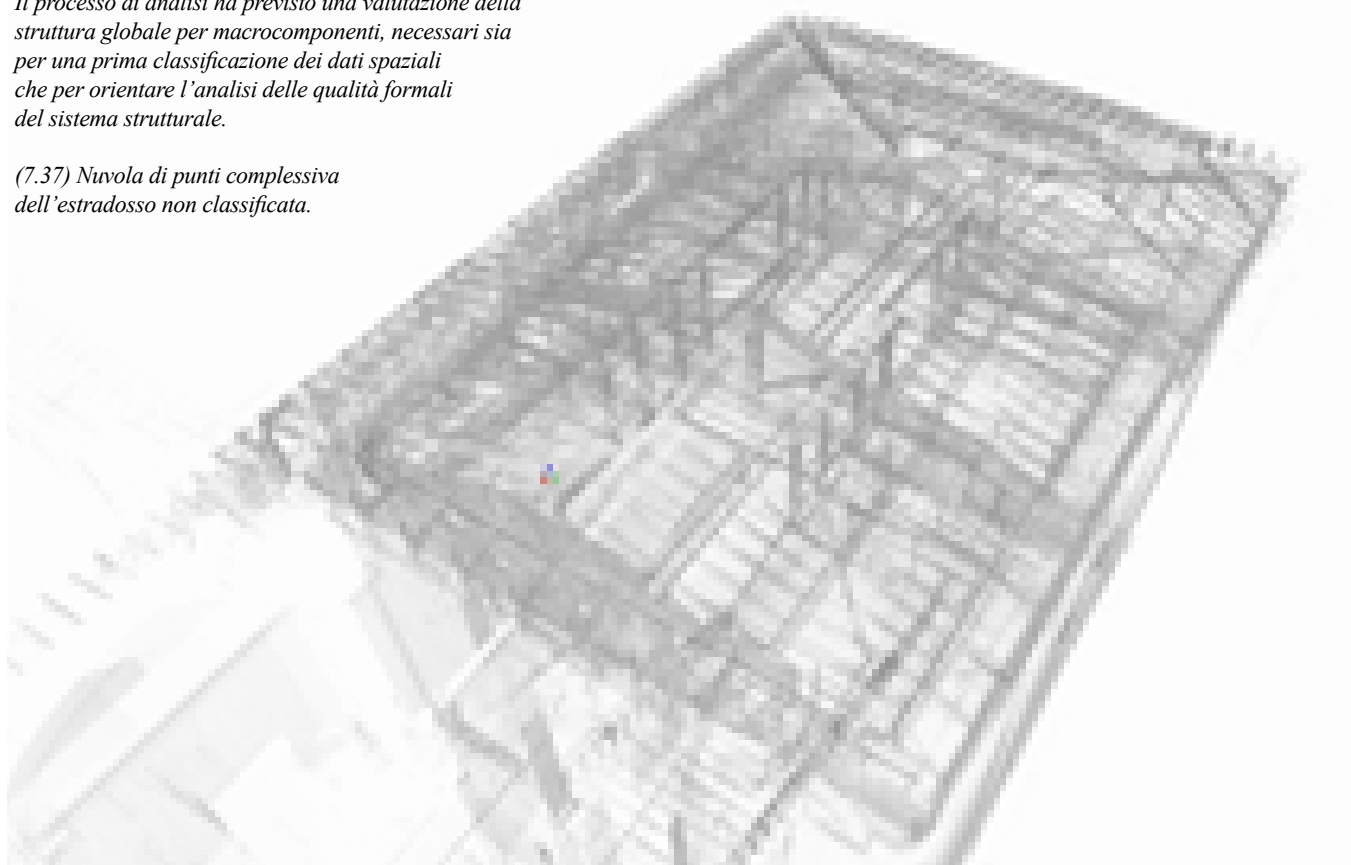
L'aggiornato quadro di indagine realizzato nell'ambiente di estradosso ha indirizzato le successive fasi di elaborazione ed interrogazione dei dati morfo-metrici verso un doppio livello strutturale di meccanismo statico, agente in un dominio specificatamente tridimensionale. Tale contesto ha impoverito la funzionalità del precedente metodo di mappatura mono-assiale dei fenomeni di deformazione (tramite sezioni 2D ed *elevation map*), avanzando la necessità di una "strategia" di modellazione capace di evidenziare scostamenti differenziali nella completezza delle tre dimensioni, ed estensibile all'intero sistema composto con un dettaglio alla scala dei suoi singoli componenti. In particolare, sono stati considerati due livelli di interazione:

Il processo di analisi ha previsto una valutazione della struttura globale per macrocomponenti, necessari sia per una prima classificazione dei dati spaziali che per orientare l'analisi delle qualità formali del sistema strutturale.

(7.37) Nuvola di punti complessiva dell'estradosso non classificata.



(7.38) Schema di scomposizione della struttura lignea nei principali elementi di contributo allo schema statico complessivo. A destra (7.39-7.40) sistema locale e macrosistema di interazione.





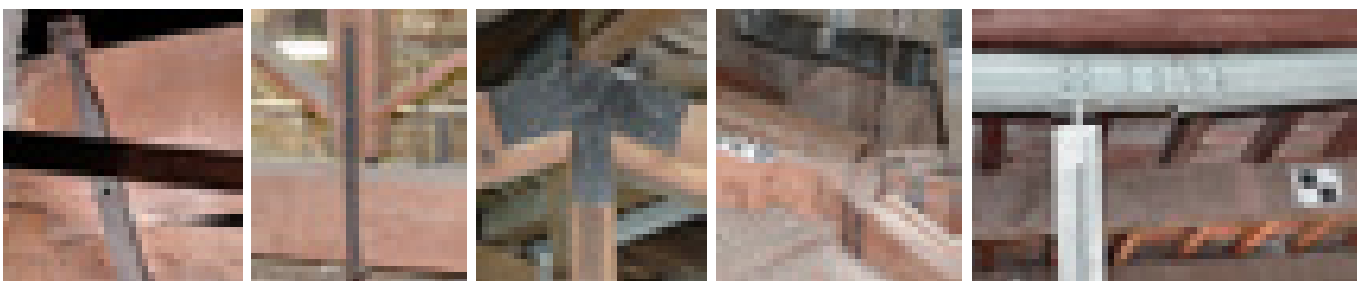
Il sistema locale.

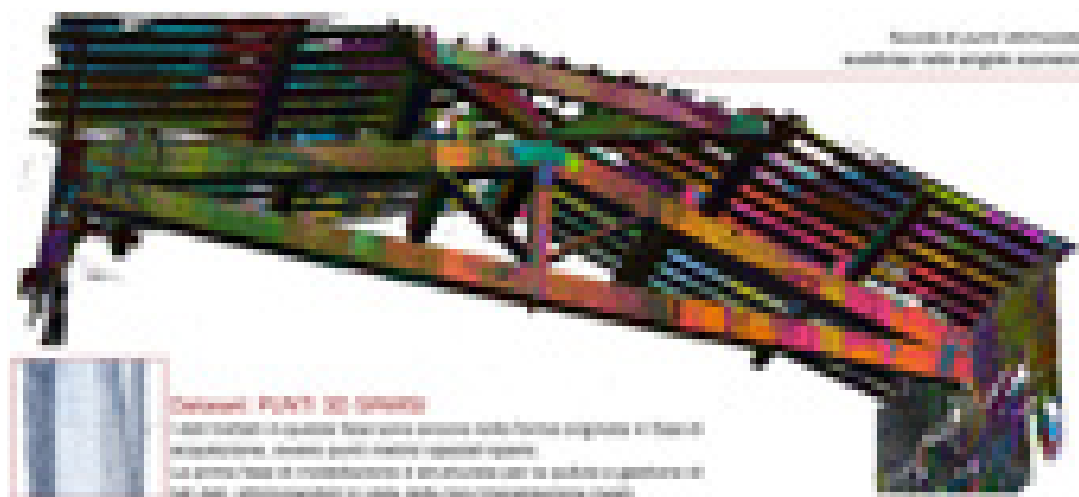
Costituito da ciascuna *capriata*, è morfologicamente inteso come singolo involuppo a superficie continua, interrotto in corrispondenza del limite al sistema omogeneo (appoggio dell'orditura primaria sulla capriata, e della capriata stessa sulla muratura portante longitudinale), ed includente una maglia di connessione di più unità di puntoni, catena, monaco e saette con relative staffe e gattelli. Per la conformazione del locale, influenzante le postazioni di ripresa, e dell'organizzazione della campagna di rilevamento laser scanner (con scansioni eseguite in modalità High da una quota superiore al corrimano del passaggio), il sistema morfologico di ciascuna capriata presenta una copertura di dato completa al 90%, priva di *bullet holes* (data la ridotta curvatura di lavorazione dei componenti) e *shield holes* (adottando una pianificata poligonale di ripresa per ridurre l'oscuramento del telaio della passarella, ingombro principale dell'ambiente oltre alla struttura stessa) ed interessata da *corner holes* in corrispondenza di definite superfici di taglio (come la faccia inferiore della catena e quelle superiori dei puntoni) tali da non richiedere direttrici geometriche di supporto alla modellazione.

Il macrosistema di interazione.

Definito dai componenti del sistema di relazione *copertura-volta*, è morfologicamente costituito da un involuppo discontinuo e non chiuso della superficie interna degli apparati di delimitazione dell'ambiente (in particolare intradosso di orditura lignea della copertura e sistema di estradosso dell'incanniccato con centine della volta). Tale involucro parziale è chiamato a descrivere un insieme complesso di profili (terzerer, travetti, piastre di giunzione, mezzoni e centine) con una copertura di acquisizione massima del 75%, dove il dato mancante risulta criticamente localizzato proprio in corrispondenza degli spigoli maggiori di tali profili, non pienamente definiti a causa degli specifici e più numerosi *corner holes* (data la densità di orditura) e *shield holes* (influenzati dai componenti della passarella sia per gli agganci superiori sull'intradosso di copertura che per gli sbalzi grigliati di calpestio sul perimetro dell'incanniccato verso la muratura).

(7.41-7.45) Dettagli dei principali nodi strutturali analizzati nel sistema.

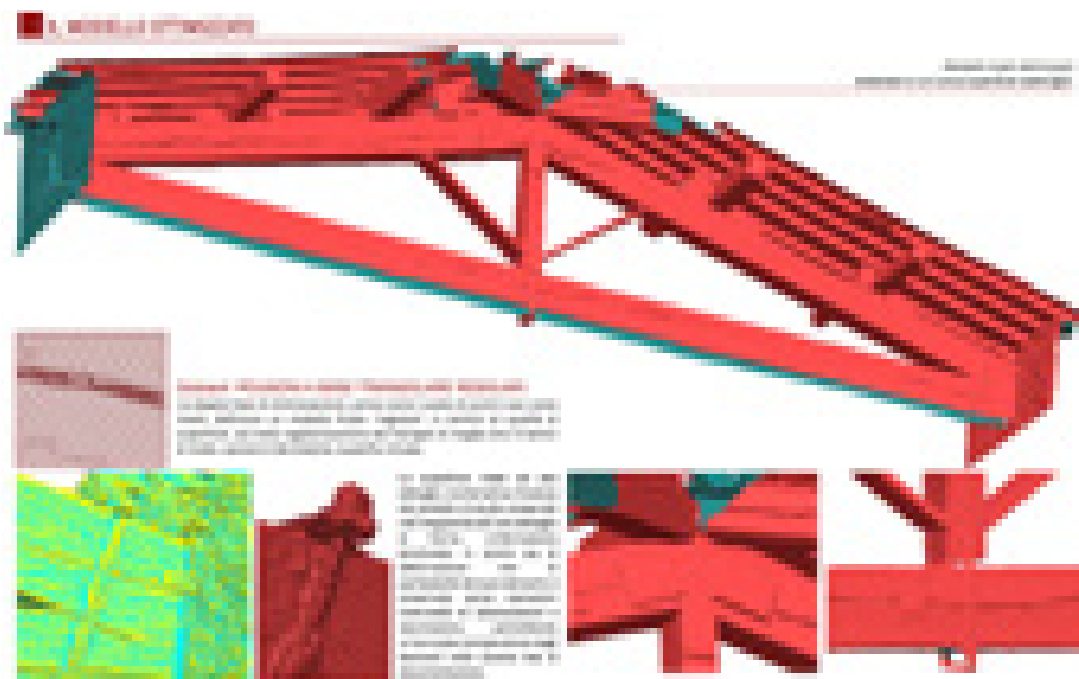




(7.46) Gestione dei dati morfo-metrici discontinui preliminare al processo di triangolazione. La frammentazione della ripresa si è riflessa in una parzializzazione estesa del dataset, sottoposta necessariamente ad un allineamento ottimizzato.



(7.47) La differente densità di dato riscontrata dall'unione dei punti delle diverse scansioni è stata regolata tramite operazioni di filtraggio e liscatura.

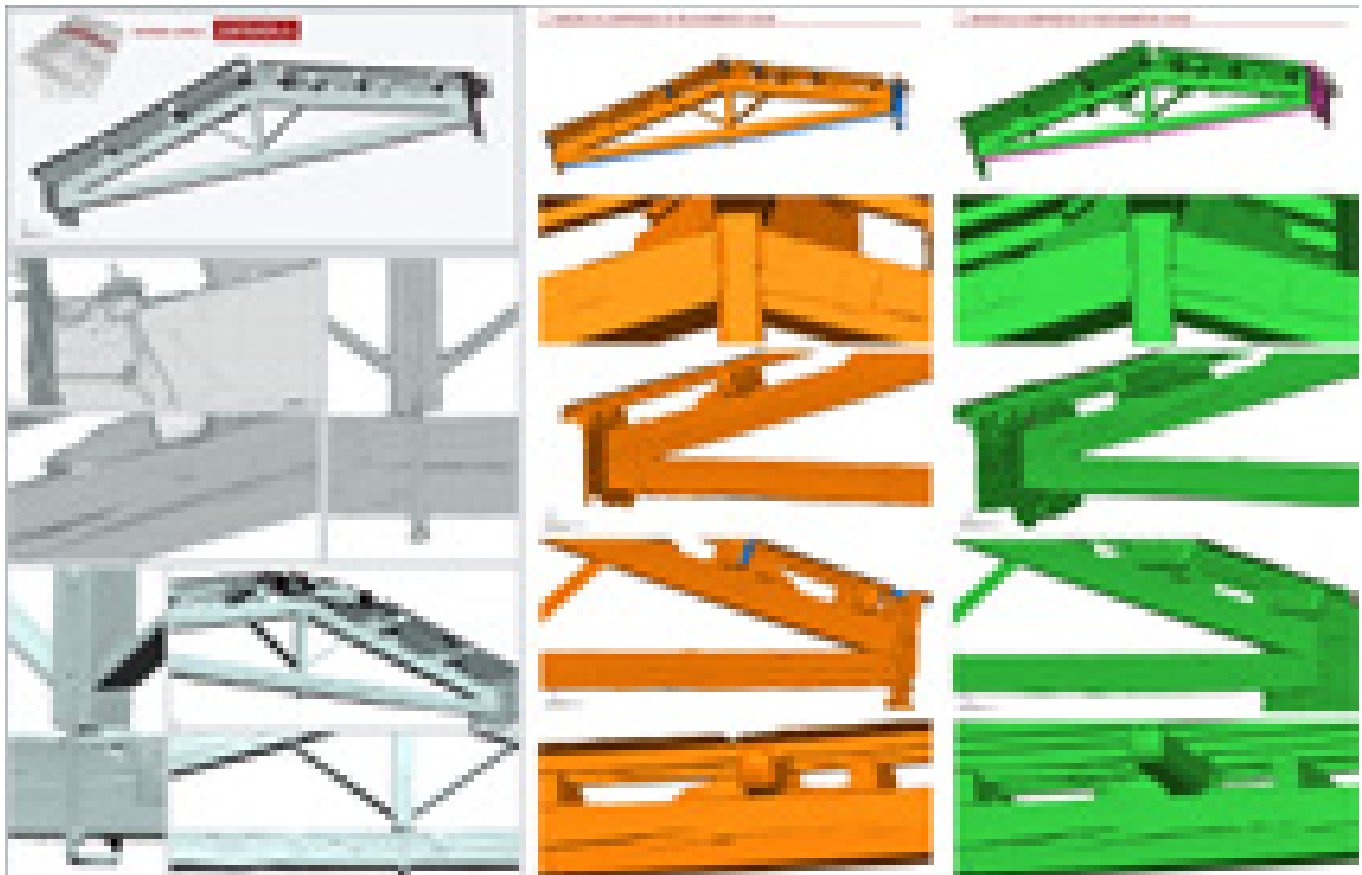
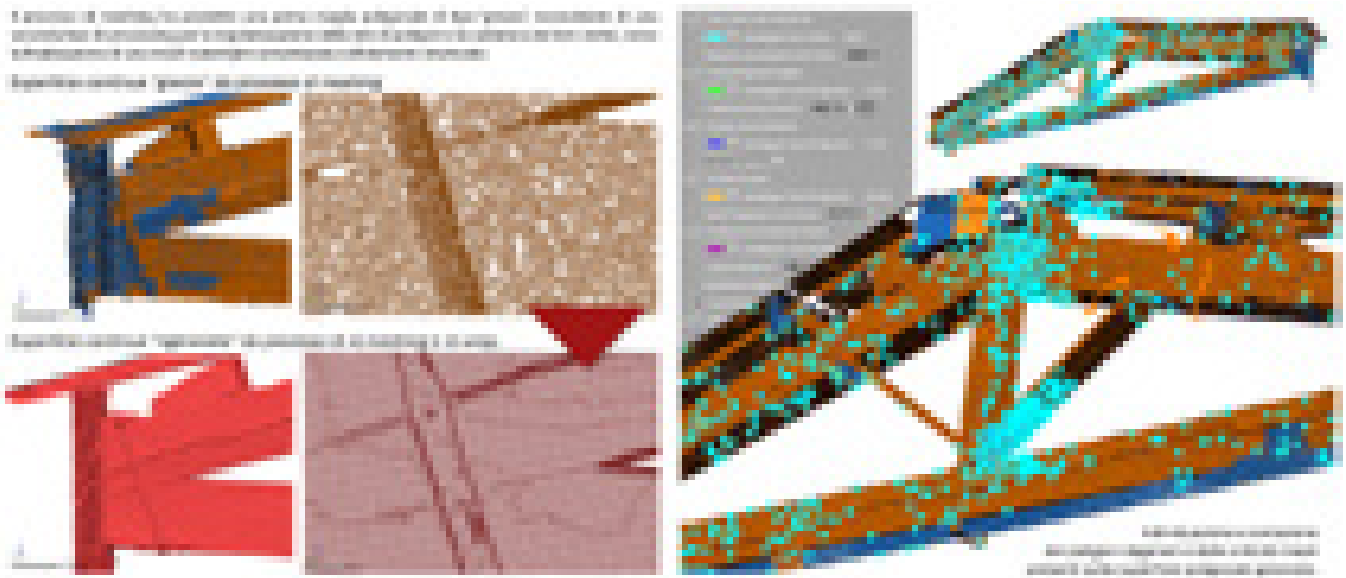


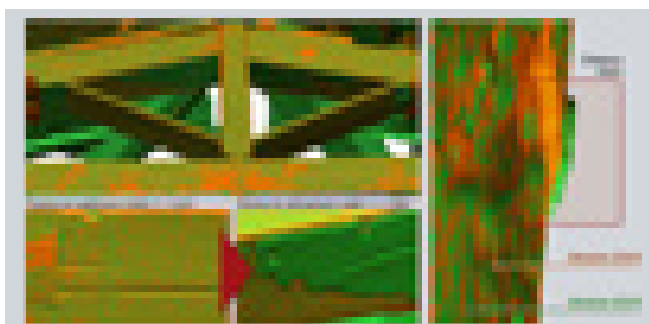
(7.48) Superfici mesh di dati morfo-metrici continui ottenuti dal processo di triangolazione.

Nella pagina seguente (7.49) Gestione delle superfici mesh per la correzione delle anomalie poligonali e la conservazione del dettaglio di forma.

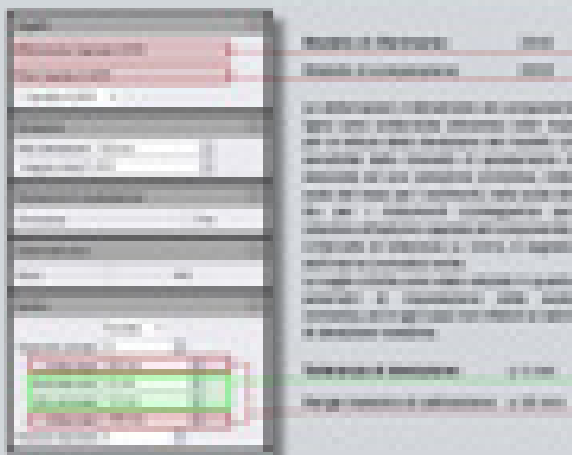
(7.50) Confronto tra mesh delle capriate rilevate nel 2016 e 2019.

Cap. 7 Replicabilità e declinazione del protocollo ottimizzato su casi studio tipologici di configurazione strutturale complesse

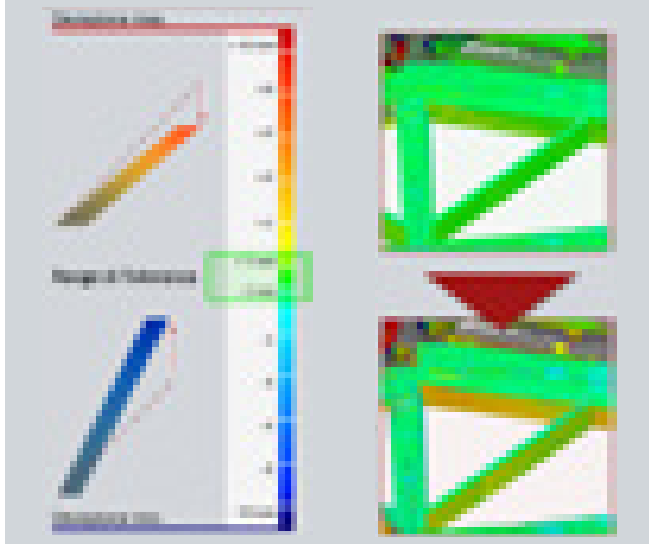




(7.51) Referenziazione delle superfici continue. Il distacco degli involuipi mesh permette di apprezzare qualitativamente le deformazioni.



(7.52) Attraverso la gradazione di una scala colorimetrica, è stata mappata la deviazione tra i modelli superficiali delle capriate.



Il caso studio, per il quale è stata riapplicata la metodologia di modellazione *mesh Reality-based* certificata nel progetto Basilea, ha permesso di derivare direttamente dal *database* discontinuo le unità di modellazione a singolo involucro delle capriate, potenziabili a superficie continua in configurazione *watertight*. In questo caso la diretta gestione dei punti ed il percorso di processamento per la triangolazione sono risultati più vantaggiosi per tempistiche ed aderenza morfologica delle più comuni modellazioni per sezioni fondamentali, solitamente perseguite nel caso delle strutture composte lineari anche con recenti progressi di ricerca nell'integrazione di algoritmi parametrici di estrusione dello *sweep* (superficie UV di involucro estrusa da profili *slice* su binario di congiunzione dei baricentri delle sezioni)⁷. Inoltre, hanno permesso di evidenziare condizioni locali di deformazione differenziale anche di intensità molto ridotta, vicina al millimetro, dovute a patologie di degrado puntuali degli elementi lignei in corso di sviluppo (ad esempio lungo puntoni e catena), che sarebbero state altrimenti trascurate dall'approssimazione di estrusione senza indirizzare opportune considerazioni di restauro e consolidamento.

Compiuto il passaggio di *dataset* dai punti 3D sparsi della nuvola complessiva alle unità di modellazione poligonale, regolarizzate nella triangolazione e gestione della superficie *mesh* in unità strutturali semantiche, è stata compiuta una comparazione tra i modelli della Fase 5-2016 e della Fase 7-2019, di evidente distacco differenziale. Il confronto è stato eseguito affidando ad una *color map* (blu-verde-rosso) la funzione di esprimere visualmente la correlazione tra intensità quantitative e regioni qualitative di deviazione tri-assiale tra le superfici dei componenti costruttivi modellati, in un'unica azione di calcolo. La soglia minima di tolleranza applicata è stata di 1 mm (relativamente sia all'errore garantito in fase di registrazione dei dati spaziali, sia alla lunghezza media di *edge* garantita in fase di modellazione). Gli estremi di valore critico dell'intorno di analisi sono stati valutati per iterazione ed impostati a 10 mm, secondo la deviazione massima riscontrata, per garantire una più coerente mappa cromatica.

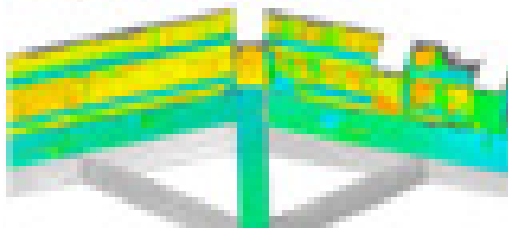
Nella pagina a fianco

(7.53) Capriata A. Analisi delle deformazioni plastiche attraverso la mappatura della deviazione tra i modelli superficiali mesh del 2016 e



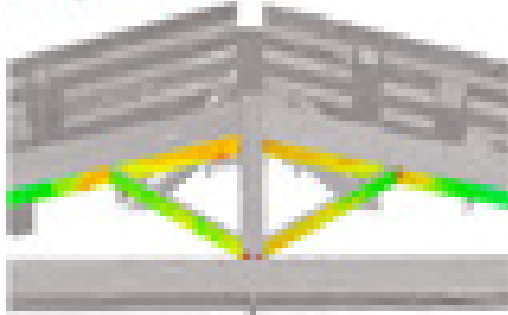
Componenti e dettagli

Model 14, Puntone - Lattina



Questo modello illustra la struttura di un tetto a traliccio, con i tralicci principali e secondari, e la loro connessione con la lattaia. La lattaia è rappresentata in grigio, mentre i tralicci sono in verde e giallo. La struttura è montata su un muro di sostegno.

Model 15, Puntone Sotto Lattina



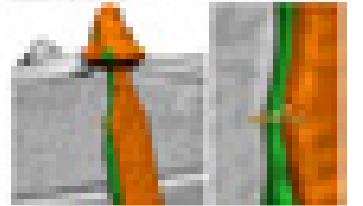
Questo modello illustra la struttura di un tetto a traliccio, con i tralicci principali e secondari, e la loro connessione con la lattaia. La lattaia è rappresentata in grigio, mentre i tralicci sono in verde e giallo. La struttura è montata su un muro di sostegno.

Componenti e dettagli

Model 14, Puntone - Lattina

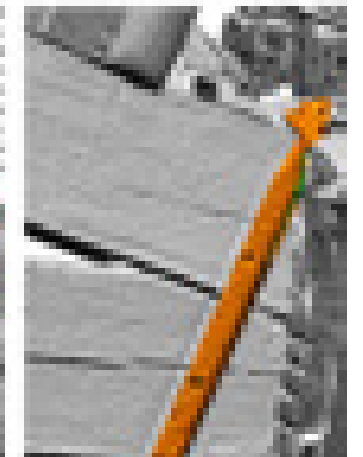


Questo modello illustra la struttura di un tetto a traliccio, con i tralicci principali e secondari, e la loro connessione con la lattaia. La lattaia è rappresentata in grigio, mentre i tralicci sono in verde e giallo. La struttura è montata su un muro di sostegno.

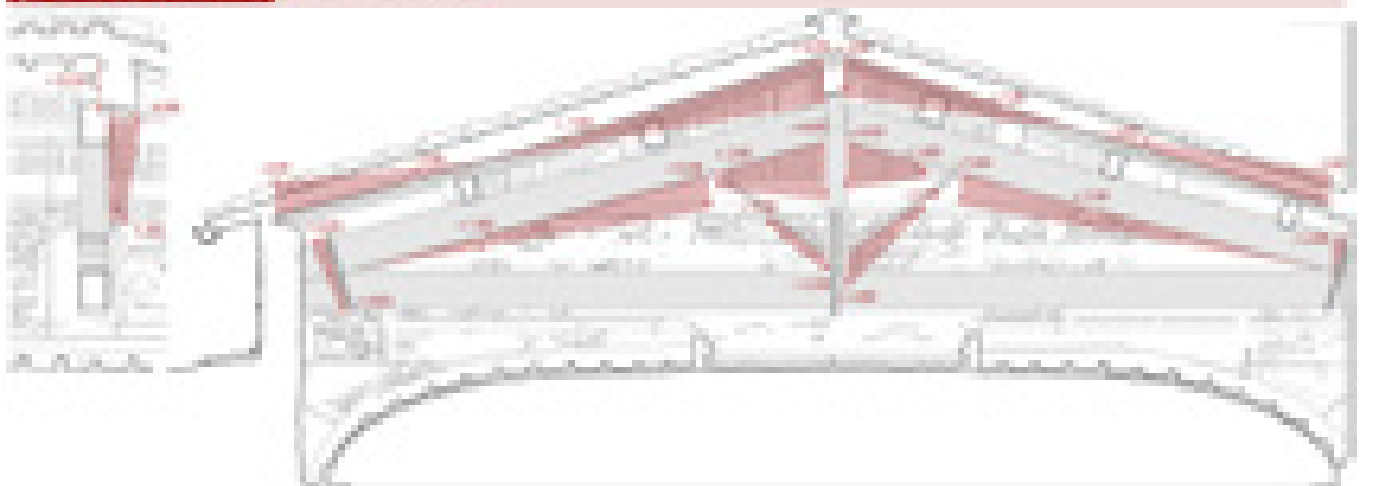


Model 15, Puntone - Lattina

Questo modello illustra la struttura di un tetto a traliccio, con i tralicci principali e secondari, e la loro connessione con la lattaia. La lattaia è rappresentata in grigio, mentre i tralicci sono in verde e giallo. La struttura è montata su un muro di sostegno.



Quadrato deformato



Raffaella De Marco

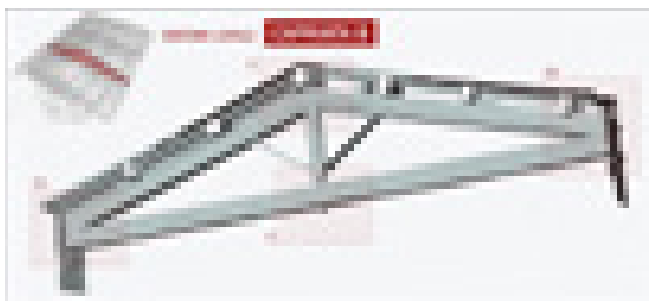
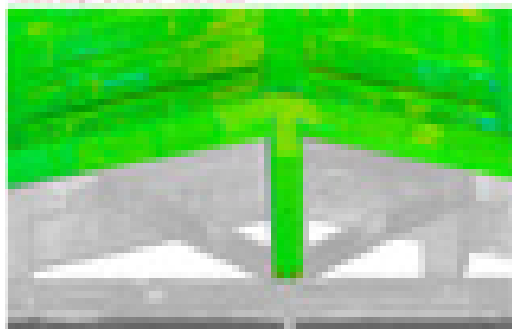


Fig. 14. Modellazione 3D del sistema traliccio.

Fig. 15. Risultati della simulazione.



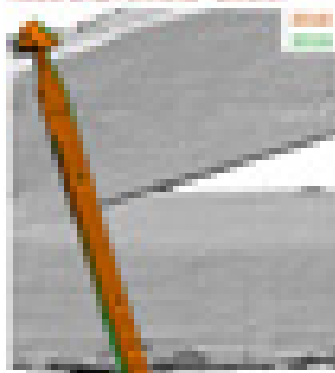
La simulazione è stata eseguita con il software ANSYS, che ha permesso di ottenere i risultati della simulazione in termini di spostamenti e sforzi. I risultati sono stati visualizzati in una scala di colori che va dal verde (basso sforzo) al rosso (alto sforzo). La simulazione ha evidenziato che il sistema traliccio è in grado di resistere alle cariche applicate con un livello di sicurezza adeguato.

Fig. 16. Risultati della simulazione.



Fig. 17. Modellazione 3D del sistema traliccio.

Fig. 18. Risultati della simulazione.



La simulazione è stata eseguita con il software ANSYS, che ha permesso di ottenere i risultati della simulazione in termini di spostamenti e sforzi. I risultati sono stati visualizzati in una scala di colori che va dal verde (basso sforzo) al rosso (alto sforzo). La simulazione ha evidenziato che il sistema traliccio è in grado di resistere alle cariche applicate con un livello di sicurezza adeguato.

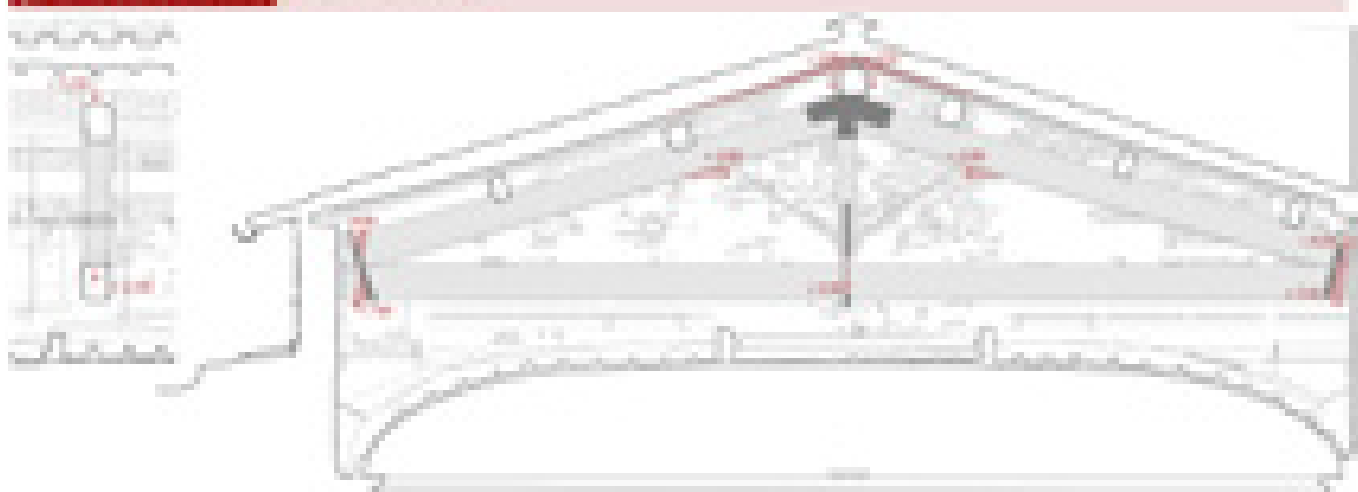


Fig. 19. Risultati della simulazione.

La simulazione è stata eseguita con il software ANSYS, che ha permesso di ottenere i risultati della simulazione in termini di spostamenti e sforzi. I risultati sono stati visualizzati in una scala di colori che va dal verde (basso sforzo) al rosso (alto sforzo). La simulazione ha evidenziato che il sistema traliccio è in grado di resistere alle cariche applicate con un livello di sicurezza adeguato.



Fig. 20. Risultati della simulazione.



I risultati dell'analisi hanno permesso di evidenziare un accentuato quadro deformativo per la capriata A: dalle proprietà morfo-metriche osservate, è stata ipotizzata una deformazione composta spaziale, con rotazione e cedimento del monaco al colmo, trasmesso alle saette (nodi 2 e 3) e conseguente scorrimento di puntoni e staffe all'appoggio (nodi 1a e 1b). La flessione fuori piano del monaco verso il perimetro trasversale (lato finestrato del blocco scala) non risulta ancora trasmessa ai punti (nella soglia di tolleranza ammessa). La capriata B presenta, seppur con minor intensità, un cedimento analogo del monaco al colmo, ma appare priva di fenomeni di flessione compiuti su scorrimento dei puntoni e ribaltamento del monaco.

Analoghe analisi di deviazione sono state condotte sulle superfici modellate del macrosistema di interazione copertura-volta, in particolare sui due cantonali e sull'estradosso di centine e canniccio, in corrispondenza della porzione est della volta. In tal caso la modellazione, pur non raggiungendo qualità ottimali di continuità della *mesh*, è risultata sufficiente alle esigenze di diagnosi per l'analisi dell'orditura primaria della copertura (priva di *holes*) e dell'intradosso in canniccio (non alterato morfologicamente in corrispondenza dei nodi di analisi).

I cantonali A e B sono vincolati al colmo alla capriata A, dalla quale ricevono coerente cedimento (nodi S1CA, S1CB) poi distribuito per tutta la lunghezza fino all'appoggio sulla muratura portante (nodi S3CA, S3CB). Il cedimento interessa così anche il punto di ancoraggio dei tiranti alla volta (nodi S2CA, S3CB), motivando un coerente abbassamento della stessa non più contrastato dalla tensione dei cavi (nodi S2A, S2B).

L'analisi morfologica 3D ha così permesso di correlare le criticità deformative della volta in canniccio a più complessi meccanismi cinematici della struttura di copertura, indirizzando le linee di intervento verso un programma di restauro e consolidamento più esteso interessante l'intera opera di estradosso.⁸

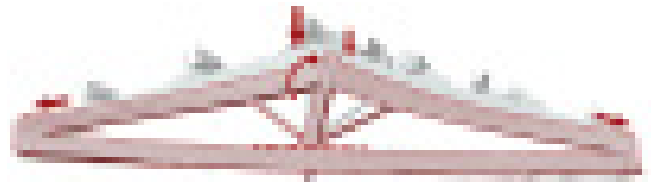
Nella pagina a fianco

(7.54) Capriata B. Analisi delle deformazioni plastiche attraverso la mappatura della deviazione tra i modelli superficiali mesh del 2016 e 2019.

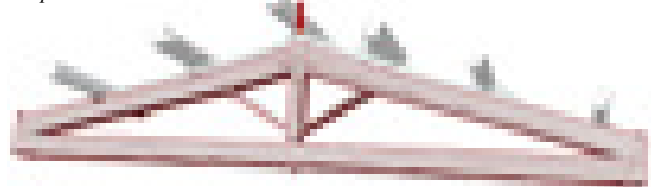
In questa pagina

(7.55) Schema logico dei processi meccanici di cedimento in corso nella struttura di estradosso dello Scalone Lorenese.

Capriata A



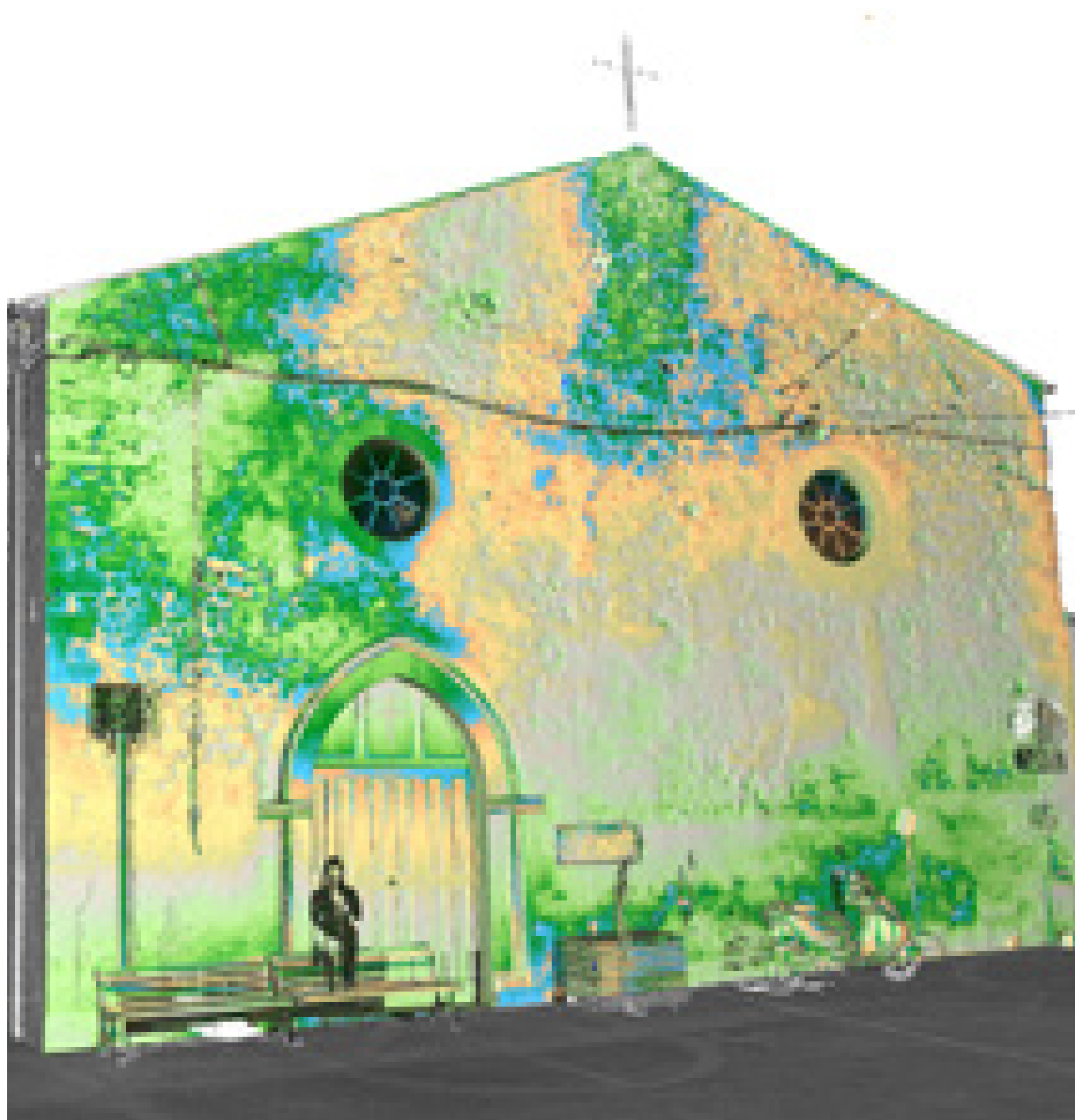
Capriata B



Interazione Capriata A-Volta



Vista della nuvola di punti della Chiesa di San Giovanni Battista a Campli, con applicata una mappatura colorimetrica della deviazione delle porzioni di danno.



7.2 L'UNITÀ RESISTENTE

MODELLAZIONE E ANALISI DI EMERGENZA NEL CONTESTO ARCHITETTONICO TERREMOTATO DI CAMPLI (TERAMO, ITALIA)

Il contesto del Centro Italia è stato scenario di notevoli collassi e quadri di instabilità del suo patrimonio storico costruito a seguito della sequenza sismica del 2016-2017, sviluppatasi nella faglia appenninica a cavallo tra le quattro regioni di Lazio, Umbria, Marche ed Abruzzo⁹. In tali zone colpite le strutture in muratura costituiscono una porzione significativa del costruito esistente, adottate prevalentemente per tipologie residenziali del tessuto insediativo diffuso ma anche declinate all'interno di complessi religiosi e chiese, in un patrimonio territoriale esteso per oltre 30.000 kmq.

Questi complessi, solitamente meno stratificati rispetto alla maglia urbana, forniscono la presenza di murature e sistemi costruttivi di più lunga datazione, raramente interessati da interventi di consolidamento nella vita della fabbrica. Una caratteristica che si unisce alla specifica morfologia distributiva degli ambienti, costituiti da ampie aule a doppia altezza prive di murature intermedie o orizzontamenti. La mancanza di diaframmi interni esalta in tal caso il comportamento snello dei maschi murari rispetto alle strutture degli edifici ordinari, e l'eventuale presenza di archi o volte porta all'insorgere di spinte ed altri effetti trasversali decretando una maggiore vulnerabilità dei paramenti ai caratteristici meccanismi fuori piano indotti dalle forze sismiche¹⁰. Il risultato è quello di effetti di elevato danno sul patrimonio costituito dalle chiese rurali, caratterizzate da una ricca varietà di materiali, tipologie, dimensioni e stili, con il verificarsi di danni spesso maggiori rispetto agli aggregati residenziali in collassi totali o parziali.

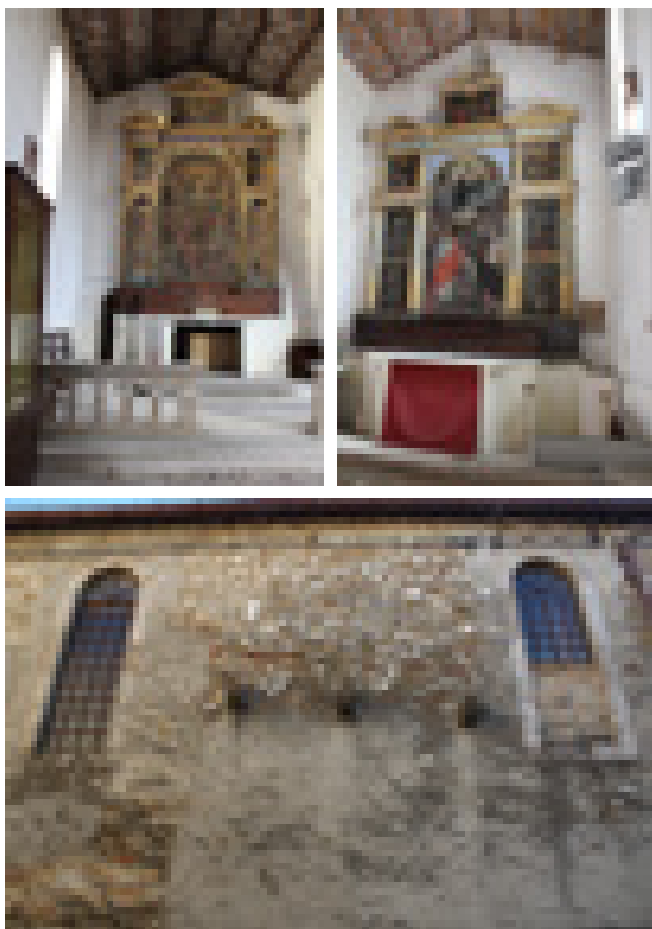
La Chiesa di S. Giovanni Battista a Castelnuovo, frazione di Campli, si inserisce in tale contesto come complesso religioso rurale dell'antico borgo fortificato trecentesco, gravemente danneggiato dal sisma nel 2016. La chiesa, istituita nel 1123 e "Rettoria" nel 1370, è stata rinnovata con la presente fabbrica alla fine del XV secolo e si trova nei pressi della "porta Angioina"¹¹ delle antiche mura (XII secolo), dotata di torre di guardia successivamente convertita in torre campanaria. Il complesso presenta una

copertura a capanna, con facciata semplice sulla quale è collocato un portale medievale a sesto acuto decentrato (XIV secolo) e due finestre ad oculo. Originariamente documentata con una planimetria composta da tre navate



Sopra (7.56) facciata principale di ingresso del complesso di San Giovanni Battista, affacciato dalla Porta Angioina e dalla Torre Campanaria. Sotto (7.57) interni della chiesa, con setto murario intermedio di suddivisione delle navate.





(7.58-7.59) Altari lignei della chiesa e conservazione post-sisma.
(7.60) Tessitura muraria e mensole esterne di testimonianza del precedente assetto planimetrico del complesso.
(7.61) Porta Angioina di Campli e adattamento della torre di guardia a torre campanaria.

trasversali a più campate¹², modificate nel XV secolo, oggi l'interno si presenta come un'aula unica bipartita da un setto murario longitudinale, a sua volta dotato di due arcate a tutto sesto di collegamento tra le navate, ugualmente ampie, a terminazione rettilinea e prive di absidi. In corrispondenza dell'ingresso sono collocate due edicole con volte a crociera, sorrette su un lato da colonne in pietra e poggianti nell'altro al paramento murario di facciata. Nella parte posteriore della parete sinistra, aggiunta alla fine del XV secolo e conglobata con la porta Angioina, è collocata la torre campanaria. La copertura è realizzata con capriate lignee a vista, direttamente poggianti sul perimetro murario e sul setto intermedio, e con pianelle, decorate con un ricco apparato di motivi geometrici policromi, mentre l'interno è arricchito da affreschi quattrocenteschi ed altari lignei della seconda metà del XVI secolo.

7.2.1. Il quadro di indagine in sito e la richiesta conoscitiva

Le ripercussioni dell'evento sismico del 2016 sul territorio nazionale, ed in particolare nell'area teramana, hanno interessato un vasto numero di realtà comunali con una nuova disciplina per la regolamentazione del processo di intervento e ricostruzione nei nuclei urbani colpiti dal cratere¹³, legata a programmi preliminari di adeguata valutazione e documentazione delle vulnerabilità edilizie presenti nelle fabbriche storiche. I lavori di ricostruzione hanno così visto un risanamento prevalentemente legato all'edilizia privata, mentre i monumenti e le chiese sono rimasti bloccati ad azioni di prima messa in sicurezza e puntellamento delle strutture murarie danneggiate. Su tale fronte, il caso del comune di Campi è risultato di particolare rilevanza, anche in

merito ai dissesti geologici propri del rilievo sul quale sorge l'insediamento, caratterizzati negli ultimi anni da frequenti frane massicce a ridosso della gravina¹⁴ sulla quale la Chiesa di S. Giovanni Battista si affaccia direttamente.

I sopralluoghi preliminari al complesso religioso¹⁵ hanno evidenziato ad un primo riscontro lesioni sia superficiali che passanti sui paramenti murari interni ed esterni e sulle arcate del setto intermedio, oltre a danni localizzati nei capochiave delle catene attraversanti longitudinalmente le aule¹⁶. È stato così possibile ipotizzare la direzione di scuotimento del sisma, concentrata longitudinalmente rispetto al corpo della struttura, ma non avanzare ulteriori valutazioni su caratteri di qualità e quantità di resistenza degli apparati del complesso. Le documentazioni, operate con la raccolta di archivi fotografici delle lesioni e compilazione della scheda ministeriale per l'emergenza post-sisma "Rilievo del danno ai Beni Culturali – Chiese"¹⁷, hanno evidenziato la mancanza di più estesi supporti di rappresentazione unificata e referenziata dei quadri di danno subiti dal complesso, non permettendo di elaborare adeguati progetti di consolidamento.

La limitazione di tale materiale raccolto, pensato in una logica sia di *report* analitico dell'esame speditivo che come dato disponibile ad ulteriori e più sensibili indagini ed alla didattica formativa, è risultata dai ridotti tempi di permanenza dalle squadre di emergenza sui siti post-evento, legati al rispetto di condizioni di sicurezza degli operatori all'interno delle strutture danneggiate. La durata media consentita nei sopralluoghi, non superiore ai 40' all'interno dell'area di buffer critico del sito, pur con la dotazione di dispositivi standard di sicurezza personale, non ha permesso di operare manualmente una documentazione standard più estesa di quella fotografica, limitando in tal mondo sia il processo conoscitivo che la restituzione informativa auspicata per l'avanzamento di consapevoli quadri di intervento. In particolare, il grado di informazione richiesto dalla documentazione risulterebbe attinente a più dettagliate conoscenze in termini di localizzazione e quantificazione dei meccanismi di danno sviluppati sulle strutture. Un approfondimento che è mirato ad una valutazione di quadri plastici o cinematici in corso che possano influenzare la diagnosi della fabbrica costruttiva su un triplo livello di preservazione del danno incrementale, sicurezza nell'uso del complesso e pianificazione delle risorse per il consolidamento e restauro¹⁸.

All'interno della collaborazione tra la Fondazione EUCENTRE ed il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia, l'obiettivo della ricerca è stato quello di affiancare i tecnici del gruppo di Supporto all'Emergenza¹⁹ per valutare opportuni iter di documentazione digitale esaustiva in sito in condizioni di emergenza del danno post sisma. Nella sperimentazione sul sito di S. Giovanni Battista a Campli, l'attenzione è stata rivolta a valutare i gradi di completezza e sufficienza nella copertura e precisione di informazione attraverso le diverse pratiche metodologiche di documentazione, calibrando sia i tempi contenuti di acquisizione del dato in sito che revisionandone la qualità conseguita e la sua adeguatezza, con lo sviluppo di letture diagnostiche dei paramenti e volumetrie murarie e la progettazione di strumenti divulgativi per la loro referenziazione e comunicazione.



(7.62-7.64) Operazioni di rilevamento sul campo e training degli operatori di EUCENTRE sulla pianificazione di campagne speditive di documentazione digitale. La strategia di acquisizione da laser scanner terrestre è stata modulata su tempistiche ridotte di scansione dello strumento, pianificando la poligonale di ripresa su postazioni chiave di collegamento dei dati morfo-metrici.

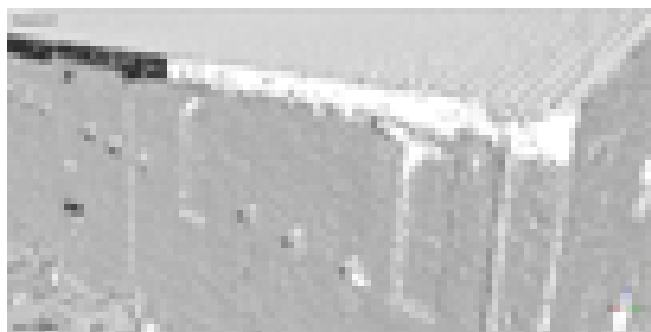
7.2.2. L'azione di documentazione: fast e slow survey a confronto

La campagna di documentazione digitale ha visto l'applicazione congiunta di un'ampia gamma di strumenti di acquisizione morfologica metrica, con sensori sia LiDAR che RGB, e fotografica, aerea e terrestre, pianificati secondo un doppio protocollo di applicazione: da un lato espletando una mappatura globale del complesso di S. Giovanni Battista rimanendo all'interno di *slot* temporali di 40' di permanenza massima sul sito, come sperimentazione di *fast survey*; dall'altro garantendo un prototipo *standard* di archivio digitalizzato di raccolta dei dati geometrici, in modalità *slow survey*, sul quale operare le verifiche di certificazione. A fronte di tale programma, alcuni strumenti sono risultati più funzionali alle richieste di spedività del rilievo, per la manovrabilità facilitata, l'automatizzata acquisizione e il *processing* dei dati, in quanto già predisposti a metodologie dinamiche di ripresa. È il caso delle camere aeree montate su drone UAV, per la documentazione fotografica e fotogrammetrica referenziata con sensori GPS, e degli scanner LiDAR *mobile*, adoperanti sistemi inerziali IMU e di riconoscimento ottico per la registrazione in movimento dei dati spaziali. L'uso di camere per la ripresa sferica a 360° ha inoltre fornito un veloce supporto per la mappatura RGB degli ambienti e l'ispezione virtuale.

Per la rimanente strumentazione, costituita da laser scanner statico, camere terrestri e su aste telescopiche, l'applicazione ha previsto particolari sperimentazioni in termini di calibrazione di intervalli e qualità di ripresa. La riduzione dei tempi di documentazione è stata operata a scapito di una necessaria limitazione della qualità dell'informazione raccolta, sia come densità che come copertura ed affidabilità, favorendo però la valutazione di accorgimenti chiave e calibrazioni minime per la garanzia di un sufficiente grado di rilevamento sulle strutture danneggiate.

(7.65) Piano di volo da camera aerea Phantom 4 Pro e nuvola di punti densa dalla ricostruzione fotogrammetrica. Il chunk conta 160 foto eseguite a tre livelli di altezza, con raggio variabile centrato sull'edificio della chiesa.

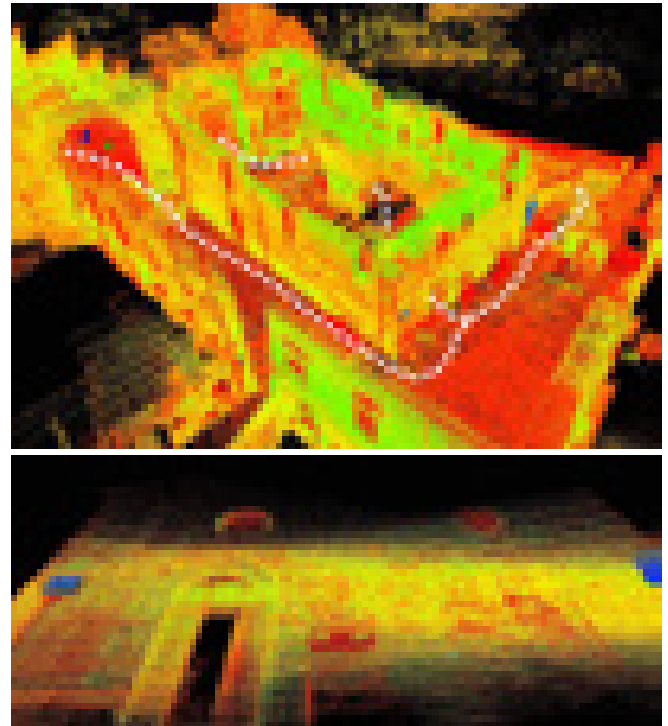
(7.66) Scorcio di ripresa del piano di volo dell'UAV ed incompletezza del dato da fotogrammetria aerea per la copertura totale della struttura.



Ripresa fotogrammetrica aerea da drone. La campagna di ripresa da camera aerea è stata focalizzata sul complesso della chiesa e della Porta Angioina. Considerate le quote elevate di sviluppo delle murature principali (9,5 metri per il corpo della chiesa, 19 metri per la torre campanaria), non adeguatamente nitide nella ripresa da terra, sono stati applicati sul campo due diversi droni per fotogrammetria: DJI Phantom 4 Pro, con piano di volo semi-automatizzato, e DJI Spark, con volo e scatto manuale.

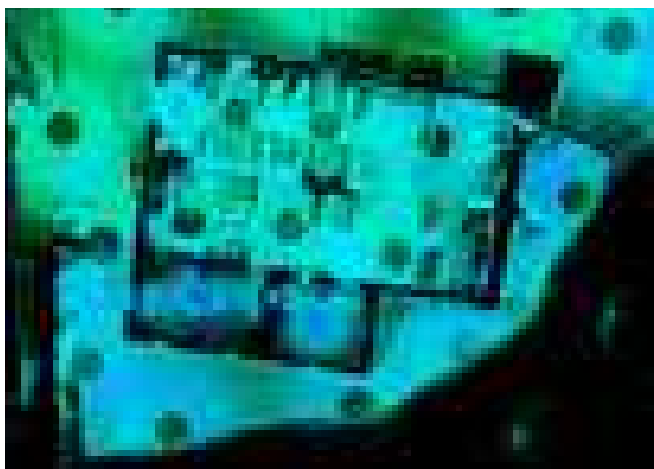
Le riprese totali, contenute in 35' di rilievo standard sul campo, hanno incluso 4 missioni di volo. La prima, eseguita con DJI Phantom 4 Pro per 5', si è concentrata su scatti zenitali e radiali di inquadramento del complesso integrati da un piano di volo su "Punto di Interesse", automatizzato da app di controllo ed impostato secondo un centro ed un raggio di distanza gradualmente calibrato per ampiezza e quota, così da definire una traiettoria di ripresa a spirale attorno all'edificio. La seconda missione è stata eseguita con un volo manuale del DJI Spark da 10' a copertura totale di dettaglio della torre campanaria. Il cambio di strumento è stato necessario a causa dell'elevata vicinanza richiesta tra camera e oggetto di rilievo, garantita in termini di sicurezza dalla migliore manovrabilità e dalla dotazione di para-eliche del DJI Spark. La scelta è avvenuta a scapito dell'assenza di automatismi di controllo durante il volo rispetto al DJI Phantom 4 Pro, con tempi più estesi di pilotaggio e scatto. Le stesse motivazioni hanno imposto l'uso del DJI Spark anche per la terza e quarta missione di volo (10' ciascuna), per la documentazione di alcuni scatti e video di dettaglio delle coperture e delle porzioni murarie in quota sia all'esterno del complesso che nei suoi locali interni. I dati raccolti sono confluiti sia in un archivio complessivo di mappatura del complesso che nell'elaborazione di modelli fotogrammetrici 3D SfM, fondamentali per l'integrazione dei dati in quota sulle superfici del complesso rivolte verso la gravina, mentre gli altri paramenti verticali sono risultati più oscurati dal denso tessuto costruito dell'intorno.

Acquisizione dinamica morfo-metrica da LiDAR Mobile. La sperimentazione di una campagna di acquisizione metrica speditiva, più adeguata alle esigenze del progetto di documentazione, è stata pianificata sfruttando la disponibilità di soluzioni innovative LiDAR *mobile* maneggevoli da un operatore, sia in esterno che in interno,



(7.67) Nuvola di punti da LiDAR mobile KAARTA Stencil, con traiettoria di acquisizione chiusa attorno al perimetro esterno ed interno della chiesa. (7.68) La copertura della nuvola è contenuta fino a circa 5 m di altezza, a causa del raggio di acquisizione dello strumento ed agli spazi contenuti del tessuto urbano denso, limitanti la manovrabilità del laser.

svincolate da veicoli di supporto²⁰. È stato adottato un LiDAR Stencil KAARTA, con localizzazione e mappatura simultanea SLAM. Disponendo una traiettoria di acquisizione che garantisca un circuito chiuso focalizzato sul complesso strutturale, per una miglior compensazione della poligonale di controllo della deviazione di dato sugli spazi esterni ed interni, l'attività standard in sito ha previsto in 10' l'intera scansione 3D degli ambienti e delle superfici murarie. Le limitazioni strumentali hanno riguardato il campo visivo di ripresa (360° orizzontale FOV, -15°/+15° verticale FOV), con assenza di dato nelle porzioni più elevate dei paramenti (da circa 5 metri di quota per la densità degli isolati circostanti), e la conformazione specifica dei percorsi di acquisizione, interrotti esternamente nella porzione dell'abside e necessariamente integrati alla traiettoria interna.



Acquisizione statica morfo-metrica da Terrestrial Laser Scanner. Le operazioni di rilevamento da laser scanner statico hanno costituito una delle azioni chiave di *slow survey* riadattata in metodo *fast* con la calibrazione dell'uso strumentale alle specifiche di speditività richieste. I tempi di acquisizione dello scanner, in tal caso FARO CAM2 Focus S150, sono stati rimodulati tenendo in considerazione la necessità di garantire una poligonale composta da minime e specifiche postazioni di scansione valutate in sopralluogo, per una copertura delle geometrie e superfici dei paramenti murari tale da consentire un'informazione sufficiente alla conoscenza del dominio fisico delle strutture portanti.

La calibrazione dello strumento è stata effettuata in 3 varianti in termini di densità, qualità e supporto colorimetrico del dato acquisito. L'acquisizione *fast* ha previsto 34 scansioni fondamentali, tra ambienti esterni ed interni, conseguite con i minimi parametri di qualità dello strumento. La campagna ha impiegato 40' di attività sul campo, con scansioni di durata media di 1.13' a risoluzione 4x e raggio globale (122.000 punti/sec). Successivamente, l'acquisizione è stata replicata in modalità *slow*, secondo la procedura standard di documentazione, impiegando 80' per 30 scansioni di durata media di 2.54', ridotte grazie alla maggiore densità a distanza di ogni singola scansione per le esigenze di registrazione (488.000 punti/sec).

In aggiunta, una campagna limitata agli ambienti interni è stata eseguita integrando il dato metrico con informazione RGB combinata, con un tempo di scansione ad elevata densità di 5.54' oltre a 4.00' di acquisizione fotografica, per un totale di 40' di attività sul campo necessari a 4 scansioni (976.000 punti/sec).

La campagna di rilevamento da Terrestrial Laser Scanner si è dimostrata la più funzionale per la valutazione di fenomeni di deformazione e lesione sui paramenti del complesso. La qualità di dato raccolto, conseguito in modalità sia speditiva che standard, ha permesso di acquisire un'informazione morfologica delle crack adeguatamente dettagliata da essere comparata con la campagna fotografica, eseguita in modo specifico sui singoli quadri fessurativi.

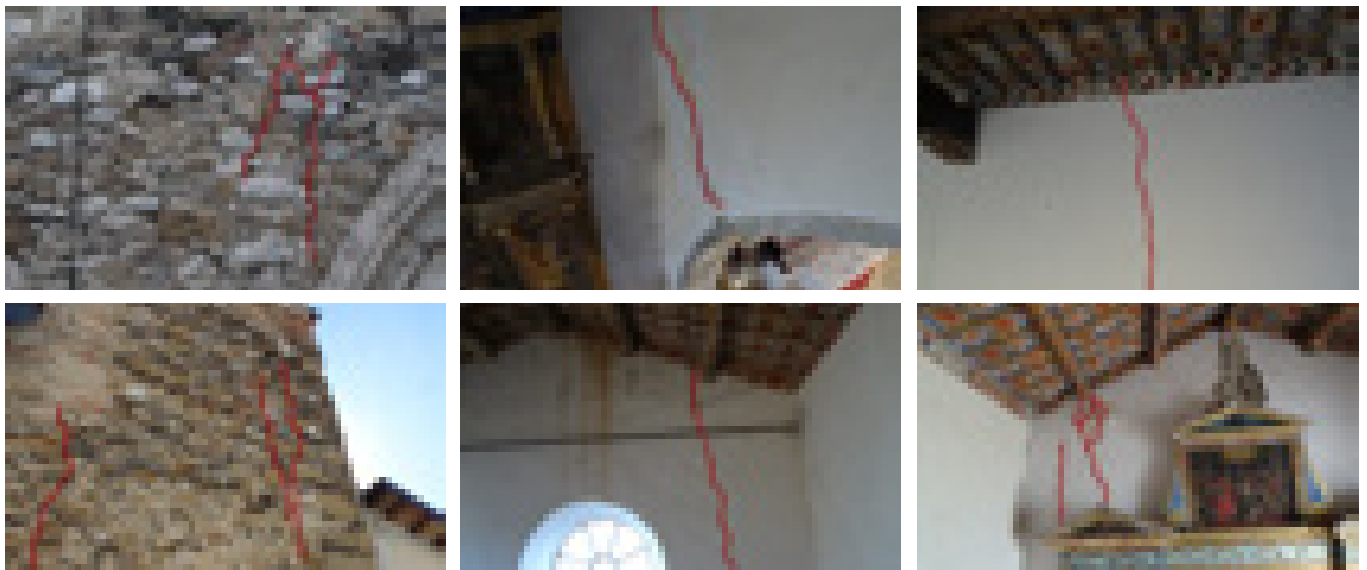
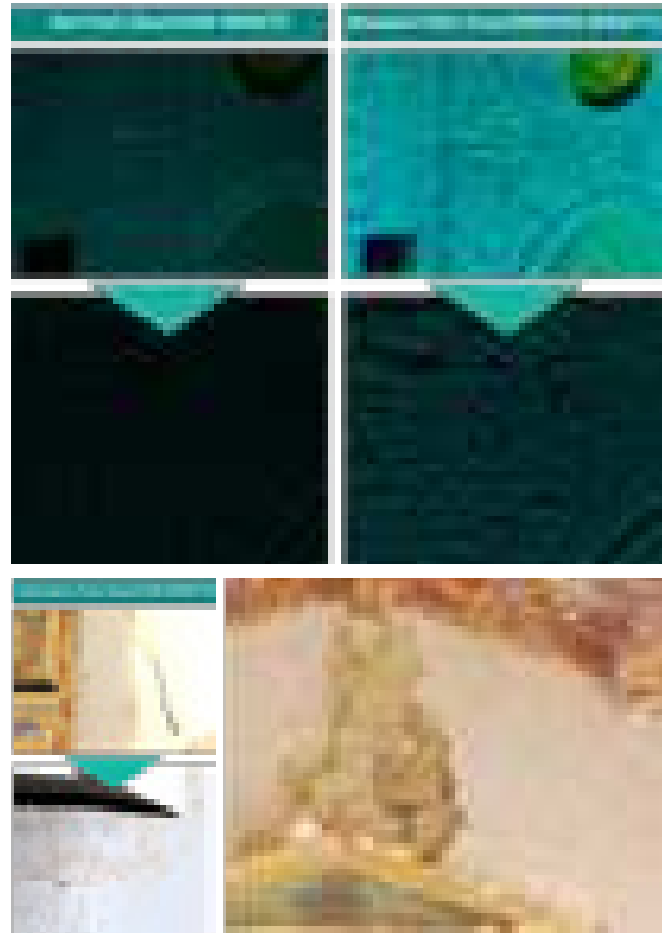
Nella pagina a fianco: (7.69) postazioni di acquisizione chiave a garanzia della completa copertura del complesso.

(7.70) vista complessiva della nuvola di punti da TLS.

In questa pagina, dall'alto: (7.71) qualità di dato a confronto tra modalità fast e low survey.

(7.72) dettaglio della nuvola di punti con dato RGB sulle lesioni interne.

(7.73) mappatura fotografica delle singole crack verificate sull'apparato strutturale in sito.

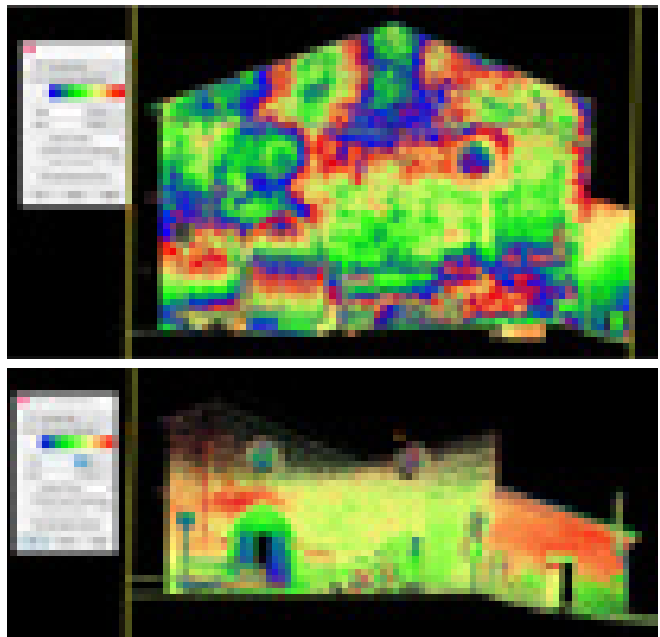


Campagna fotografica delle lesioni con camere reflex e telescopiche. La campagna fotografica è stata limitata alla finalità di mappatura del quadro di lesioni osservato sui paramenti murari. L'atlante raccolto è stato classificato secondo la tipologia superficiale o passante di lesione, la cui diagnosi valutata inizialmente sul sito è stata rivista secondo le informazioni dedotte dai database digitali raccolti e post-prodotti. L'acquisizione con camera *reflex* da terra è risultata la più speditiva (10" secondi a scatto), ma limitata alle porzioni inferiori di superficie, mentre l'adozione del sistema 3D Eye con asta telescopica in sommità ha integrato gli scatti a quote tra i 3 e i 10 m seppur prolungando i tempi di disposizione, inquadramento e ripresa della porzione di interesse (1' per predisporre ogni scatto).

Acquisizione del materiale fotografico orbitale. Le attività di acquisizione fotografica sono state integrate da scatti orbitali eseguiti con Ricoh Theta 360° Panoramic Camera. Il materiale raccolto ha costituito ulteriore riferimento globale per il controllo della mappatura e dell'intensità delle lesioni, oltre all'impostazione di un tour virtuale a scopo didattico utile alla rappresentazione dei danni attraverso la definizione di un linguaggio digitale dinamico.²¹ I 30 scatti raccolti hanno previsto, tra il posizionamento del tripode di supporto e l'inquadramento, circa 1' ciascuno.

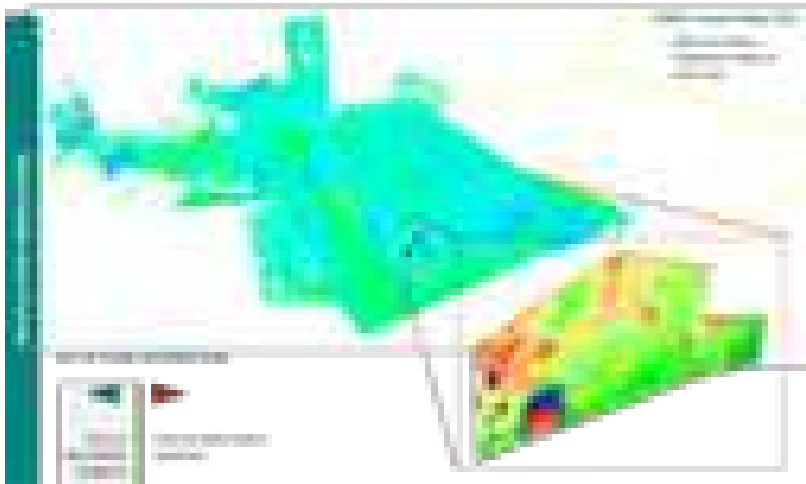
I database raccolti, elaborati in una prima forma spaziale discreta, sono stati referenziati su un sistema UCS comune e comparati per valutarne l'efficacia di espressione delle caratteristiche morfologiche di danno. La nuvola di punti *slow survey* da laser scanner terrestre è stata adottata come riferimento di *gold standard*, costituendo una base di estrazione dei quadri di *elevation map* successivamente comparati con quelli degli altri prodotti digitali di acquisizione.

Il confronto ha evidenziato come il dato *fast survey* eseguito speditivamente da laser scanner statico soddisfi la soglia di densità di punti sufficiente per la corretta mappatura cromatica delle porzioni fuori piombo, equivalendosi al metodo standard sia in localizzazione spaziale che in intensità computata di deformazione meccanica. Al contrario il dato ottenuto da KAARTA mobile si è dimostrato poco efficace per le letture di danno eseguite sulla *point cloud*, sia in termini di sua incompletezza (particolarmente estesa nei coni di ripresa dovuti alle ridotte manovre strumentali nel contesto del

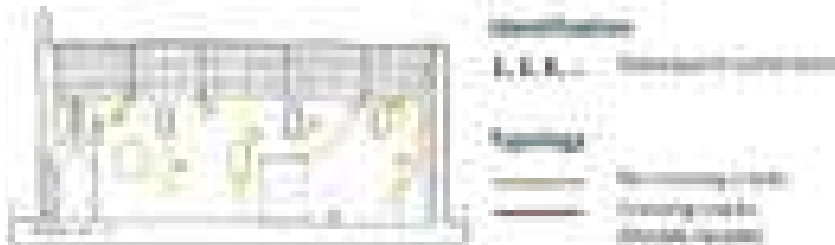


Sopra: (7.74) *Elevation map da nuvola di punti low density: la qualità del dato si presta adeguatamente anche a range di tolleranza di 1 mm, ma la frammentarietà della color map ne compromette la lettura.*
Sotto: (7.75) *Elevation map da nuvola di punti da KAARTA: i valori di deformazione risultano amplificati, oltre alla mancanza di dato nelle porzioni di elevazione.*

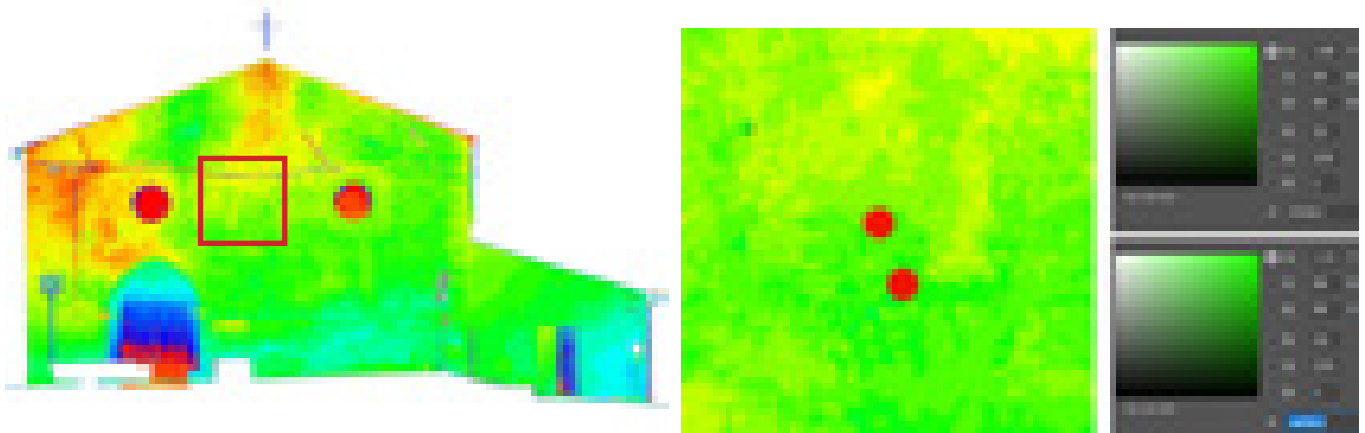
tessuto urbano denso) che come eccessiva approssimazione strumentale delle coordinate metriche, raccolte in un intorno di dispersione tale da alterare sensibilmente per l'interesse strutturale la lettura quantitativa dei valori di *drift* corrispondenti ai blocchi cinematici (raggio max di incertezza di ± 5 cm rispetto alla superficie media reale)²². Per quanto riguarda la documentazione da UAV, la nuvola di punti generata ha garantito un'aderenza maggiore al rilievo statico di riferimento (nell'intorno di $\pm 1,5$ cm), ma ha dimostrato una criticità estesa di dettaglio morfologico sulle superfici verticali dei fronti, a causa della limitazione di volo del drone imposta dagli edifici circostanti e dalla ridotta ampiezza di spazi aperti attorno alla chiesa. Nell'applicazione al contesto del tessuto urbano denso, il database morfo-metrico SfM ha così dimostrato un fondamentale contributo per il monitoraggio fotografico delle lesioni nelle porzioni in elevato e di copertura, ma limitate possibilità di ricostruzione globale del complesso architettonico come singola soluzione di ripresa.



(7.76-7.80) Le elevation map sono state elaborate per tutte le superfici principali della struttura muraria, evidenziando fenomeni di deformazione e cedimento coerenti con il quadro fessurativo mappato in sito. La corrispondenza di crack superficiali o passanti ha permesso di identificare i blocchi rigidi di instabilità, definendone le curve di delimitazione.



(7.81-7.82) Apparentemente delimitate dalla variazione di tonalità blu-verde-rosso, le porzioni di deformazione hanno dimostrato una difficile lettura del perimetro di faglia a causa della troppa estesa scala colorimetrica, con 40 tonalità di gradazione tra le cromie principali. Tale variazione è stata confermata anche dall'interrogazione delle color map con palette digitali, comparando i valori RGB sul prelievo colore in due punti visivamente appartenenti alla stessa zolla di deformazione. E' risultato come, in caso di complessa calibrazione, l'elevation map generi una difficoltà di lettura immediata da immagine dell'estensione delle aree di danno, legata alla sensibilità di distinzione dei colori dall'occhio.



7.2.3. La modellazione come metodo di certificazione ed affinamento di valutazione meccanica per l'esigenza diagnostica dell'unità resistente

Le *elevation map* estratte dal database discontinuo hanno garantito una prima lettura identificativa delle porzioni murarie interessate da meccanismi di collasso. In termini di localizzazione e rapporto con i comparti strutturali presenti, sono state però evidenziate distribuzioni incoerenti delle tensioni, definendo un quadro di redistribuzione delle sollecitazioni differente rispetto alla previsione comportamentale dell'attuale fabbrica muraria.

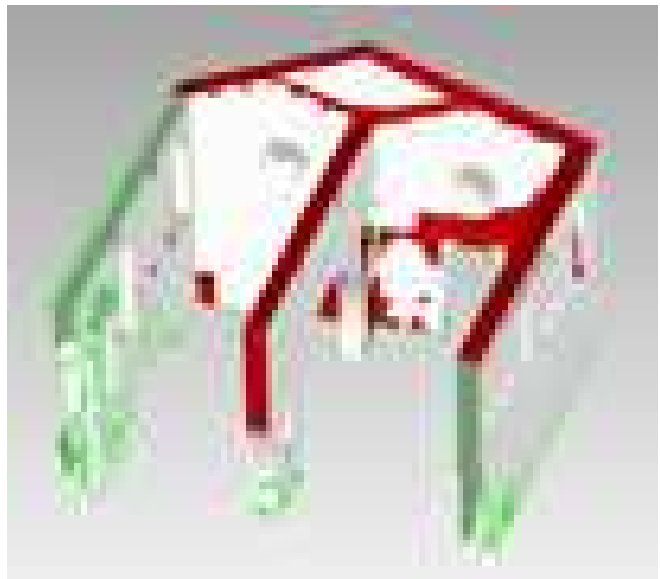
La facciata principale ha manifestato una concentrazione di danno localizzata angolarmente ed in sommità del timpano, motivando il martellamento dei setti murari ortogonali ma senza mostrare un più probabile meccanismo di ribaltamento totale o parziale del paramento. Al contempo le murature longitudinali delle aule, pur con episodi locali di martellamento delle capriate di copertura, non hanno evidenziato meccanismi diffusi di taglio bensì la presenza di localizzati fenomeni di ribaltamento. Il blocco della torre campanaria ha dimostrato un comportamento indipendente dal corpo principale della chiesa, privo di oscillazioni congiunte per ammorsamento ma interagente con la fabbrica in corrispondenza della porzione angolare di contatto.

L'obiettivo della documentazione è stato così indirizzato sulla valutazione quantitativa dei blocchi deformati, per verificare il quadro esistente dei meccanismi di collasso tra le previsioni comportamentali teoriche ed i dati risultanti dalle *elevation map* del rilievo. In particolare, l'identificazione avanzata sulla base della mappa colorimetrica (diagnosticata nell'interrogazione della nuvola di punti da laser scanner) è stata perseguita per avanzare una classificazione dei blocchi rigidi di deformazione sulla base di caratteristiche di loro estensione e localizzazione nella struttura globale, definendo un complessivo modello di danno.

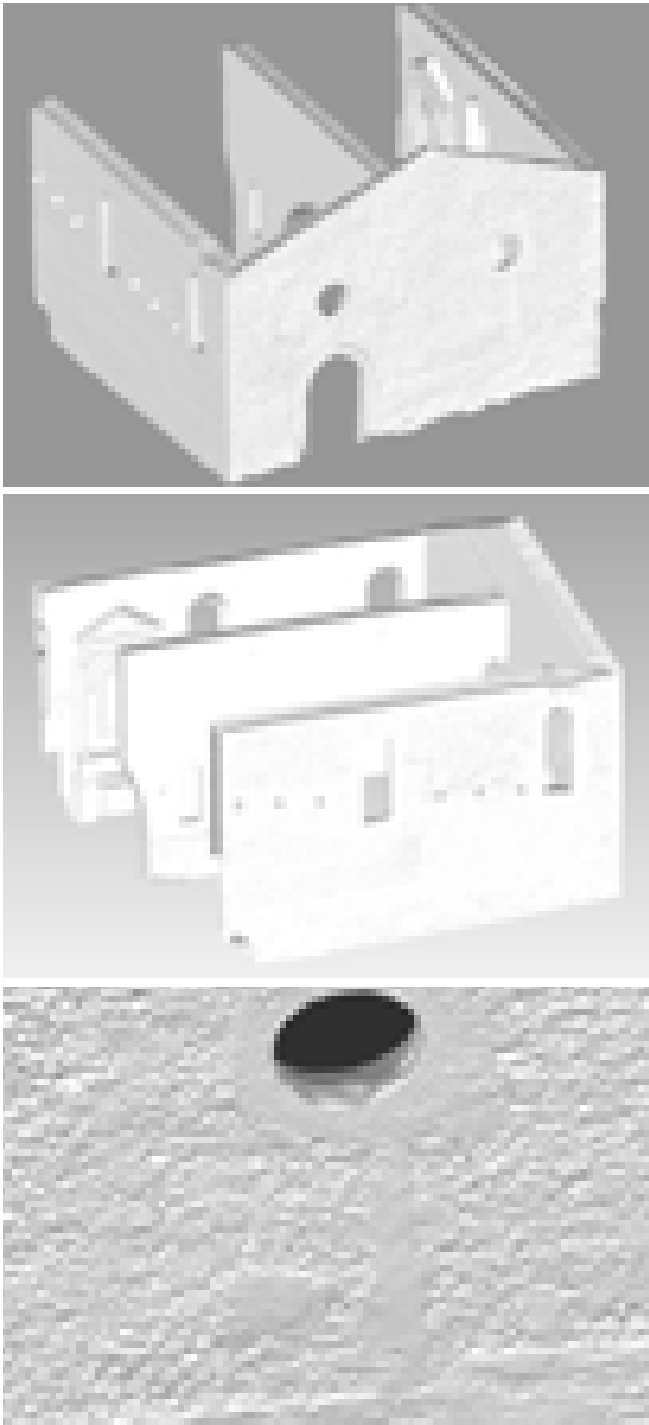
La scelta di procedere con un'elaborazione *mesh* delle superfici rilevate, ottimizzate ed integrate sia in fase di allineamento che di *reverse modelling*, ha permesso di ottenere un modello numerico "utile" della struttura muraria del complesso, filtrato delle deviazioni di forma costituite dagli apparati secondari interni. Data la conformazione scatolare della struttura principale, il sistema morfologico complessivo ha presentato una copertura di dato completa al 70%. L'alterazione maggiore è stata rappresentata da

shield holes in corrispondenza degli apparati di arredo religioso, altari lignei e formelle in cotto, allineati alle pareti interne delle aule. Un caso singolare ha riguardato i locali di sagrestia sull'ala sud, successivamente affiancata al corpo principale, con contropareti e rivestimenti aggiuntivi tali da alterare la mappatura del danno murario. La lettura dei quadri di deformazioni è stata in tal caso valutata sul rilievo delle superfici interne, e attentamente considerata in relazione allo spessore ed alle caratteristiche murarie documentati.

L'assenza di notevoli volumi di oggetto o diaframmi ha prevenuto casi estesi di *corner holes*, limitati alle sole mensole in pietra esterne, senza compromettere l'affidabilità di ricostruzione dell'inviluppo poligonale con i processi di *fixing* automatico. Complessivamente, non sono state necessarie direttrici geometriche di supporto alla modellazione, in virtù della compattezza della scatola muraria della chiesa. Analogamente, la valutazione di *bullet holes* non ha comportato specifiche misure di triangolazione per le superfici murarie: la tessitura a vista, presente solo in esterno, è risultata composta da blocchi lapidei non squadrate ma superficialmente erosi misti a laterizio, con malta di allettamento mantenuta a raso dei profili che ha prevenuto estesi coni d'ombra con l'acquisizione del dato da terra.



(7.83) Processo di *fixing holes* durante la modellazione *mesh* del complesso di San Giovanni di Campli. Le porzioni in rosso individuano le superfici di appoggio delle strutture di copertura e degli apparati interni.

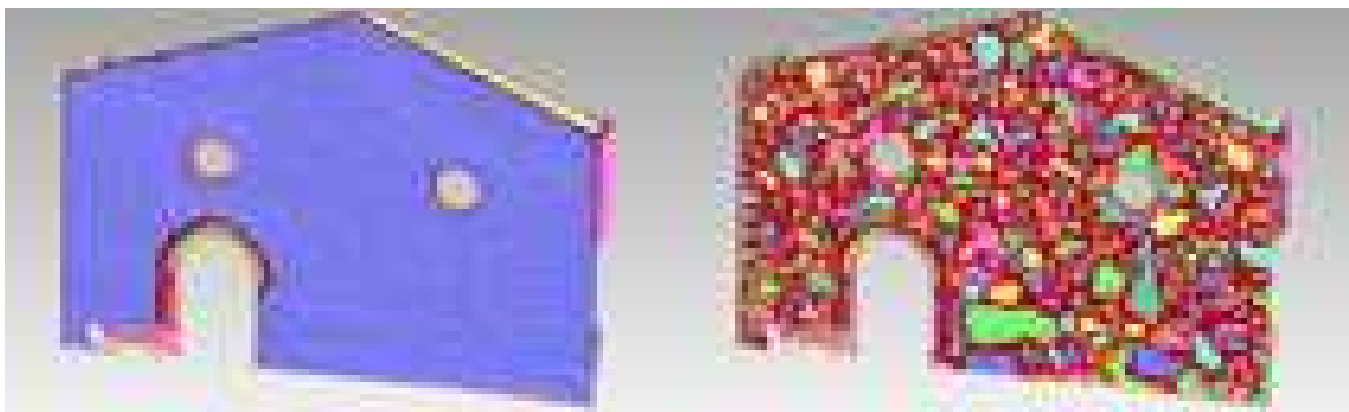


(7.84-7.85) Porzione del modello per la descrizione del meccanismo di ribaltamento della facciata principale, in relazione ai setti di delimitazione.
 (7.86) Dettaglio della superficie morfologica di supporto alla diagnostica.

Il processo di triangolazione ha dimostrato tempistiche vantaggiose di elaborazione, prevalentemente dedicate dalla pulitura dei dati sorgente dal rumore urbano e di apparati mobili, permettendo di ottenere un modello dello scheletro murario sviluppato al dettaglio di tessitura delle superfici a vista. Tale target di rappresentazione ha certificato la conservazione delle irregolarità morfologiche di disallineamento dei blocchi meccanici, altrimenti non mantenibili in caso di modellazione delle superfici per estrusione. La ricostruzione della struttura muraria per setti resistenti, derivati dalla principale geometria del complesso, avrebbe altrimenti tralasciato lo specifico dettaglio formale delle aree danneggiate sia in termini di sensibilità, per la macro-lettura dimensionale semplificata, che per localizzazione, senza un infittimento specifico delle *slice* di estrazione nelle porzioni realmente danneggiate. Tale aspetto comporta una criticità valutativa sia in fase di analisi dello stato di fatto post-crisi che in applicazioni successive del modello, per la simulazione di interventi di consolidamento e ripristino delle strutture.

L'analisi dei meccanismi di danno è stata eseguita sfruttando il dettaglio morfologico delle superfici virtuali per operarne una segmentazione diretta, automatizzata attraverso il riconoscimento di entità *Feature Regions*. Il filtro di parametri di curvatura riscontrati sulla *mesh* ha permesso di interpretare la localizzazione logica delle porzioni deformate in funzione dell'inclinazione relativa tra i poligoni della maglia, opportunamente impostati a scale di interesse che dalla lettura frammentata per tasselli tessuari (sensibilità 80/100) hanno gradualmente portato ad un'approssimazione per macro-aree (sensibilità 65-70/100) fino a convergere in una mappatura uniforme dei fronti (sensibilità 60/100). Ad alti livelli di valore (superiori ad 80/100), è stato possibile notare l'influenza delle operazioni di *fixing*, con porzioni di integrazione superficiale applicate durante la correzione geometrica per *holes* discordanti dalle proprietà di *boundary* della superficie triangolata, dimostrando il limite di affidabilità della procedura a seconda della scala applicata.

Le *Feature Regions*, dalla segmentazione automatica della superficie numerica continua, hanno permesso di impostare spessore e disturbo del loro limite di dominio, e di trasporlo in entità *boundary* a carattere vettoriale, generate ed inserite nell'ambiente del modello virtuale. Tali curve, valutate sulle superfici sia interne che esterne



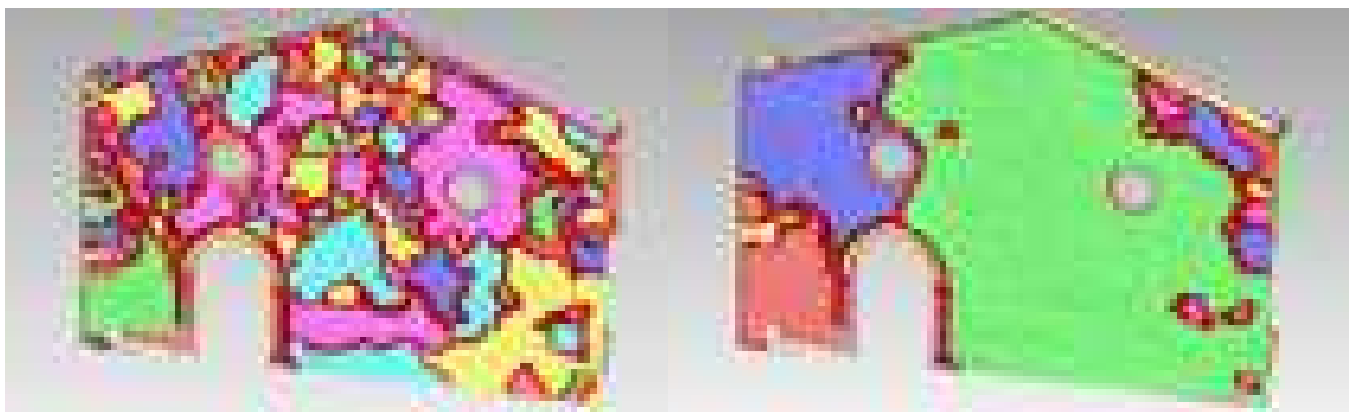
(7.87) Istituzione delle sensibilità di analisi delle curvature relative nella mesh del fronte principale. Dal range di tolleranza elevato (80/100) tale da non distinguere variazioni sulla superficie, al range eccessivamente basso (50/100) tale da generare un quadro eccessivamente frammentato.

della struttura, sono state congiunte per estrusione generando dei blocchi solidi 3D di intersezione alla maglia poligonale del modello, operanti come entità di taglio per l'isolamento dei corrispondenti blocchi cinematici. La loro costruzione è stata confrontata con le informazioni comunicate dalle *elevation map*, verificando una più approfondita descrizione dei quadri di deformazione attraverso l'interazione con il modello numerico.

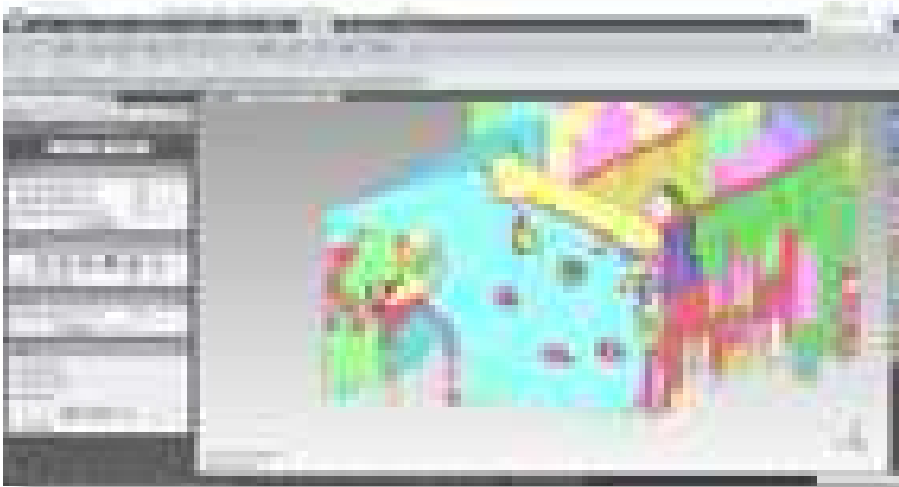
L'elaborazione 3D ha evidenziato una maggiore estensione delle aree di danno rispetto ai dati interrogati nella nuvola di punti, sostituendo un *frame* vettoriale alla precedente mappa colore. I valori cromatici di riferimento

dell'*elevation map*, già ottimizzati nelle capacità dei *tool* specifici, non hanno garantito una corretta lettura visuale della reale entità di danno, a causa della grossolana interpretazione colorimetrica. Una più accurata analisi dei valori cromatici di riferimento, supportata dal prelievo colorimetrico digitale sulle mappe, ha evidenziato sensibili variazioni di intensità, tali da trascurare estese porzioni danneggiate di paramento ma non possibili da percepire a solo livello visuale di lettura dei prodotti immagine.

Dall'analisi delle *Feature Regions* estratte sono emerse nuove valutazioni legate ai meccanismi di collasso presenti sulla struttura muraria della Chiesa di S. Giovanni



(7.88) Valori intermedi di range di curvatura relativa nell'involuppo superficiale del fronte principale per la distinzione delle *Feature Regions*, orientate sull'affinamento della lettura sullo stato di danno evidenziata dalle *elevation map* preliminari.

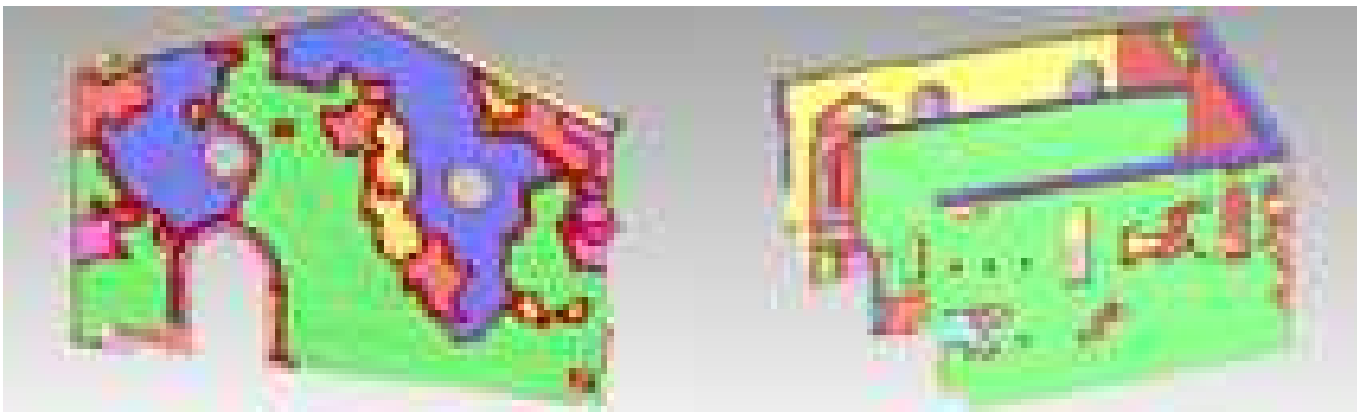


(7.89) Prova di estrazione delle Feature Regions su mesh non ottimizzata secondo la strategia elaborata. E' visibile come, senza un'affinamento dell'allineamento dei dati morfo-metrici e la correzione delle superficie poligonale generata da triangolazione, gli algoritmi non siano in grado di fornire un corretto calcolo delle aree superficiali di curvatura compresa da intervallo impostato.

Battista. In particolare, il fronte principale ha confermato le criticità angolari e di colmo collegandole ad un più esteso quadro di insieme della facciata, dove è stato possibile osservare un meccanismo di ribaltamento solo in parte bilanciato dall'ammorsamento del setto interno intermedio. L'influenza maggiore è stata esercitata dalla sollecitazione a taglio, che ha denotato i segni della precedente impostazione ortogonale dalla struttura del complesso variando la trasmissione dei carichi sul fronte principale e differenziandone il quadro di sollecitazione rispetto alle ipotesi teoriche di comportamento.

Le sperimentazioni condotte sul caso studio hanno definito

la necessità di più approfondite diagnosi di valutazione dei meccanismi di collasso agenti sul complesso storico di Campli, evidenziando la possibilità di derivare adeguati modelli poligonali di dettaglio anche da *database* speditivi, ma impostati su una base di documentazione digitale densa rispetto alle informazioni raccolte durante sopralluoghi e macro-rilievi geometrici di squadre di emergenza.



(7.90) Calibrazione ottimale delle Feature Regions e valutazione dell'estensione del danno sulle superfici principali del complesso. Il perimetro delle zolle, estratto come poligonale 3D, permette di suddividere le porzioni di danno e valutarne la singola volumetria.

*Database morfo-metrico con componente RGB
delle rovine del complesso monumentale
di Pokcha, in Upper Kama.*



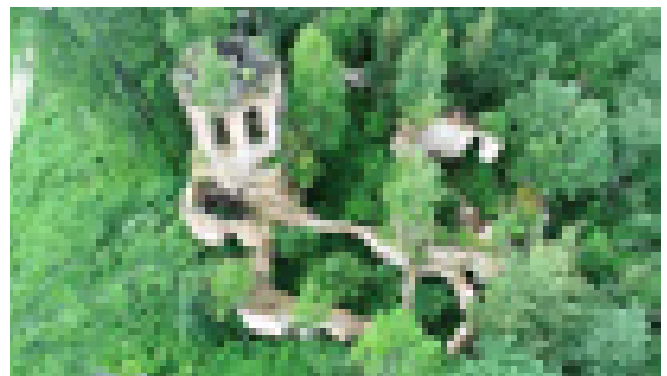
7.3 IL COMPLESSO ARCHITETTONICO

LA DOCUMENTAZIONE DELL'INSTABILITÀ STRUTTURALE NELLE ROVINE DEL SITO DI POKCHA (UPPER KAMA, RUSSIA)

Il riconoscimento delle “rotte culturali”²³, oggi al centro di programmi comunitari per la loro valorizzazione e gestione, ha sensibilizzato una valutazione del patrimonio architettonico su dinamiche costruttive “di bacino” riguardanti le tradizioni tecnologiche e l'uso di materiali nell'edilizia storica. La continuità costruttiva attraverso spazio e tempo è adottata come chiave di analisi per siti monumentali dispersi in un territorio molto vasto, confrontando le manipolazioni della forma strutturale applicate attraverso adattamenti edilizi e danni conservativi dovuti al cambio di funzione o all'abbandono. La connessione tipologica tra tali fabbriche è testimoniata da caratteri strutturali e costruttivi ripetuti, che assimilano tra loro le storie evolutive e le soluzioni di intervento adottate in siti diversi.

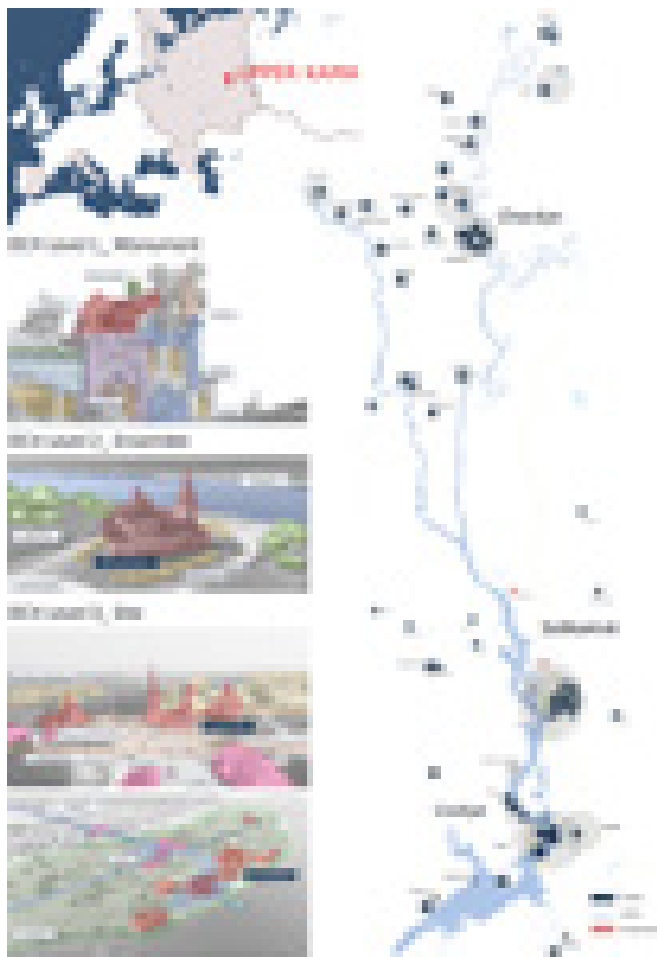
Il caso dell'Upper Kama, in Russia, già interessato da ricerche architettoniche negli ultimi decenni²⁴ e da un'esperienza di ricerca internazionale pluriennale sulla documentazione digitale di alcuni complessi²⁵, individua un emblematico esempio di *Cultural Heritage Route* sul ruolo di convivenza tra apparati strutturali storici e fenomeni di instabilità di causa territoriale, riflettendo un quadro complesso di diagnosi sulla sicurezza ed integrità delle diverse fabbriche. In tali termini, i suoi siti raccolgono un catalogo di caratteri architettonici, varietà stilistiche, soluzioni costruttive ed una molteplicità di materiali da costruzione, con relative patologie di degrado e conservazione, tali da permettere di definire un ricco abaco morfologico di moduli ed elementi sulle sue strutture.

La regione dell'Upper Kama, sviluppata attorno al bacino del fiume Kama, si estende a nord del Krai di Perm per circa 7.000 kmq, a ovest dei monti Urali nella Russia europea. Le risorse minerarie e il ruolo di crocevia commerciale del periodo imperiale hanno portato l'Upper Kama ad un intenso sviluppo culturale ed architettonico tra il XV secolo, con i primi insediamenti industriali, e il XVIII secolo, fino al rapido declino con la Rivoluzione russa di ottobre (1917). La scoperta delle saline locali da parte di famiglie mercantili, come gli Stroganov o i Golitsyns, ha



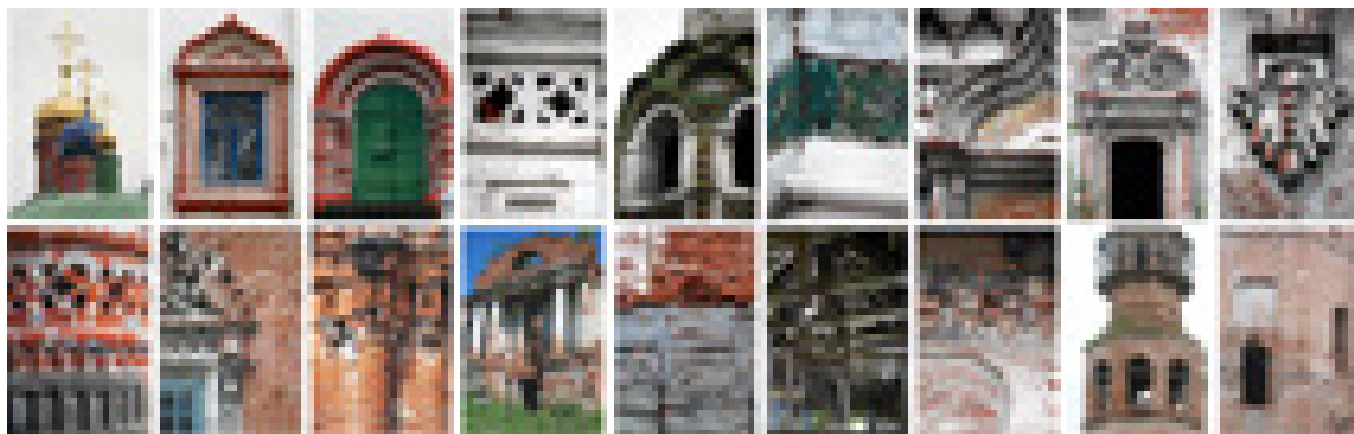
Strutture storiche monumentali in rovina dei complessi religiosi lungo la rotta dell'Upper Kama. Dall'alto: (7.91) Church of the Exaltation of the Holy Cross, Bondjug; (7.92) Rubezhskaya Church, Usolye; (7.93) Church of Paraskeva Friday, Saltanovo.

(7.94) Regione dell'Upper Kama e scale di analisi del patrimonio storico architettonico. (7.95) Caratteri stilistici e formali dei principali complessi monumentali e quadri di degrado.



decretato lo sviluppo di insediamenti urbani caratterizzati da monumentali complessi ortodossi, chiese, torri campanarie e cappelle familiari, richiamando architetti ed artisti continentali a definire un nuovo e dominante profilo architettonico nel paesaggio fluviale. Il mercato del sale, che dall'Europa raggiunse gli Urali per commerciare con la Cina, portò alla diffusione di numerosi centri insediativi ed industriali, ed all'impronta dispersiva dei siti monumentali nel nuovo paesaggio urbanizzato, associati ai distretti di Solikamsk (1430), Cherdyn (1535) e Ussolye (1606) e tutt'oggi assegnati ad una frammentata amministrazione territoriale convogliata al controllo centrale del Perm Krai. L'impronta insediativa, più stabilizzata dalle esigenze commerciali rispetto ai villaggi della campagna russa, ha determinato un fenomeno globale di trasformazione degli apparati strutturali dalla tipica architettura lignea a soluzioni costruttive in muratura di laterizio e pietra. La tradizione costruttiva delle strutture principali ha mantenuto molte caratteristiche della cultura occidentale declinate in stili e forme locali, in cui materiali ed apparecchiature tradizionali si sono integrati. Pertanto, tali strutture architettoniche hanno acquisito la propria identità, caratterizzazione e specificità nel tempo, evolvendosi con comparti spaziali e apparati costruttivi attraverso le diverse vicende che ne hanno definito la storia e combinando tra loro relazioni morfologiche e statiche.

I siti dell'Upper Kama sono caratterizzati da architetture religiose monumentali e spesso isolate, originariamente appartenenti a complessi più estesi di carattere cerimoniale o dedicati al pellegrinaggio verso reliquie. Tale aspetto ha



influenzato la configurazione morfologica degli impianti strutturali dei siti, con il progetto di planimetrie a più navate suddivise tra corpi architettonici quali il nartece, con torre campanaria, il vestibolo e il corpo principale, e con blocchi murari di aggregazione in corrispondenza di cappelle laterali ed espansioni. La configurazione dei complessi prevedeva anche un affiancamento del monumento principale con un'eventuale chiesa invernale, a navata unica e più contenuta per permetterne il riscaldamento, e cappelle secondarie, cripte o mausolei a completamento del recinto religioso. Con il periodo sovietico, la richiesta di conversione del territorio a fini infrastrutturali e di produzione energetica o alimentare ha definito un decadimento del ruolo esercitato da tali siti nel bacino culturale dell'Upper Kama. Il conseguente stravolgimento degli impianti costruttivi, forzatamente adeguati alle nuove esigenze, ha finito con il decretarne un prevalente abbandono, fino alle condizioni di rovina e collasso²⁶.

Il caso della Blagoveshchenskaya Church, o *Church of the Annunciation*, nel villaggio di Pokcha, consolida una fase storico-architettonica caratteristica nello sviluppo del distretto di Cherdyn²⁷, sintetizzando l'apporto di eventi storico-evolutivi nella stratificazione dei moduli della sua struttura.

L'originale complesso ligneo fu sostituito nel 1785 con uno nuovo in muratura di pietra e mattoni²⁸, suddiviso in ambienti: il corpo principale, con una planimetria quadrilatera, costituiva un nucleo per il refettorio, le cappelle di St. George (a sud) e di St. Nicholas (a nord), il campanile e il nartece dell'ingresso. Nel 1910, un intervento di ricostruzione modificò porzioni strutturalmente e morfologicamente grandi, in particolare il campanile,

interamente sostituito, e la sezione orientale della volta centrale e dell'altare, ricostruita con l'inserimento di un capitolo a 5 teste; invece sono conservati gli interni in pietra intonacata, con dipinti e ornamenti del 1870. Il rivestimento generale dell'edificio, integrato da un ulteriore strato esterno in laterizio con funzione decorativa, ha contribuito al rafforzamento dell'involucro esterno e ha consentito l'inserimento di ulteriori dispositivi di resistenza tensionale, in particolare catene e fasce metalliche, nelle pareti stratificate.

Il sito assiste a primi lavori di restauro a partire dal 1920, fino al completo abbandono nel 1940 e alla riconversione in una centrale elettrica: le questioni energetiche legate alla nuova funzione hanno portato negli anni '90 al parziale crollo della volta centrale 'a schifo' e del tetto del campanile, dopo ripetuti lampi attratti dall'impianto elettrico. A causa dell'ampio danno, la chiesa fu esclusa dall'elenco locale dei monumenti architettonici di interesse, impedendo ogni nuovo intervento e iniziativa di restauro e lasciando il sito alla rovina²⁹.

Il patrimonio storico delle chiese dell'Upper Kama si contraddistingue per le fabbriche strutturali dei suoi monumenti realizzate in pietra o muratura, e per questo sopravvissute alla più effimera architettura lignea. Lo stato di abbandono e la mancanza di interventi di conservazione presenta oggi un ampio catalogo di criticità di dissesto e fenomeni di instabilità diffusa, che hanno spesso 'sventrato' l'involucro dei complessi esponendo chiaramente il loro sistema strutturale ed i suoi apparati. (7.96-7.98) Cause di danno e dissesto diffuso nella fabbrica strutturale della Church of the Transfiguration, Pyskor.



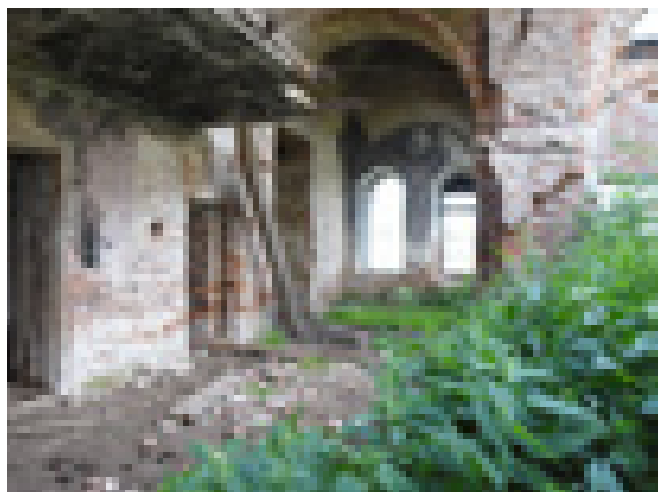


Il complesso della Blagoveshchenskaya Church di Pokcha attraverso le vicende storiche fino alla condizione di rovina.

La chiesa prima della rivoluzione (7.99) e nel 1956 (7.100). A seguito della trasformazione in centrale elettrica, numerosi interventi e danni sono stati apportati alla struttura principale, in particolare sulla campata centrale coperta dalla grande volta 'a schifo', originariamente sormontata da lucernario ed interessata dal crollo della navata centrale (7.101) (7.102).

Il carico invernale causato dal deposito della neve costituisce un fattore di carico critico per le strutture di copertura, incentivandone il crollo ed il collasso delle murature sottostanti (7.103).

I restanti ambienti, originariamente coperti da volte minori, sono anche essi interessati da danni estesi, lasciandoli senza riparo dalla vegetazione (7.104).



7.3.1. Il quadro di indagine in sito e la richiesta conoscitiva

Nel 2018 il complesso architettonico è stato rilevato in evidente stato di abbandono. Le coperture lignee risultano quasi interamente distrutte, ed anche la fabbrica strutturale principale è gravemente danneggiata in più porzioni, in particolare nel corpo della chiesa.

Il sistema strutturale voltato delle campate, poggiante su pilastri e basato su uno schema di contro-equilibri garantiti tra volta-volta e volta-appoggio, è stravolto dal crollo dei singoli catini, dei quali è possibile osservare l'imposta in laterizio (compatibile con volte a vela) ed i resti delle lamine in piombo di copertura all'estradosso. La grande volta centrale, 'a schifo', è conservata per meno della metà della sua campata, e permette di apprezzare l'orditura in laterizio di testa, lasciata a vista lungo il ciglio di distacco. Le sue macerie, sia della volta in laterizio che della copertura lignea, sono crollate occupando l'ambiente della navata. I detriti hanno sommerso parte dei pilastri di scarico delle volte, non ispezionabili nell'attacco a terra, e sono stati coperti da terra e vegetazione creando una collina naturale che riduce l'accesso ai soli ambienti di narcece e abside, oltre a costituire causa di degrado degli appoggi conservati. Il collegamento con il campanile, una volta consentito dalla navata centrale attraverso la galleria e il refettorio, è stato demolito e impedisce di documentare direttamente lo stato di conservazione delle strutture sopraelevate.

A seguito del crollo della copertura, il complesso risulta privato dei principali fattori di protezione dagli agenti atmosferici, particolarmente incidenti durante la stagione invernale, ed è per questo soggetto ad un rapido degrado delle porzioni rimaste, ogni anno interessate da crolli localizzati. Il sito è inoltre totalmente privo di servizi di controllo per l'accesso di persone ed animali, che spesso ne occupano e danneggiano gli spazi ed i loro apparati. In particolare, gli ambienti del narcece sono deteriorati dalla frequente presenza di mandrie in transumanza, alloggiato dai pastori all'interno della chiesa durante la stagione estiva. L'obiettivo della documentazione, oltre ad un approccio di mappatura e ricognizione sul territorio, è quello di favorire una diagnosi speditiva ma affidabile delle emergenze di crisi strutturale presenti nella fabbrica, così da indirizzare in modo più mirato l'organizzazione di possibili operazioni di intervento e messa in sicurezza. L'amministrazione

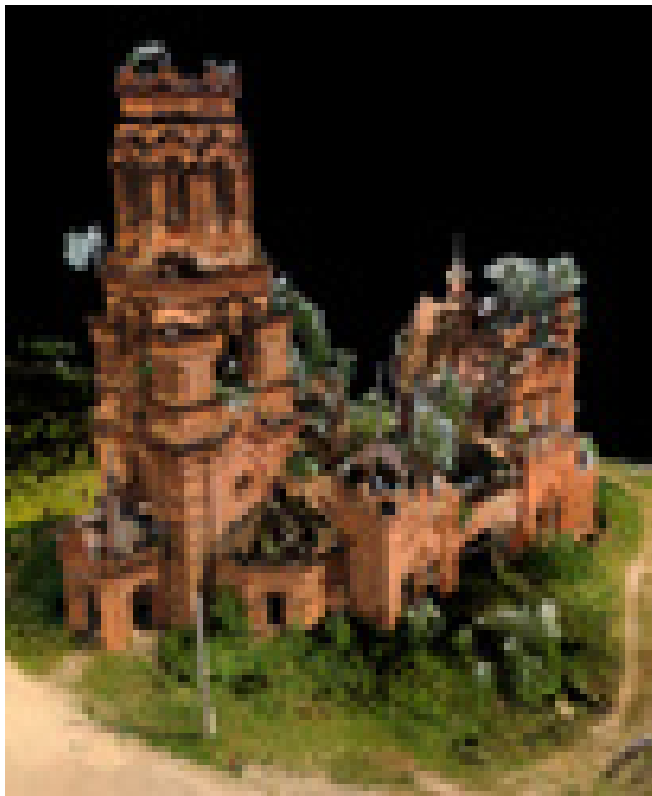


(7.105) Confronto tra la fabbrica storica e le rovine odierne.

(7.106) Tracce degli interventi sull'involucro strutturale causati dagli impianti infratrutturali e (7.107) dispositivi di incatenamento metallico presenti all'interno delle murature, incoraggianti l'ipotesi di impatto accidentale come causa del crollo improvviso.

locale sta gradualmente riconoscendo il valore storico e culturale di questi siti dispersi lungo la Kama, ma le condizioni di grave rovina presenti nella maggior parte dei casi sfavoriscono facilmente l'impegno, sia tecnico che economico, nell'attuare progetti di conservazione. Eppure, nonostante i danni estesi, la permanenza dei resti delle chiese testimonia una qualità costruttiva e meccanica delle loro strutture dalle elevate prestazioni statiche, frutto di una tradizione architettonica d'eccellenza che è anche patrimonio della regione. In tal senso, la ricognizione e valutazione dei moduli strutturali conservati e delle corrispondenti labilità può costituire uno strumento preliminare di eccellenza per orientare correttamente la programmazione qualitativa e quantitativa

dell'intervento ed interrompere il ciclo esponenziale di danni. La documentazione dello stato di conservazione attuale della struttura della Blagoveshchenskaya Church ha così evidenziato la necessità di sperimentare specifici approcci integrati di acquisizione e ridisegno della forma strutturale, per garantire una qualità descrittiva del suo impianto architettonico resistente attraverso i dati raccolti con un'indagine speditiva in sito, contenuta in termini sia di tempo che di applicazione strumentale. Con l'obiettivo di meglio comprenderne la conservazione ed il fenomeno di "rovina" delle sue strutture, originariamente progettate e ancora integre, la richiesta conoscitiva è stata centrata sulla relazione delle unità strutturali all'interno del complesso, analizzandone il grado di sicurezza ed intervento per il recupero in rapporto all'impianto unitario ed allo schema meccanico globale.



(7.108) Nuvola di punti da laser scanner terrestre con componente di dato RGB integrato. La posizione isolata del monumento ha permesso di condurre più poligonali di ripresa attorno al complesso, migliorando il dettaglio e riducendo i coni d'ombra anche nelle porzioni più elevate delle superfici.

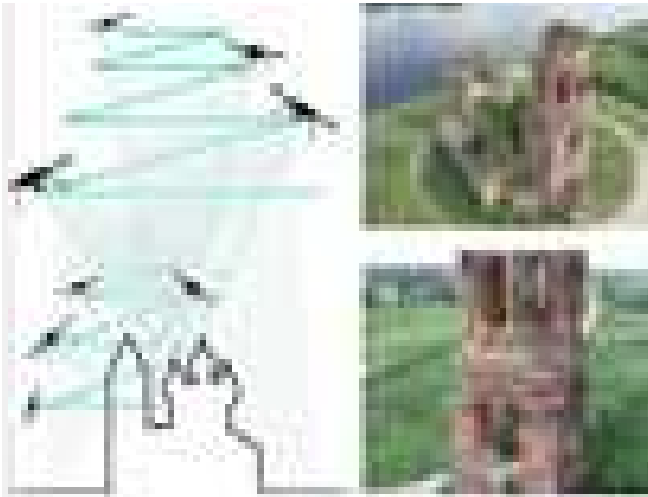
7.3.2. L'azione di documentazione: l'integrazione di dati spaziali per la forma completa

All'interno dell'azione di ricerca del progetto europeo H2020-RISE-PROMETHEUS, su un protocollo di documentazione e rappresentazione dei siti architettonici per la *Cultural Heritage Route* dell'Upper Kama, la Blagoveshchenskaya Church di Pokcha è stata soggetta ad una campagna di documentazione estensiva *Range-based* e *Image-based*.

L'approccio documentativo ha evidenziato la necessità di una rinnovata attenzione alle metodologie di acquisizione e rappresentazione delle proprietà formali del complesso, in particolare in termini di corrispondenza e integrazione delle informazioni raccolte sulla fabbrica attuale e originaria. Le dimensioni delle strutture hanno orientato la strategia di digitalizzazione morfo-metrica all'uso di uno scanner terrestre, tale da garantire una risoluzione di dettaglio formale apprezzabile rispetto alla complessità di caratteristiche sia di geometria architettonica delle superfici che di deformazione strutturale delle fabbriche. Al contempo, l'informazione colorimetrica è risultata di supporto chiave nella diagnostica delle strutture, valutando come molte patologie e segni di influenza sulla resistenza meccanica fossero descritti attraverso variazioni tonali dei colori nelle superfici, prevalentemente in cotto o intonacate rispetto al contesto di infiltrazione vegetale.

La campagna in sito è stata organizzata su un doppio livello di acquisizione, statico da terra con scanner laser terrestre (TLS) e aereo con droni per fotogrammetria (UAV). Entrambi gli strumenti sono stati applicati con un'attenzione prevalentemente rivolta alla copertura totale del dato morfologico: l'elevazione delle unità della struttura e la loro difficile accessibilità hanno necessariamente orientato l'obiettivo di digitalizzazione della 'forma completa' sull'integrazione di dati spaziali da laser e drone in un unico database di documentazione dell'involuppo a 360°. Per questo motivo, al contrario dei casi studio precedenti, non è stato affidato un ruolo prevalente ad un certo tipo di dato di acquisizione strumentale, ma è stata promossa l'integrazione dei sensori disponibili per ciascuna piattaforma.

Nell'acquisizione da TLS è stata abilitata anche la camera fotografica integrata, garantendo un qualità di informazione RGB per ciascun punto x,y,z adeguata alla mappatura delle superfici. Ciascuna scansione, eseguita in modalità *Medium* o *High* secondo la distanza della poligonale di

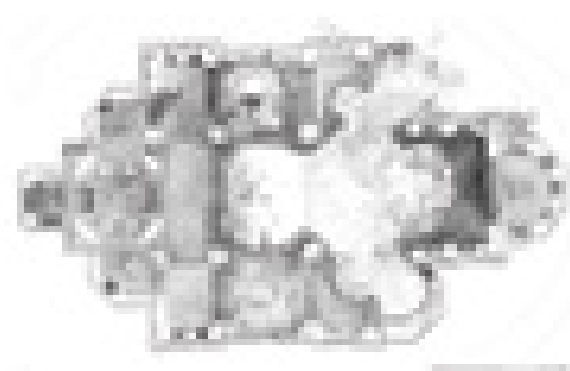


(7.109) Piano di volo in modalità 'punto di interesse' eseguito sul complesso e sulla porzione in elevato del campanile. La ripresa con camera aerea fotogrammetrica ha conseguito più di 300 fotogrammi (7.110), ciascuno dotato di coordinate GPS di scatto che hanno facilitato il calcolo degli allineanti tra fotogrammi per la ricostruzione della nuvola di punti (7.111).
Il database discontinuo è stato elaborato in modalità High con più di 72.000.000 punti nella nuvola densa.



Successivamente, il dataset è stato referenziato sulla base della nuvola di punti acquisita da laser scanner, orientandolo per mezzo di target manuali dalle conosciute coordinate geometriche. Complessivamente, la nuvola di punti fotogrammetrica ha presentato un errore globale di 7 cm.

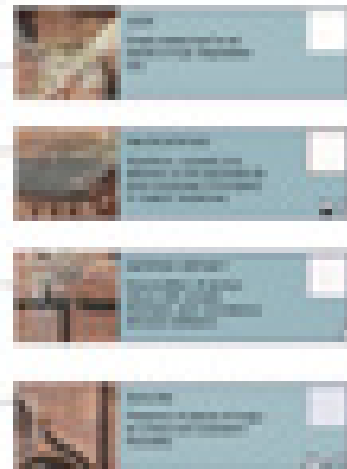




(7.112) Il disegno dell'apparato strutturale ha permesso di meglio comprendere le caratteristiche morfologiche delle rovine, riconducendole allo schema progettuale ed a quadri di scarico tensionale.

(7.113) Nonostante la vegetazione incolta attorno alle porzioni costruite interne, è stato possibile filtrare e analizzare i dati morfo-metrici

e colorimetrici per restituire disegni affidabili delle strutture murarie ancora integre. Con il supporto dell'archivio fotografico, è stato possibile documentare le patologie di degrado presenti sulle superfici strutturali, mappando le caratteristiche dei materiali e dei componenti costruttivi ed il loro stato di conservazione.



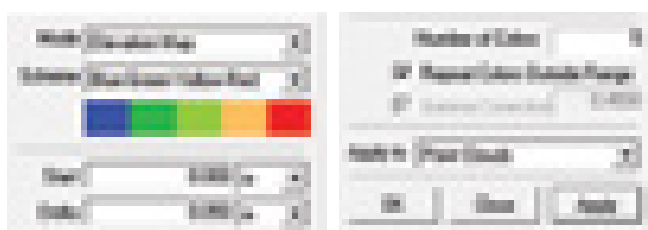
(7.114) Campata laterale della Blagoveshchenskaya Church, oggi totalmente priva delle originarie strutture voltate di copertura.

A supporto dell'analisi morfologica digitale sul complesso strutturale, è stata definita un'attività di censimento fotografico in sito. Le informazioni raccolte dall'ispezione diretta, assieme ai disegni ed al materiale elaborato in post-produzione, sono state organizzate all'interno di una scheda censuaria, suddivisa per sezioni (Informazioni generali, architettoniche, territoriali costruttive, di conservazione e strutturali). L'obiettivo è stato quello di esplicitare le connessioni statico-formali e costruttive riscontrabili negli apparati storici, interpretando opportunamente anche i componenti dalle estese condizioni di rovina, e collegandoli al generale schema di organizzazione meccanica del complesso.

La scheda è stata elaborata in collaborazione con i ricercatori di tecnologie costruttive dell'architettura storica della UPV Universitat Politècnica de Valencia e dell'impresa in monitoraggio di sistemi strutturali SISMA s.r.l., partner del progetto.

Sotto (7.115) Sezione sull'analisi costruttiva della scheda censuaria.





ripresa dall'oggetto, ha previsto un tempo di acquisizione aggiuntivo di 4.00' per permettere lo scatto di 16 fotogrammi per postazione (copertura di 360°x320°, come per l'angolo di scansione). Prima di ogni ripresa fotografica, lo strumento è stato impostato con un bilanciamento mediato di colore e illuminazione per lo scatto, considerando solo la fascia di orizzonte nelle scansioni in esterno o l'intero spazio di ripresa per quelle negli interni. Questi accorgimenti hanno notevolmente influenzato le riprese, duplicando i tempi, ma sono risultati comunque vantaggiosi ai fini della documentazione rispetto ad una parallela campagna fotografica da terra, necessitante di ulteriori azioni di integrazione del materiale fotografico al database spaziale. Il rilievo metrico TLS da terra ha garantito la copertura dell'80% dei dati morfologici sulla struttura.

Parallelamente, è stata condotta un'acquisizione fotogrammetrica aerea da UAV concentrata sul punto di interesse del complesso architettonico. Con scatti di traiettoria circolare a raggio di circa 5-10 metri dal perimetro esterno della struttura, sono stati pianificati più livelli di ripresa dalla sommità della torre campanaria fino a circa 10 metri da terra. L'angolo di inquadratura garantito e l'inclinazione regolabile della camera *gimball* hanno

Sono stati condotti diversi tentativi di estrazione di elevation map sugli apparati murari della chiesa, sperimentando più possibilità di calibrazione dei parametri. La particolare lavorazione morfologica dovuta all'apparato decorativo esterno (caso diffuso nei siti monumentali dell'Upper Kama) ha restituito una mappatura colorimetrica non facilmente interpretabile, anche con una riduzione del numero di colori nella scala di visibilità.

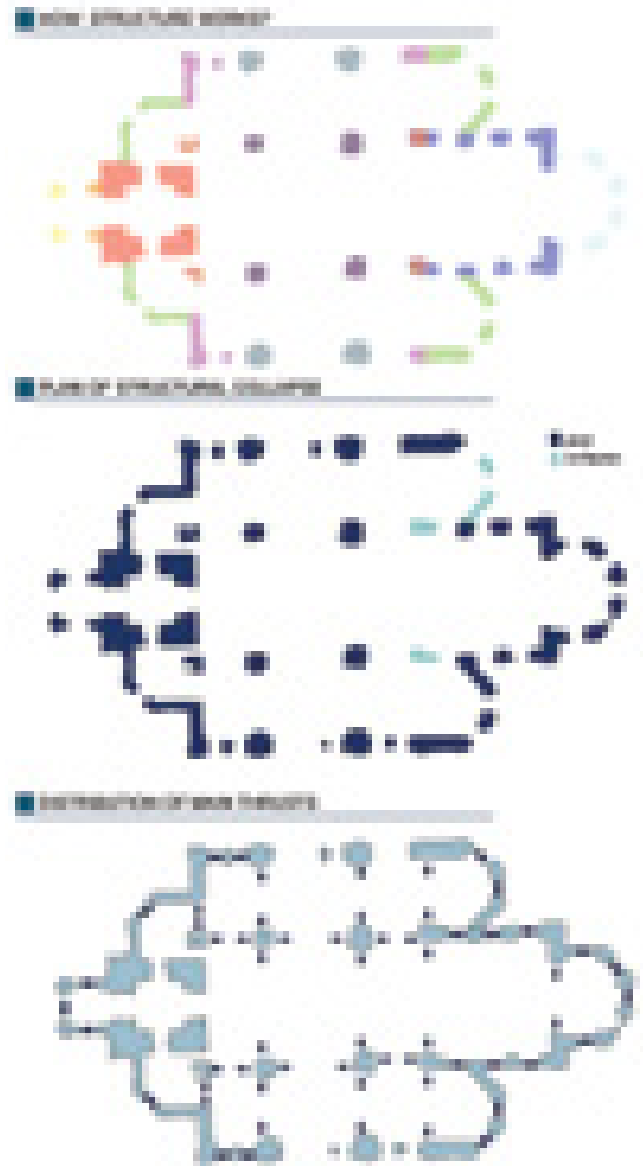
*(7.116) Fronte principale di ingresso della Blagoveshchenskaya Church.
(7.117) Elevation map estratta dalla nuvola di punti del TLS per il fronte absidale della chiesa.*

permesso una copertura totale delle superfici di sommità, con una qualità di dato fotografico adatta per la nitida ricostruzione fotogrammetrica degli spigoli dei componenti. In aggiunta, piani di volo specifici per i blocchi di torre e corpo principale sono stati pianificati con un dettaglio fotografico maggiore grazie alla ripresa ravvicinata. Le coordinate GPS definite dall'UAV per ogni scatto hanno meglio indirizzato gli algoritmi di allineamento, semplificando l'allineamento della ricostruzione fotogrammetrica.

L'uso di LiDAR *mobile* e di fotogrammetria da terra, per quanto acquisito all'interno del progetto generale sul sito, non ha apportato informazioni spaziali o colorimetriche aggiuntive funzionali alla ricostruzione morfologica della struttura secondo caratteri primari per l'indagine. Il dato da KAARTA è risultato troppo rado nella distribuzione superficiale rispetto alla complessità delle forme strutturali del sito, mentre i *chunk* da terra, per quanto di più dettagliato supporto, sono risultati eccessivamente frammentati a causa delle condizioni di agibilità del sito, e quindi di più lunga referenziazione ed unione (oltre che a dettaglio comunque inferiore) rispetto al rilievo già conseguito con TLS.

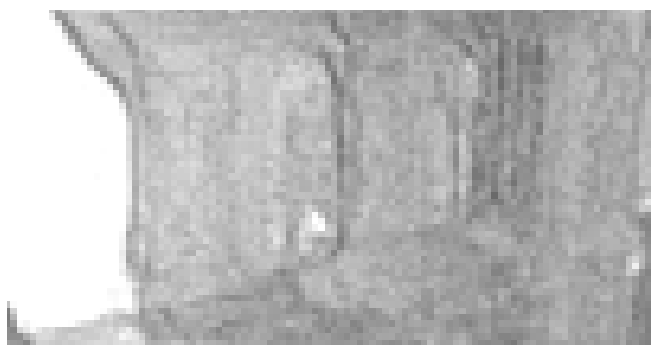
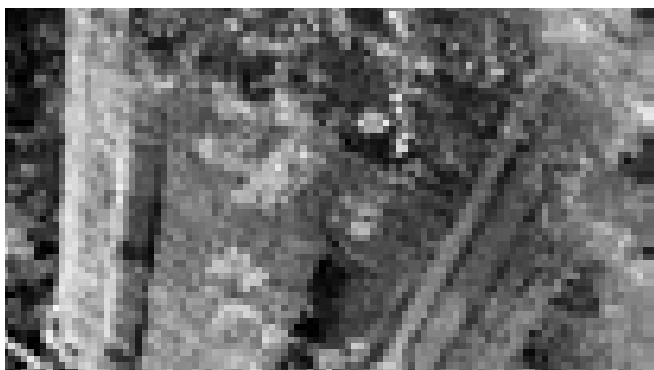
Dall'elaborazione congiunta degli archivi raccolti, sono stati prodotti disegni, sezioni e planimetrie di utile riferimento per la conoscenza complessiva della fabbrica e di orientamento per la mappatura intensiva delle patologie di degrado e dissesto, documentate nel repertorio fotografico. La rappresentazione bidimensionale ha però restituito con difficoltà la qualità di distribuzione e sviluppo volumetrico dell'apparato strutturale principale, reso ancora più complesso nell'interpretazione dal carattere di rovina del sito, e quindi dalla perdita di molte delle forme principali convenzionalmente identificabili per la classificazione degli apparati (profili di intradosso delle volte, profili di apertura e crolli locali, integrità delle strutture di elevazione).

Il tentativo di elaborazione di *elevation map* non ha soddisfatto le necessità di conoscenza sulla deformazione dei paramenti della fabbrica. L'elevata lavorazione superficiale dell'involucro strutturale, dovuta internamente alle condizioni di crollo ed esternamente all'apparato decorativo in laterizio, ha restituito *color maps* di difficile lettura, dove l'eccessiva frammentazione degli indicatori di livello non è riuscita a garantire un quadro complessivo di interpretazione delle deformazioni plastiche.



Dal disegno delle rovine della fabbrica, è stato possibile ricostruire le planimetrie e gli schemi fondamentali di disposizione dell'originaria struttura muraria. Lo schema statico dedotto e l'analisi delle porzioni collassate hanno evidenziato le alterazioni meccaniche in corso nella distribuzione delle tensioni statiche del complesso, concentrate attorno al meccanismo di danno causato dalla porzione rimasta della volta centrale.

Dalla planimetria, schema dei blocchi resistenti (7.118), delle porzioni collassate (7.119) e della distribuzione statica originaria (7.120).



Qualità di dato morfo-metrico conseguita da TLS (7.121-7.122) e UAV (7.123-7.124) sulle superfici strutturali esterne del complesso.

Qualità di dato morfo-metrico conseguita da TLS (7.125-7.126) e UAV (7.127-7.128) sulle superfici strutturali interne del complesso.

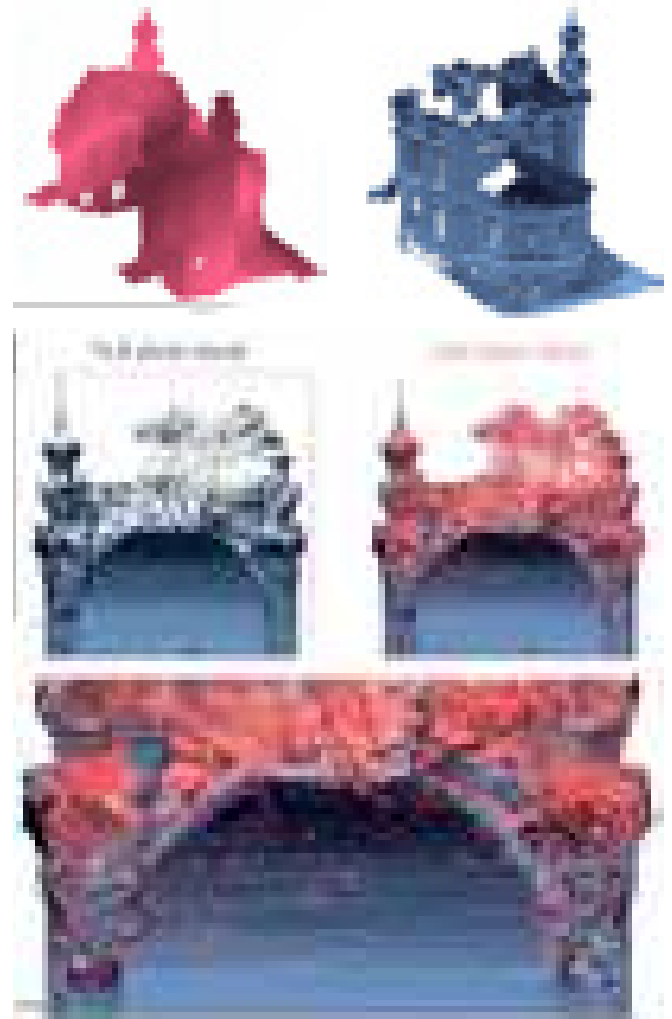
7.3.3. La modellazione come opportunità di mappatura dei meccanismi di instabilità per gli apparati unitari.

A fronte degli obiettivi di ricerca sulla diagnosi di stabilità delle strutture della Blagoveshchenskaya Church di Pokcha, è stata valutata la direzione di modellazione 3D *Reality-based*. Tale scelta è stata orientata sia per una configurazione spaziale degli apparati del complesso, articolati su più livelli ed ambienti, sia per una corrispondenza del reale stato di rovina della fabbrica, difficilmente restituibile in modo automatizzato attraverso una modellazione NURBS o parametrica.

I dati raccolti delle campagne di acquisizione TLS e UAV hanno permesso una procedura compatibile di integrazione delle nuvole di punti prodotte, supportata anche da comuni estensioni di formato per il loro inserimento nelle piattaforme di modellazione.

L'analisi morfologica delle strutture è stata organizzata e gerarchizzata durante i processi di modellazione digitale, organizzando una decomposizione delle unità resistenti spaziali per semantizzare gli apparati degli ambienti, collegandoli al macrosistema volumetrico globale solo al termine del processo di triangolazione ed ottimizzazione. Inoltre, l'ispezione interna delle sezioni in muratura, nelle loro parti fratturate o collassate, ha meglio orientato l'interpretazione dei comportamenti meccanici dell'involucro strutturale, riferendo materiali ed informazioni costruttive alla ricostruzione affidabile nella forma della sua "pelle" strutturale.

L'azione di modellazione si è concentrata sull'integrazione dei dati da TLS e UAV. Il primo aspetto ha riguardato la difficoltà di trasferimento delle informazioni di 'normale' per ogni punto della nuvola fotogrammetrica acquisita da drone sulle piattaforme di modellazione *mesh*. I formati compatibili (prevalentemente .ptx e .pts) per i dati *input* di *reverse modelling* prevedono diverse scritture ASCII nell'ambiente di *processing* fotogrammetrico, e nei passaggi di *export* e re-importazione la variazione dei livelli di lettura di tali matrici ha tralasciato la stringa delle normali. A seguito dei tentativi effettuati su diverse piattaforme, tra quelle adeguate alla gestione della mole di dati in oggetto, è stata optata una fase aggiuntiva di ricalcolo delle normali da nuvola di punti UAV direttamente in ambiente di modellazione, così da orientare correttamente le caratteristiche della triangolazione *mesh* e da evitare



(7.129) Processi di integrazione tra la nuvola di punti da TLS e da UAV, dettaglio della referenziazione in corrispondenza delle rovine della volta centrale.

anomalie delle regioni poligonali. A causa dell'elevata densità di punti e della loro distribuzione non strutturata, complicata dall'articolazione geometrica del complesso, i *tools* automatici di calcolo della normale non sono riusciti a garantire un risultato uniforme e coerente, frammentando l'orientamento dei punti e, conseguentemente, le *features* della successiva maglia triangolata. Da tale osservazione, è scaturita la necessità di sviluppare un processo di triangolazione a *step* unico sull'archivio di dati integrati TLS e UAV, così che i dati di normale presenti nella *point*

cloud da laser scanner potessero mediare l'orientamento anche del *dataset* UAV che ne era privo.

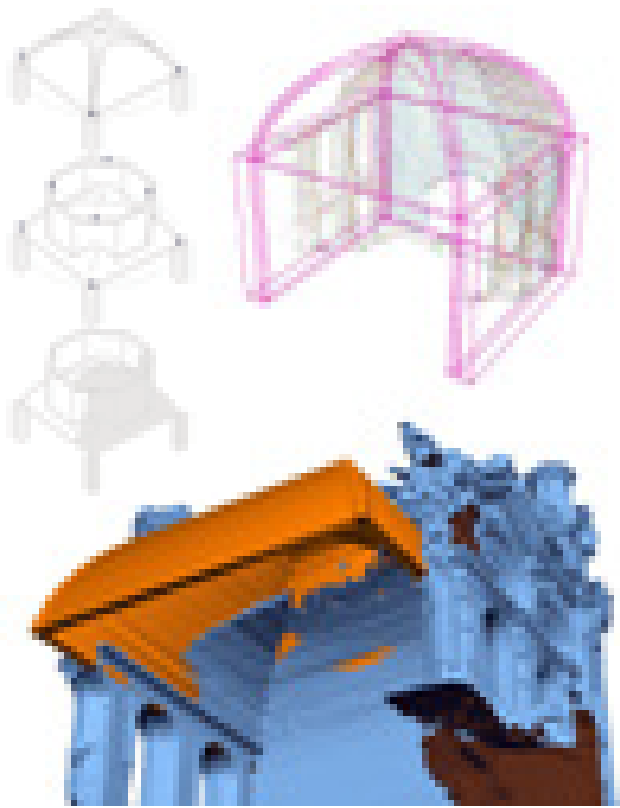
Il secondo aspetto ha riguardato il diverso intervallo di *point spacing* delle singole *point clouds* (mediante di 1-3 mm in quella da TLS, e di 5-10 mm in quella da UAV) e la sua influenza nella triangolazione di una maglia poligonale complessiva, dove fosse il più possibile garantita una lettura uniforme delle irregolarità strutturali. I due dataset discontinui sono stati affinati complessivamente su una lunghezza media di *edges* di 5 mm, rendendo compatibili i sistemi di lettura del modello finale. Tale *range* non ha compromesso le dimensioni relative di danno strutturale quantificabili nel complesso, legate alla geometria dei materiali costruttivi (prevalentemente laterizi e catene metalliche, di dimensioni parziali maggiori) ed alla soglia di tolleranza impostata per l'analisi (5 mm, compatibilmente anche alle valutazioni standard di sicurezza elastica).

Il set di punti finale ha subito ulteriori procedure di filtraggio, sia automatiche che manuali, finalizzato alla pulizia di tutte le informazioni spaziali non appartenenti all'involuppo della superficie strutturale, in particolare costituite dalla vegetazione infiltrata sia alla base che in sommità delle unità. Ulteriore attenzione è stata dedicata in corrispondenza delle aperture finestrate, manualmente pulite per una ricostruzione completa dello spessore murario. Il modello *mesh* ottenuto dalla triangolazione e dal *remesh* delle superfici ha verificato il target di dettaglio morfologico atteso, restituendo sia i profili strutturali principali che le qualità specifiche di geometria degli elementi tessuari, sia in superficie che sui bordi lungo la faglia di crollo.

Il caso studio dell'unità voltata nella campata centrale ha portato, a seguito della *mesh* finale, ad impostare dei piani di sezione a passo stabilito di 30 cm lungo tutte le superfici dell'unità (volta e murature verticali), estraendone dei profili aderenti alla specifica superficie morfologica ed importandoli in ambiente NURBS. Per estrusione,



(7.130) *Superficie mesh finale della porzione absidale della Blagoveshchenskaya Church, da integrazione di dati TLS e UAV. A seguito dei processi di allineamento, filtraggio ed ottimizzazione testati per il reverse modelling del dataset, il risultato finale ha presentato una buona conservazione dei dettagli morfologici sia (7.131) all'intradosso (prevalenza dato TLS) che (7.132) all'estradosso (prevalenza dato UAV), dove sono distinguibili le diverse componenti delle rovine strutturali e delle murature sottostanti.*

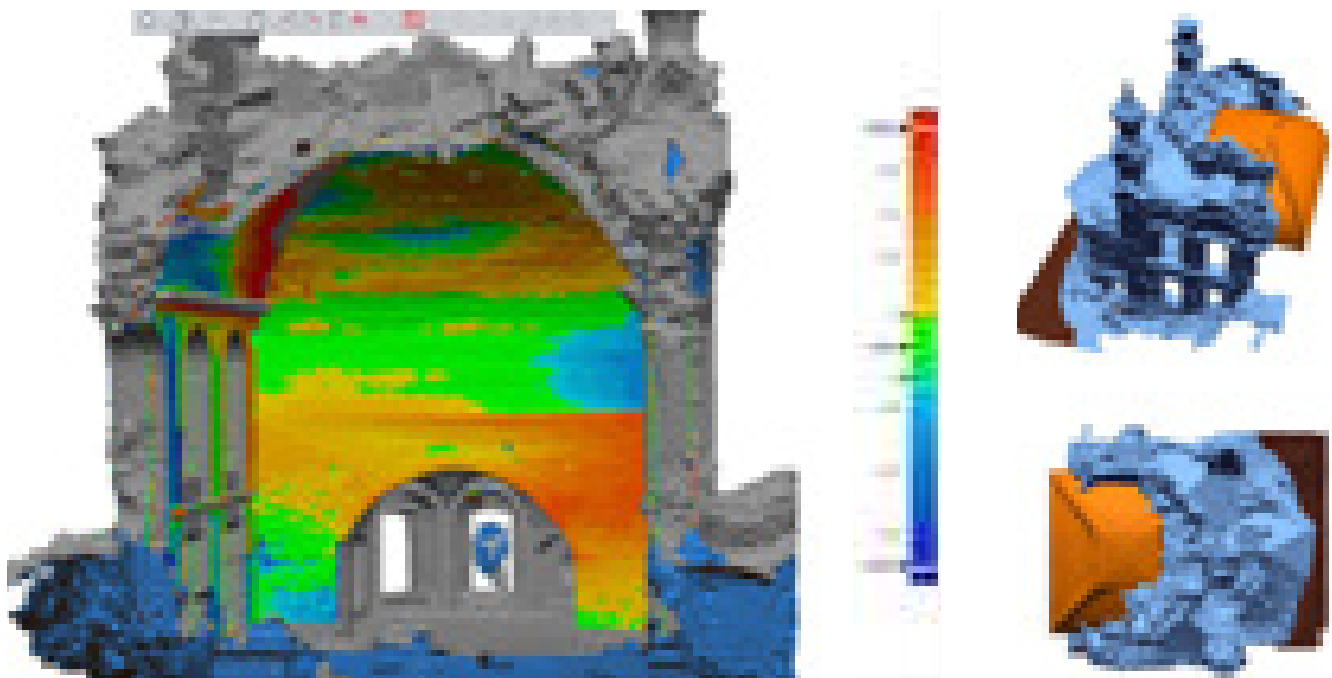


sono state ricostruite geometricamente i volumi strutturali dell'ambiente, secondo i profili regolari di progetto, ed importati nell'ambiente di *reverse modelling* per effettuare una comparazione con la superficie irregolare *mesh*.

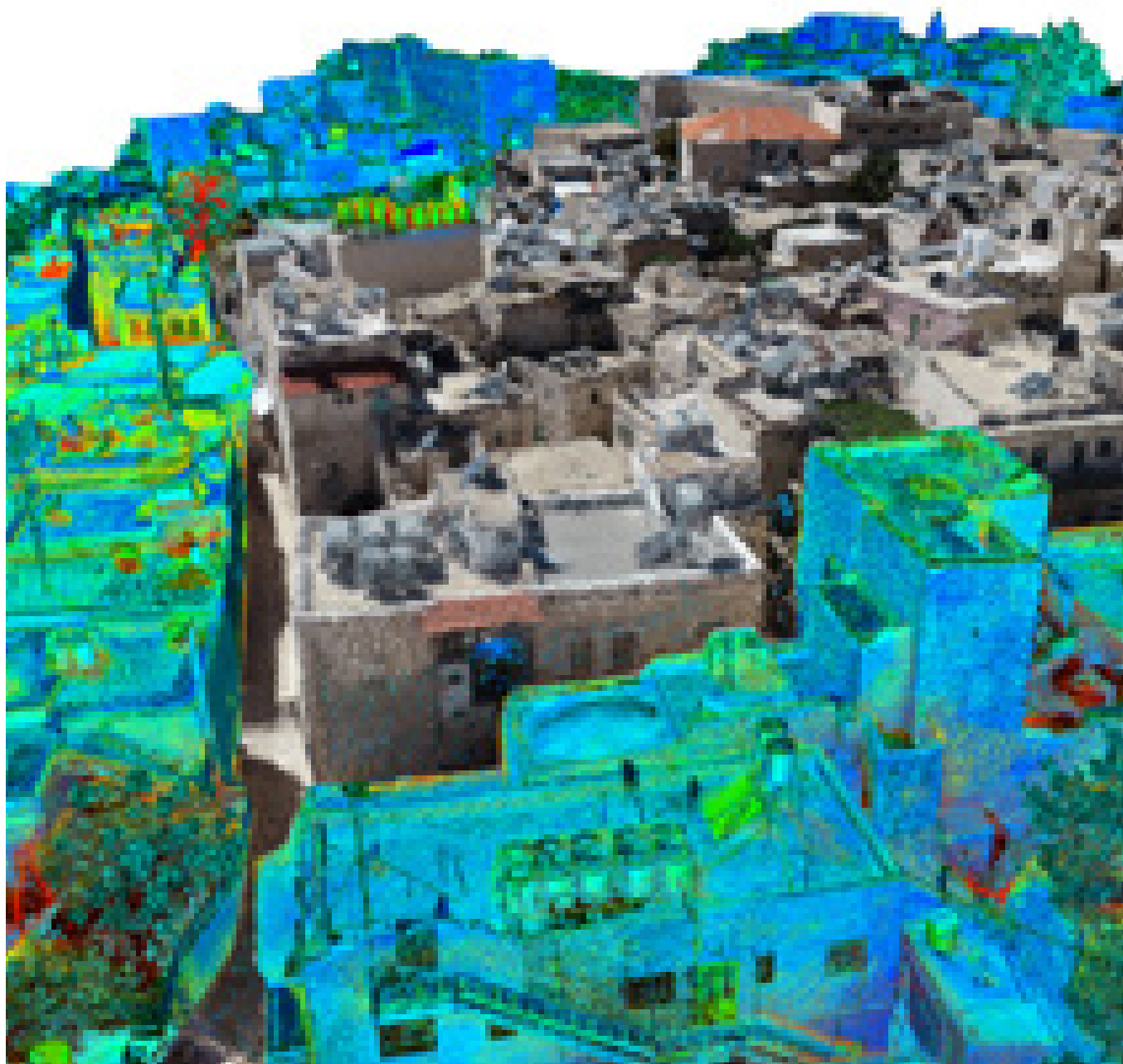
Il confronto di deviazione ha evidenziato come, all'interno di un complessivo fenomeno di dissesto che caratterizza l'intero sistema dell'unità resistente (possibilmente riconducibile all'evento di impatto che ne ha causato il crollo, siano riconoscibili alcune porzioni specifiche interessate da fenomeni locali di instabilità. Tali aree sono collocate sia sulla volta che sulle murature di sostegno, ed indirizzano le pratiche di intervento verso mirate azioni di consolidamento per la messa in sicurezza delle strutture in rovina e la loro conservazione.

(7.133) Interpolando le slice continue estratte dalla mesh finale, è stato possibile ricostruire una versione geometrica progettuale dell'originaria volta 'a schifo' della navata centrale, ed inserirla dall'ambiente NURBS a quello di reverse modelling del modello mesh (7.134-7.136)

Dalla comparazione con il modulo geometrico, è stato possibile leggere le porzioni di instabilità presenti sull'unità resistente (7.137), e derivare considerazioni diagnostiche in relazione ai complessivi schemi statici dell'intero complesso architettonico.



*Integrazione di dati morfo-metrici terrestri ed aerei
nella documentazione digitale del centro storico
di Betlemme*

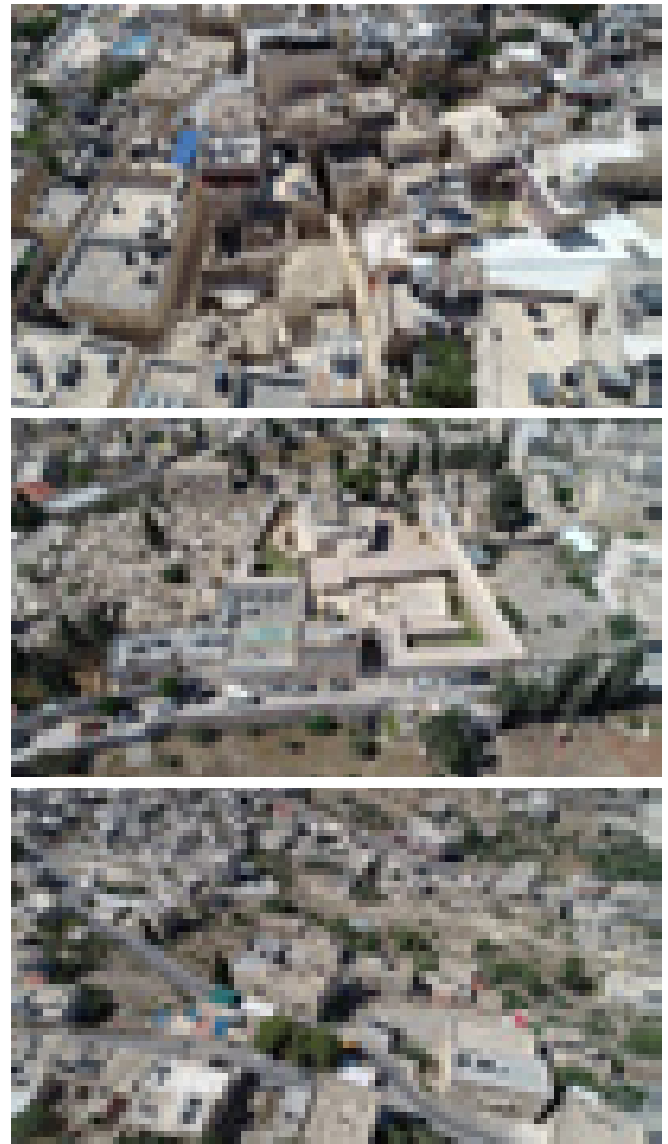


7.4. L'AGGREGATO URBANO: UN SISTEMA INFORMATIVO PER LA VALUTAZIONE STRUTTURALE ESTESA AL TESSUTO STRATIFICATO (BETLEMME, PALESTINA)

L'analisi dei tessuti urbani indirizza la lettura di eventi storici di stratificazione e crescita degli schemi architettonici di appartenenza, i quali a partire dai sistemi insediativi originali hanno gradualmente ma continuamente incluso soluzioni compositive, costruttive e di pianificazione dell'attuale forma di città e villaggi.

La crescita dell'urbanizzazione ha interessato il continente fino al Medio Oriente, generando un rapporto instabile tra strutture architettoniche e del territorio che allarma le amministrazioni anche di insediamenti tradizionali e di impianto secolare. In questo contesto, la saturazione della città per mezzo di innesti e sopraelevazioni dell'edificato esistente diventa pericolosa, generando architetture di scarsa qualità formale e costruttiva, senza controllo e conservazione e a rischio di collasso alla minima instabilità ambientale³⁰. L'estesa presenza di superfetazioni rivela inoltre l'assenza di strumenti di monitoraggio sulle dinamiche edilizie da parte degli organi incaricati, spesso in difficoltà nel fornire una quantificazione rapida delle azioni sul costruito che possa avviare linee di conoscenza e pratiche operative atte a regolamentare il rapporto tra apparati storici e nuovi interventi.

Il centro storico urbano di Betlemme offre il caso studio di una profonda trasformazione culturale del territorio mediorientale, attraverso episodi di modifica urbana, crollo sismico e ricostruzione di edifici, monumenti e strade che caratterizzano l'insediamento tradizionale. La struttura della città, incentrata su uno dei maggiori monti della valle di Gerusalemme prima della depressione geologica del Mar Morto, ha condizionato la pianificazione urbana obbligandola a adattare la disposizione ed organizzazione degli agglomerati alla differenza naturale di livello del terreno (circa 40 metri), con ambienti architettonici e percorsi urbani disposti lungo pendii, livelli costruttivi, terrazze e scalinate. L'insediamento ha visto la successione di differenti fasi e tradizioni costruttive, applicate a partire dai popoli arabi ed ebrei, ai romani, crociati europei, Ayyubidi, Mamelucchi,



Differenti densità di struttura tessuaria presenti nel perimetro del centro storico di Betlemme. Dall'alto: (7.138) aggregati insediativi ad alta densità, (7.139) complessi religiosi a media densità, (7.140) proprietà di espansione delle "field houses" a bassa densità.



Il caso studio della città di Betlemme offre un contesto insediativo storico profondamente influenzato da estese trasformazioni degli apparati costruttivi nel corso dell'ultimo secolo. Da villaggio rupetre di pastori, la città si è espansa modificando le strutture principali delle sue unità edilizie, gli awash, e saturando il territorio con nuove costruzioni e superfezioni a ridosso delle antiche fabbriche strutturali.

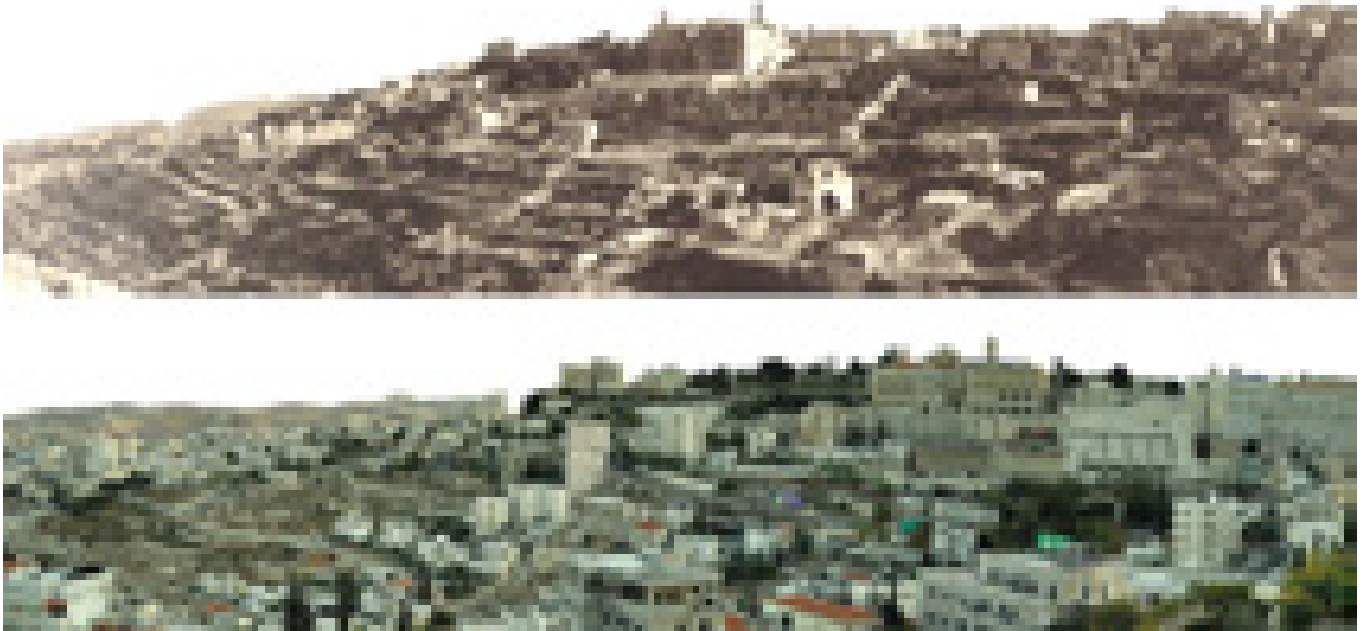
Dall'alto: (7.141-7.143) foto storiche della città di Betlemme ad inizio del XX secolo; (7.144) aggregato tipico della struttura urbana; (7.145) tipologia tradizionale di hosh abitativo.

Nella pagina a fianco: (7.146) la trasformazione del tessuto urbano di Betlemme dal 1919 al 2016.



greci ortodossi ed armeni, che con la loro convivenza nel corso dei secoli hanno definito importanti trasformazioni ed adattamenti del tessuto edificato. A partire dalla costruzione della Basilica della Natività nel 326 d.C., a ridosso di un sistema di grotte sotterranee, numerose modifiche furono apportate da Giustiniano all'insediamento circostante nel 540. L'attacco del 614 da parte dell'esercito persiano vide la totale distruzione della città, che fu parzialmente ricostruita dagli arabi fino alla conquista crociata del 1099. L'intero territorio della Palestina, compresa la città di Betlemme, fu occupato da Salah e-Din nel 1187, fino al ritorno dei cristiani nel 1192. Da quel momento fino al XIX secolo, la città subì un inarrestabile declino, che ridusse Betlemme in un povero villaggio di poche centinaia di abitanti e ne comportò un primo stadio di abbandono e degrado degli aggregati strutturali.

L'aumento della popolazione cristiana definì una progressiva rinascita del centro urbano, rivitalizzando anche costruttivamente l'impianto edilizio diffuso, ma allo stesso tempo causò la crescita di scontri con la popolazione musulmana e l'abbattimento di alcuni quartieri nel 1834. Conquistata ai turchi dagli inglesi nel 1918, la città seguì un mandato britannico fino al 1948, quando passò sotto



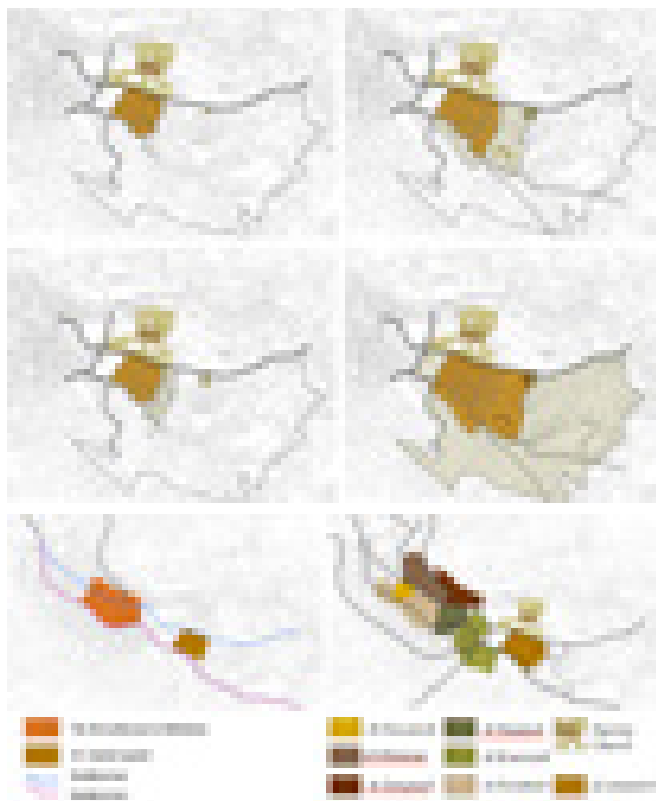
l'amministrazione militare israeliana dopo la guerra del 1967, ed alla giurisdizione palestinese dal 1995.

Le sintesi storiche e gli aspetti geomorfici del contesto hanno portato la città di Betlemme a svilupparsi in stretta relazione con il terreno roccioso di insediamento: la porzione più antica a ovest della Natività è stata fondata dalle origini dell'insediamento al XVI secolo, l'ala est nel XIX secolo, un'ulteriore espansione dei complessi religiosi a est all'inizio del XX secolo ed infine l'estensione del quartiere cristiano a sud-est durante il mandato britannico. Tali fasi storiche motivano caratteri di sviluppo insediativo che sono visibili anche nelle stratificazioni murarie delle fabbriche, motivandone la crescita degli aggregati e la loro saturazione alla base della struttura della città contemporanea.

La crescita della città nel XX secolo ha segnato uno sviluppo incontrollato del tessuto urbano, esaltando una forma organica priva di impostazioni geometriche regolari, sia nella planimetria che nell'elevazione di volumi, dove si sovrappongono strutture spaziali storiche ed unità costruttive di prevalente datazione ottomana o successiva, la cui ragione formale deriva da specifiche ma non pianificate esigenze di proprietà delle singole famiglie locali.

7.4.1. Il quadro di indagine in sito e la richiesta conoscitiva

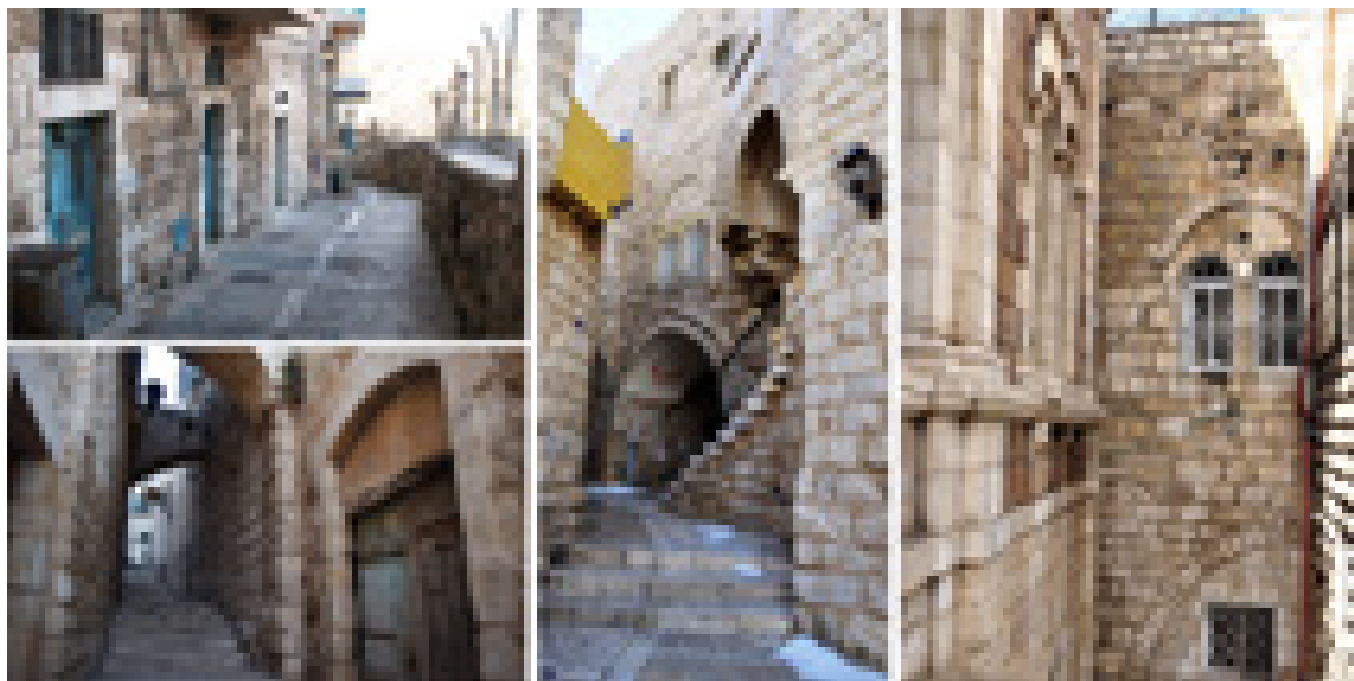
Il fenomeno sociale esteso di abbandono della città di Betlemme, dovuto alle politiche restrittive israeliane del 1993 ed all'incursione del 2000-2002, ha causato il danno progressivo di molte strutture abitative degli aggregati storici, ancora oggi abbandonate o abitate in condizioni di sussistenza. Nei confronti di tale quadro, le dinamiche della comunità sono orientate in due diversi atteggiamenti. Alcune famiglie hanno avviato lavori di ristrutturazione ed adeguamento delle unità alle crescenti esigenze ricettive o insediative, attuando però soluzioni di innesto ed ampliamento delle strutture spesso non corrispondenti alle norme di sicurezza. Tali interventi non regolamentati sovraccaricano o rendono labili gli schemi resistenti di matrice storica, mettendo a rischio di stabilità sia la singola unità che l'intero aggregato. Altre famiglie, ormai stanziate fuori dall'area comunale, continuano a mantenere la proprietà sull'immobile lasciandolo all'abbandono ed all'incuria, ed impedendo all'amministrazione di intervenire con una rifunzionalizzazione o per arginare condizioni critiche di instabilità. Anche nel caso di successiva cessione, il



recupero delle strutture ormai degradate risulta talmente oneroso e complesso, senza adeguata documentazione di orientamento, da spingere all'abbattimento del fabbricato esistente ed alla costruzione di nuovi impianti.

In tale quadro contemporaneo, la realtà costruttiva del centro storico di Betlemme rappresenta un patrimonio di elevato pregio sia locale che globale per la ricchezza di caratteri architettonici, costruttivi ed urbani che qualificano le strutture ed unità del tessuto edificato. L'analisi dell'insediamento evidenzia una macro-divisione per aggregati strutturali, storicamente legati alla fondazione degli *awhash* (singolare *hosh*) dei clan, a loro volta definiti da un'ulteriore stratificazione di unità edilizie occupate dagli ambienti privati di ogni famiglia.

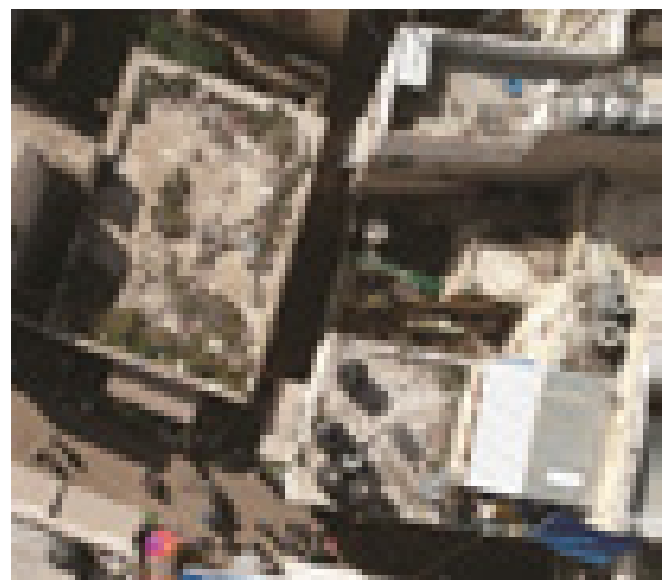
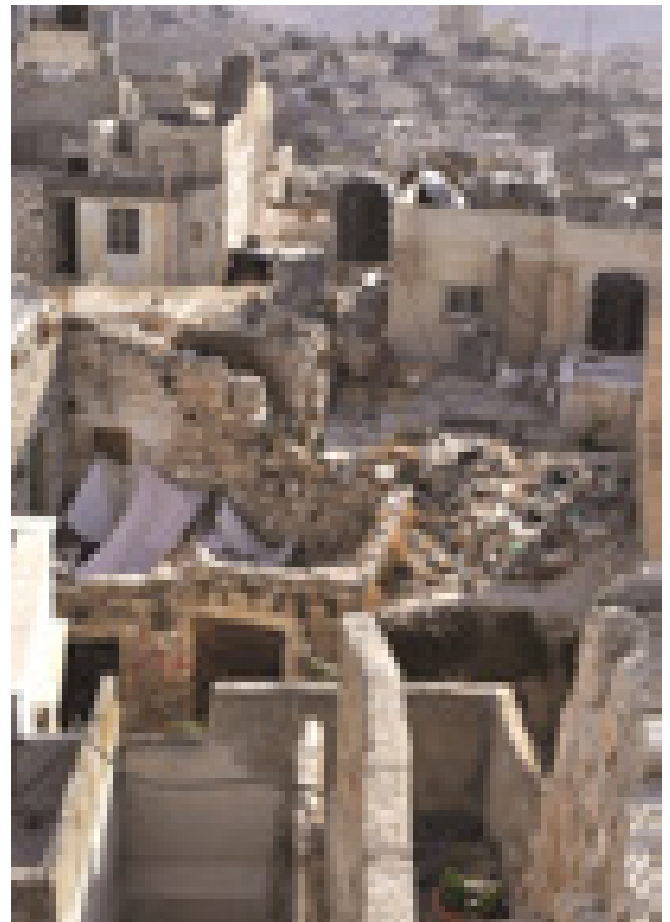
La tradizione delle tribù fondatrici ha coordinato la configurazione tipologica dell'architettura degli *ahwash*, condensati nel rapporto di strutture ed ambienti tra spazi privati, laboratori artigianali e magazzini, per attività produttive locali come la raccolta e la frangitura delle olive, la produzione e la conservazione dell'olio, il legno d'ulivo e la lavorazione artigianale della madreperla. Gli ambienti sono impostati con una distribuzione labirintica, spesso non limitata ai volumi visibili ma con soluzioni costruttive di connessione composta tra le strutture

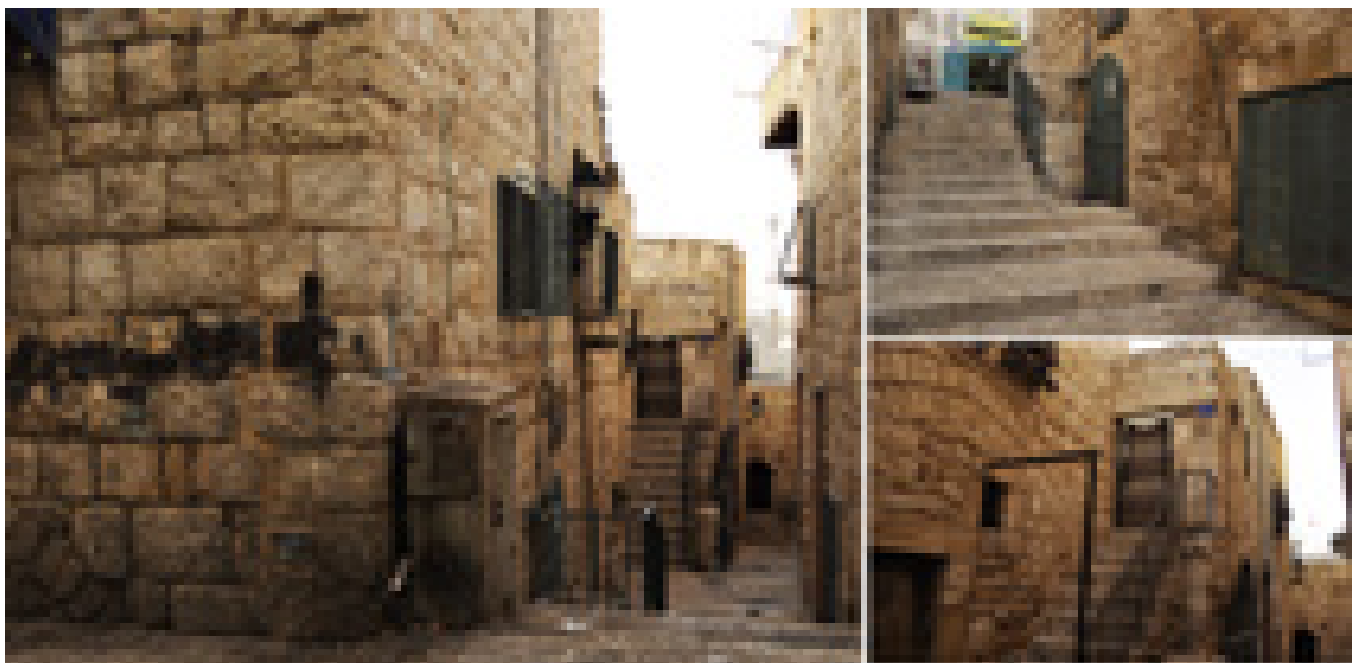


attraverso diaframmi, passaggi interni voltati (*qantara*) e collegamenti tra livelli diversi, spesso anche grotte sotterranee. La struttura complessiva dell'*hosh* tende all'impianto scatolare, equilibrando all'interno del suo sistema individuale le sollecitazioni statiche e tensionali dei componenti. Al centro dell'*hosh* è presente una corte privata, e le aperture dei fronti principali sulle strade urbane sono ridotte, limitate agli ingressi necessari per cortili, porticine ricavate nei muri perimetrali, o per gli spazi delle attività di produzione e vendita, mentre le aperture degli edifici residenziali sono concentrate nei livelli superiori per garantire una maggiore privacy dal livello stradale della vita pubblica, seguendo il codice edilizio ottomano. A livello volumetrico, le unità abitative sono costituite dalla ripetizione di moduli di circa cinque metri cubi attorno a uno spazio centrale, il cortile, da cui sono accessibili attraverso porte o scale private che conducono ai livelli superiori. Le strutture primarie, costituite da pareti in muratura di pietra locale di Gerusalemme, ricalcano il perimetro originale dell'*hosh* mentre moduli aggiuntivi, sia in pietra storica che in cemento prefabbricato, sono annessi all'impianto principale con soluzioni irregolari. La densificazione di tali agglomerati deriva dall'innesto o sopraelevazione delle unità con volumi edilizi di aggiunta, ciascuno apportante un proprio schema statico di forma, materiali e regola costruttiva. È il caso di piani di elevazione a telaio cementizio realizzati sopra le murature in pietra (spesso senza attenzione verso la distribuzione delle strutture resistenti sottostanti), innesti prefabbricati su fronti compatti o chiusura di terrazze e solette di sbalzo con sovraccarico

La lettura dei fabbricati della città permette di riconoscere processi di evoluzione che, dal nucleo originario del complesso della Natività, hanno portato all'espansione del processo di costruzione ed insediamento generando i quartieri storici attorno alle direttrici principali di collegamento (7.147). La stratificazione di apparati strutturali e caratteri architettonici di pregio evidenzia una ricchezza culturale unica di tradizioni costruttive e forme stilistiche arabe, romane e crociate (7.148-7.151).

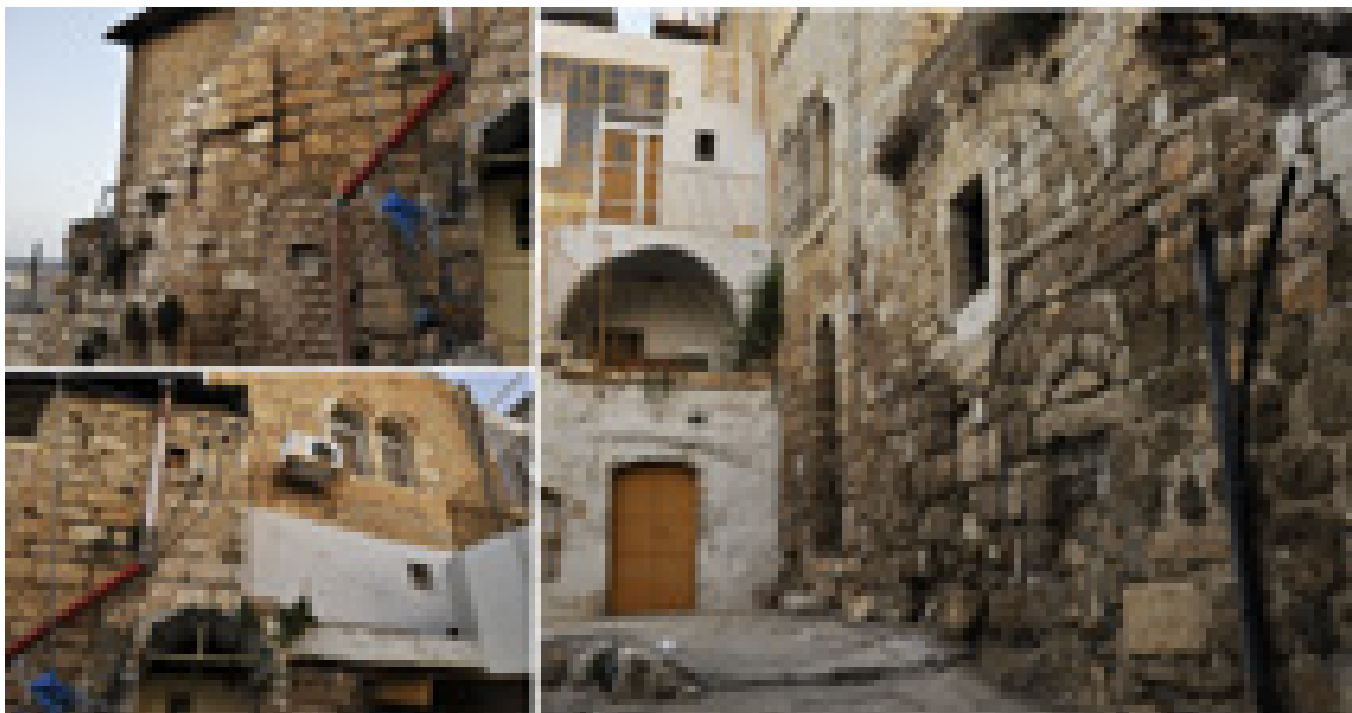
Il panorama contemporaneo, toccato dalla crisi politica e dall'abbandono delle proprietà storiche, ha decretato una situazione di abbandono e incuria diffusa nelle aree del centro, con condizioni critiche di instabilità strutturale ed incontrollato degrado che causano fattori di rischio ed emergenza all'interno del tessuto denso (7.152-7.153).





La conformazione degli aggregati strutturali del centro storico è caratterizzata prevalentemente da episodi di sopraelevazione, demolizione o innesto rispetto agli apparati originari (7.154-7.156), che sono leggibili come segni distinti nella muratura degli interventi avvenuti nelle diverse epoche.

La mancanza di una regolamentazione e di un controllo sui sistemi edilizi ha portato a soluzioni inusuali di stratificazione dei paramenti e dei setti resistenti, spesso con differenti materiali o con modifiche delle strutture principali differenti dal principale schema di scarico delle tensioni (7.157-7.159).



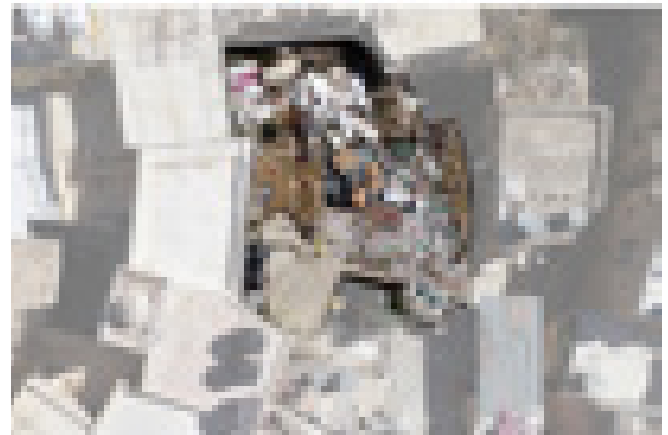
di nuovi ambienti. Altri casi ancora vedono l'abbattimento di porzioni dell'aggregato, o il loro crollo naturale, le quali sono lasciate in condizioni di rovina o sostituite da nuove costruzioni non corrispondenti all'originaria articolazione di sostegni, livelli e connessioni con l'esistente.

La struttura organica dell'agglomerato si trova così influenzata da distribuzioni di carichi e trasmissione di tensioni dovute alle relazioni di unità strutturali di diversi tipi e varianti, inserite successivamente al progetto degli *awhash* ed alteranti la configurazione equilibrata dei suoi apparati originari, spesso con caratteri ed influenze molto diverse dagli esempi tradizionali di valutazione³¹.

In tale contesto, la Municipalità di Betlemme ha esplicitamente richiesto un supporto collaborativo verso lo sviluppo di strumenti di monitoraggio e diagnostica sulle strutture urbane adatti a favorire le pratiche amministrative che regolano il governo del territorio, per avviare un consapevole protocollo di gestione della città, recependo le criticità insediative locali e trasferendole nella pianificazione della città. La collaborazione offerta tra i ricercatori dell'Università di Pavia, i tecnici comunali ed i professionisti ingegneri territoriali ha avviato percorso sperimentale di analisi del centro storico per l'implementazione di un sistema informativo 3D di controllo degli apparati urbani, affidabile alle diverse scale di interazione da quella costruttiva-strutturale a quella territoriale.

A fronte della specifica richiesta conoscitiva, dedicata ad un catalogo di descrittori e layer urbani difficilmente interpretabili da disegni bidimensionali, la proposta di una modellazione digitale di ambienti 3D integrabili con la piattaforma G.I.S. ha avviato la lettura delle complessità urbane sullo specifico carattere morfologico, associando forme e modelli al quadro censuario e di archivio raccolto dagli operatori, revisionato ed ampliato fino alla scala di dettaglio di fronti, degradi e diagnostica strutturale.

La classificazione morfologica delle strutture della città è così richiesta come metodo di ordine tra la scelta di forme e valori attribuibili per unità, fronti edilizi e strutture di spazio pubblico, per permettere alla municipalità di migliorare riflessioni e programmi sull'intervento nell'edificato, sia pubblico che di richiesta privata, supportandole con adeguate valutazioni dei meccanismi di interazione tra sistemi statici e quadri di instabilità del contesto edificato.



Dalle aree uniformi della città storica (7.160), è possibile operare un primo schema di analisi che discretizza il tessuto denso riconoscendo Unità Tessuarie (7.161) all'interno della suddivisione di spazi aperti, percorsi e volumi costruiti. La divisione in Unità Edilizie (7.162) riconosce al loro interno la caratterizzazione costruttiva delle singole unità abitative, decretandone i rapporti di influenza e distribuzione delle tensioni statiche localmente e rispetto all'intero aggregato.



(7.163-7.165) Azioni sul campo durante la campagna di rilevamento del centro storico (2018-2019), per la documentazione morfo-metrica con laser scanner terrestre e con camere fotogrammetriche aeree. Durante le fasi di analisi e mappatura del tessuto edificato, il supporto degli operatori tecnici del Comune di Betlemme è risultato fondamentale sia per la conoscenza delle tipologie costruttive che per la revisione dei contesti critici di intervento

7.4.2. L'azione di documentazione estensiva sul tessuto urbano

La fase di rilevamento digitale del centro storico di Betlemme è stata orientata sulla necessità di una documentazione primaria della “forma” architettonica della città, comprensiva di tutte le qualità spaziali storico-contemporanee sviluppatasi nell'evoluzione del suo impianto strutturale dall'originario insediamento ai prodotti antropici di espansione, saturazione e rovina³².

In particolare, la proporzione metrica ed il rapporto dimensionale tra le forme di componenti costruttivi, tipologie strutturali ed impianti storico-urbani per la lettura di fronti e disegni ha richiamato un'azione primaria di rilievo digitale e di strategica certificazione dei dati di acquisizione. La pianificazione di processi di verifica tra dati morfo-metrici acquisiti da LiDAR o fotogrammetria, affinati per scala di dettaglio e parametri di controllo, ha garantito la definizione di una banca dati 3D ottimizzata per lo sviluppo di considerazioni su forme, modelli e strutture della città reale-digitale, oltre a predisporre campi di integrazione strumentale alla scala territoriale.

L'elevata complessità di informazioni condensate nelle superfici architettoniche della città, dalle stratificazioni murarie alle componenti tecnologiche e di spazio urbano, è amplificata dall'estensione di indagine sull'intero perimetro storico. Ne deriva la necessità di definire una calibrata struttura metodologica per l'acquisizione e gestione di un'ampia mole di informazioni morfo-metriche.

La richiesta di un'esaustiva documentazione morfo-descrittiva del centro storico di Betlemme, al triplice livello architettonico-urbano-territoriale, è stata risolta nella riproposizione metodologica dell'attività di acquisizione in più campagne in sito, su porzioni del centro storico di dimensione e complessità adeguate a consentirne sia la singola certificazione che l'integrazione globale. Le operazioni di rilievo sono state calibrate per sviluppare procedure uniformi di acquisizione e documentazione del dato architettonico, nonostante la specifica conformazione non omogenea delle aree urbane, in particolare in termini di densità edilizia³³.

L'analisi preliminare condotta sul sito ha evidenziato la coesistenza di tre principali tipologie di tessuto: quartieri storici ad Alta densità tessutaria (gli *ahwash*), complessi religiosi a Media densità tessutaria, (i *cluster* edilizi³⁴ dei siti monastici), le proprietà di espansione a Bassa densità tessutaria (occupate dalle unità private delle “*field houses*”).

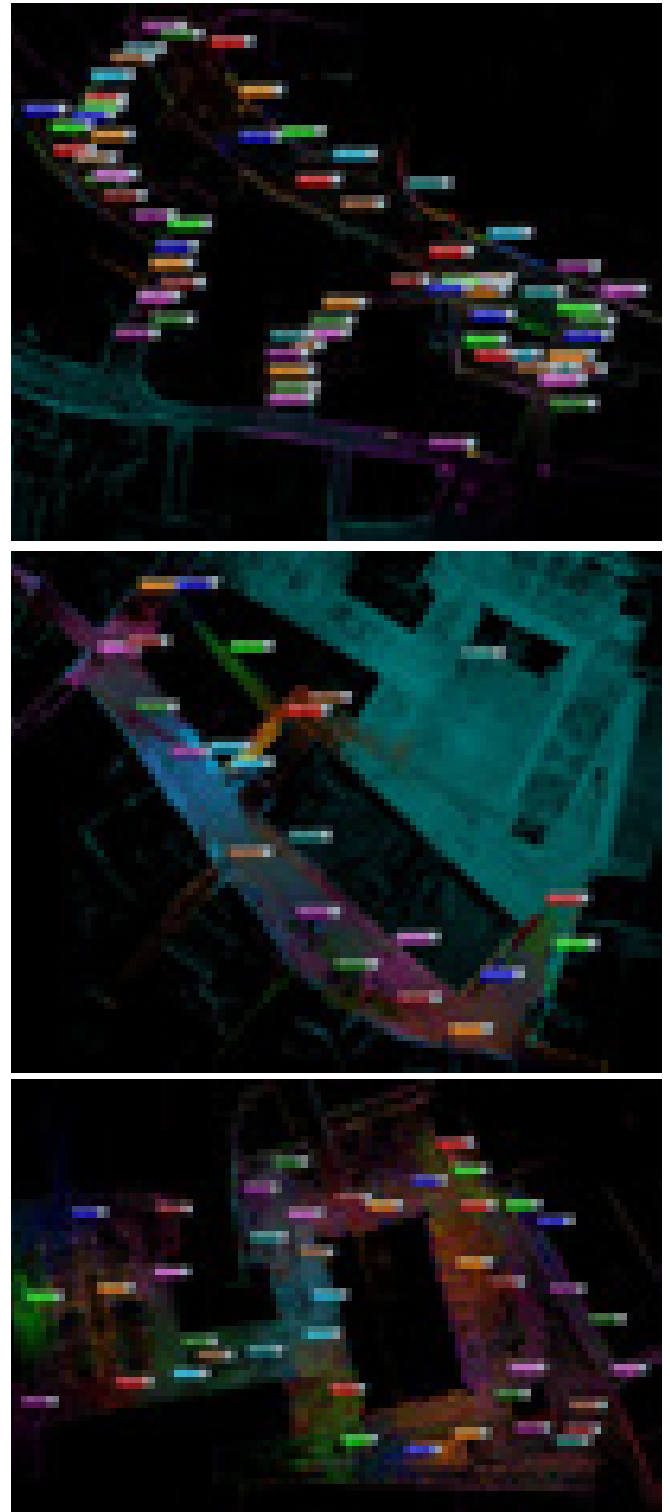
La conformazione altamente densa e labirintica tipica della città araba ha condizionato una strategia combinata di documentazione a diversi livelli di copertura, percorsi e target. La campagna di ripresa “statica” tramite laser scanner terrestre TLS ha operato un'acquisizione dettagliata sui fronti urbani e sulle superfici perimetrali degli *awash*. Parallelamente, la campagna di ripresa area con drone per fotogrammetria ha sviluppato una mappatura di coordinamento alla scala territoriale e di integrazione delle porzioni morfologiche di sommità ed interne agli aggregati.

Acquisizione statica morfo-metrica da Terrestrial Laser Scanner. La campagna è organizzata su 3 missioni in sito (giugno 2018, novembre 2018 e gennaio 2019) per coprire l'area del centro storico.

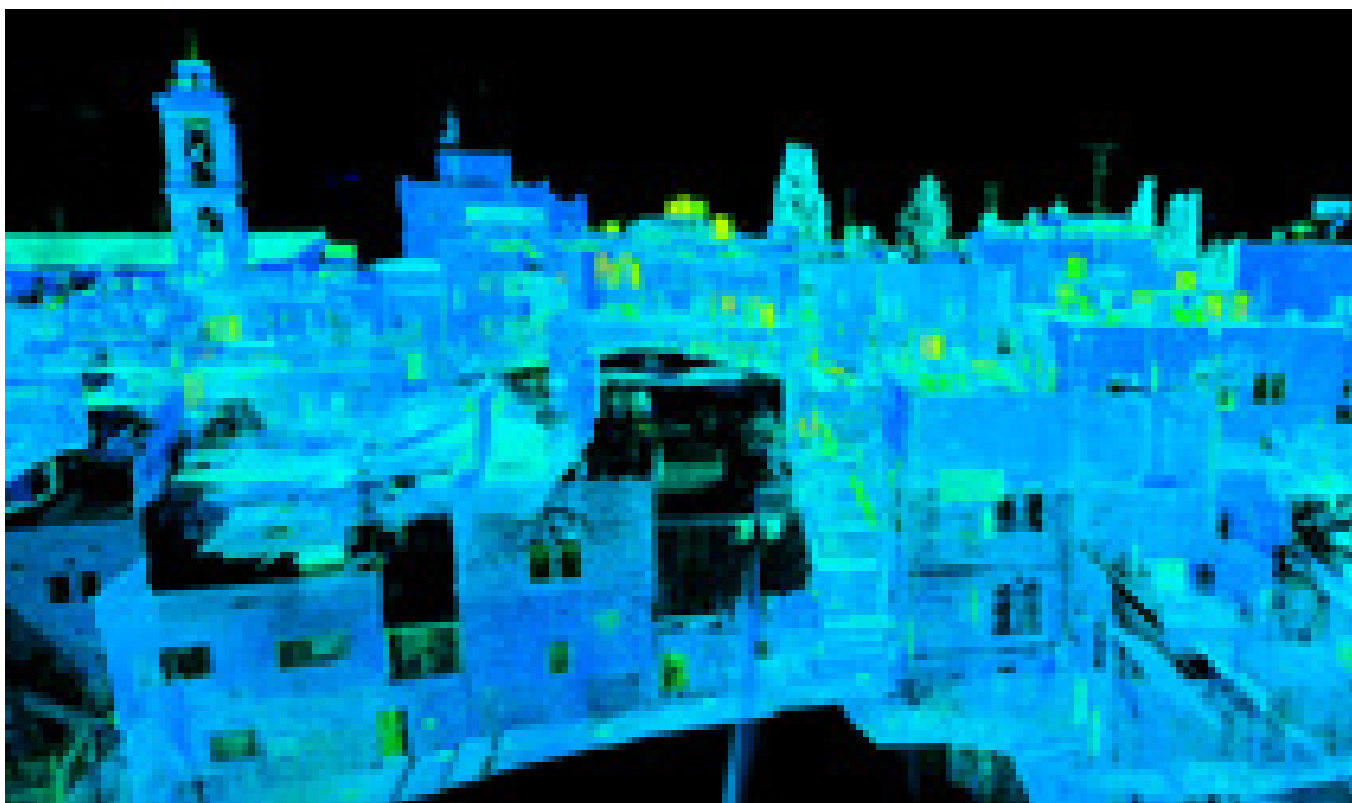
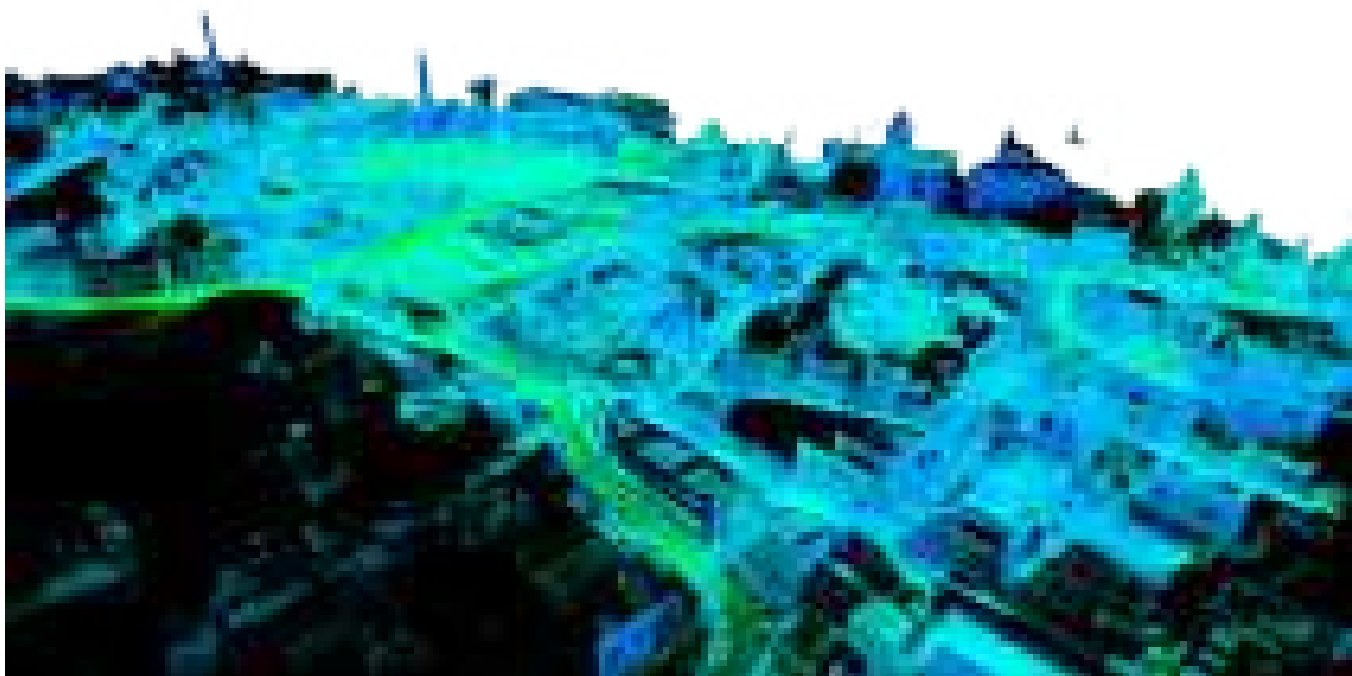
La scansione di percorsi e fronti urbani, condotta dagli accessi pubblici, è stata bilanciata con risoluzione di acquisizione *Medium Quality* (2.15 minuti per 68 mln punti), risultando ottimale in termini di nitidezza e copertura del dato per le fasce murarie dei livelli inferiori di edificato (fino a 7 metri), e sufficiente per i livelli superiori, considerando una visibilità inevitabilmente scoriata a causa delle contenute sezioni stradali (2 metri di larghezza per fronti di altezza superiore ai 12 metri).

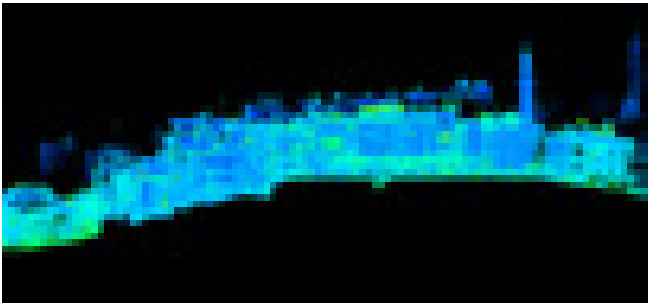
La morfologia labirintica del tessuto arabo ha limitato la visibilità di ogni scansione condotta dal piano stradale, nonostante il raggio di acquisizione massimo dello strumento scanner di 150 metri. Questo ha riconfermato, in termini di ottimizzazione delle campagne di rilievo e per garantire sufficienti punti omologhi tra *ScanStations*, i parametri di scansione considerati e la distanza tra postazioni contigue non superiore a 5 metri per acquisizione in *Medium Quality* e 15 metri per *High Quality* (3.25 minuti per 102 mln punti) sulle direttrici stradali più ampie.

L'accesso alle coperture, consentito solo su unità localizzate, ha previsto scansioni in *High* e *Super High Quality* (5.35 minuti per 167 mln punti), sfruttando il raggio massimo dello strumento (150 metri) ed integrando il dato metrico in corrispondenza di corti interne, coperture, livelli superiori di fronti ed altre superfici di visibilità ridotta dalla quota stradale.



(7.166-7.168) Procedure di allineamento e registrazione dei dati morfo-metrici acquisiti con TLS nel centro storico di Betlemme. Per garantire un controllo dell'errore in un contesto esteso e vario come quello della città labirintica araba, l'allineamento visuale è stato condotto cercando di ottimizzare una poligonale chiusa attorno ad aggregati principali, e successivamente procedendo per completamento ad anello degli isolati circostanti, espansi dalla ScanWorld di riferimento.





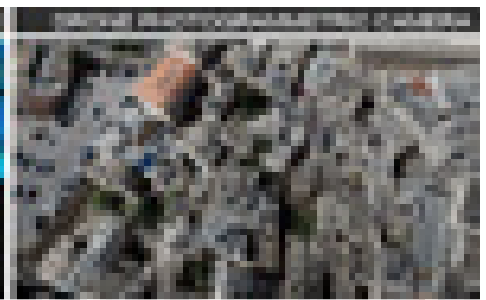
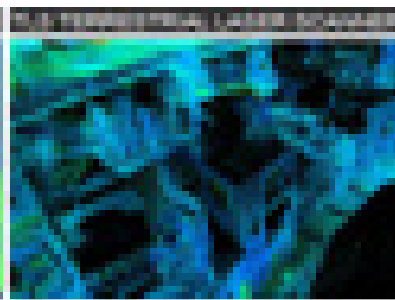
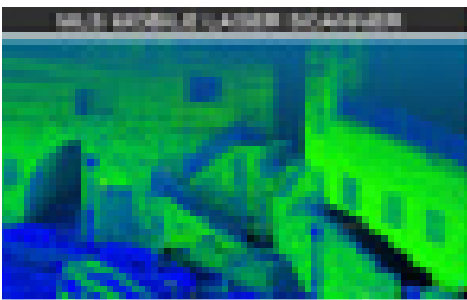
Nella pagina a lato: (7.169-7.170) viste prospettiche di insieme della nuvola di punti TLS totale, concentrate sugli involucri degli aggregati strutturali. Di particolare utilità per la ricostruzione della corretta distribuzione altimetrica dell'insediamento (7.171), l'acquisizione da terra ha evidenziato problematiche di ripresa in corrispondenza delle porzioni più alte di edificato (7.172), legate sia allo scorcio di misurazione delle strette strade urbane che a condizioni di schermatura degli elementi in aggetto, come solette, cornici, grate e tettoie.

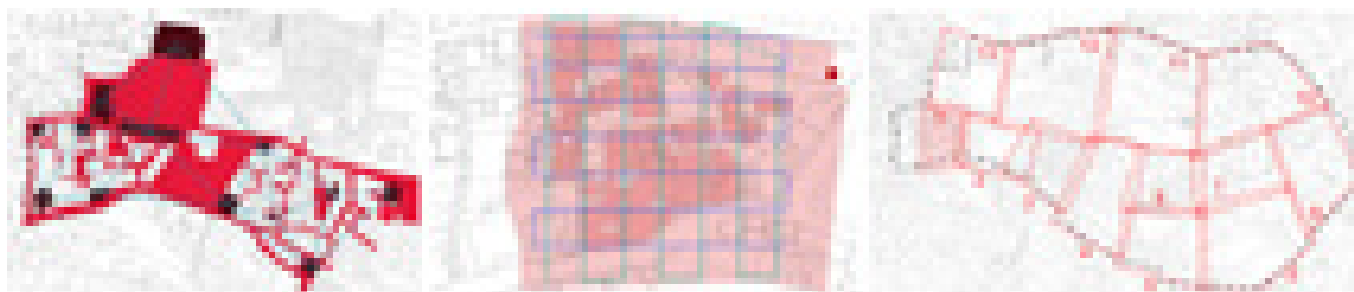
Per il conseguimento della copertura e completezza dell'informazione morfo-metrica sul tessuto urbano, diverse applicazioni strumentali sono state sperimentate, in particolare (7.173) acquisizione LiDAR mobile per traiettorie lungo le vie pubbliche, (7.174) acquisizione con TLS e (7.175) acquisizione SfM con drone, restituendo diverse densità di dato.

La strategia di acquisizione TLS dello spazio urbano, operata in modo “diffuso” al livello del suolo e “puntuale” per i livelli soprastanti, ha portato alla selezione di una serie di edifici all'interno di una maglia topografica triangolata, entro la quale sviluppare le corrispondenze metriche di integrazione di dato. Complessivamente, la campagna di documentazione morfo-metrica è stata indirizzata ad una copertura totale dell'involucro urbano, misurato direttamente o fornendo capisaldi metrici affidabili su cui operare una successiva integrazione strumentale.

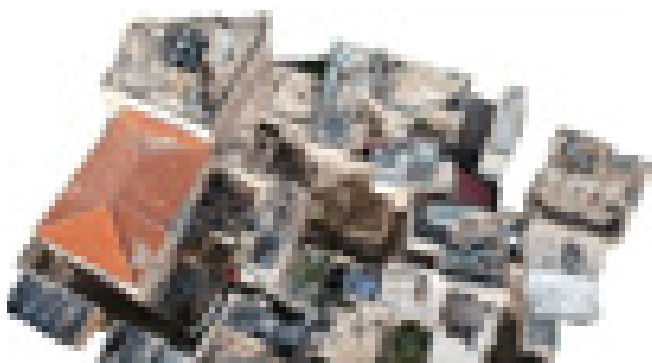
L'archivio finale di scansioni 3D sul centro storico di Betlemme ha incluso complessivamente più di 2.000 scansioni: 670 scansioni nel quartiere di Al-Anatreh (giugno 2018), 480 nel quartiere di Al-Kwawseh (novembre 2018) e 980 per i quartieri di Al-Fawagreh, Al-Hereizat, Al-Taraimeh e Al-Najajreh (gennaio 2019). In termini di tipologia di dato, circa 100 scansioni sono state condotte in modalità Super-High, 400 in modalità High e le rimanenti in modalità Medium.

La verifica della correttezza del dato acquisito, operata direttamente in sito ad intervalli regolari della missione di acquisizione, ha riscontrato i requisiti di *overlapping* e visibilità previsti per le singole scansioni, con il filtraggio dei fenomeni di rumore (coni d'ombra, pulviscolo atmosferico, riflessioni anomale) e la convalida dei dati metrici per le successive procedure di registrazione. I *cluster* di registrazione sono stati impostati prevedendo poligoni chiusi attorno agli isolati principali, concatenati attraverso tracciati di espansione originati da un nucleo fondamentale e successivamente ampliati verso i margini del perimetro storico. Rispettando le tolleranze progettuali di rilevamento urbano e di analisi strutturale, l'errore di registrazione è stato limitato a massimo 3 mm sulle superfici discrete, mediato nel raggio di 50 metri dal punto di scansione.

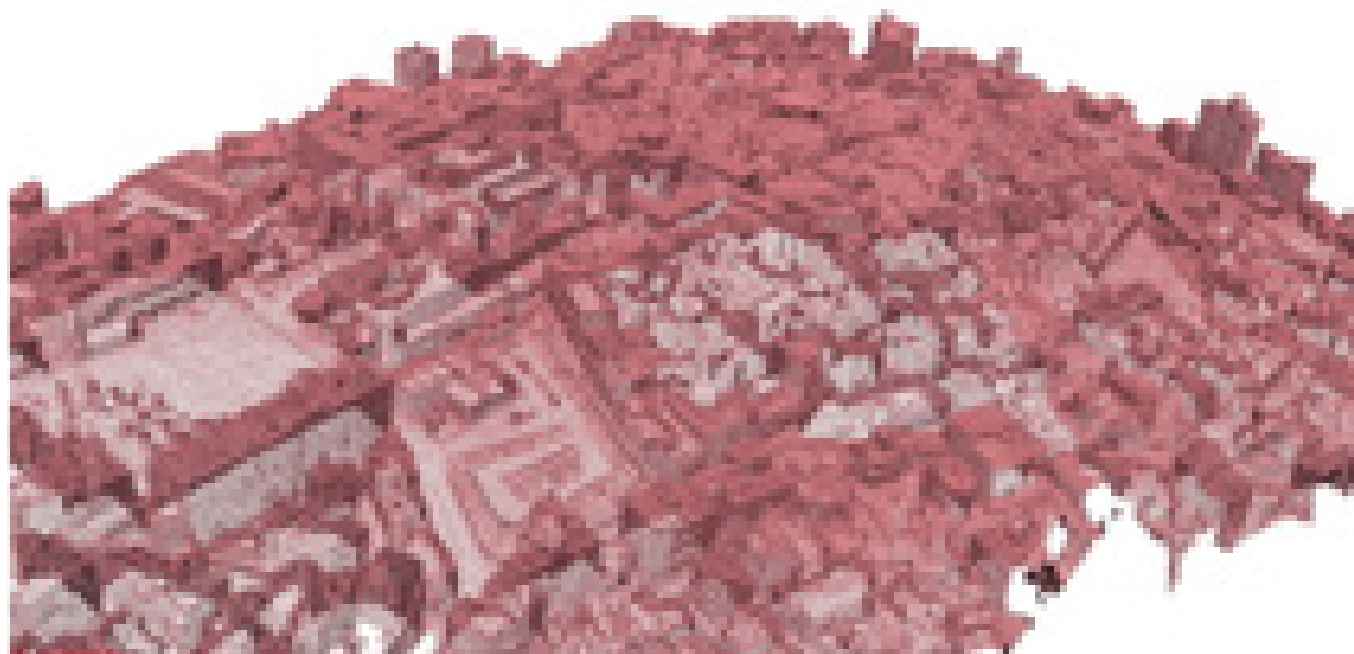


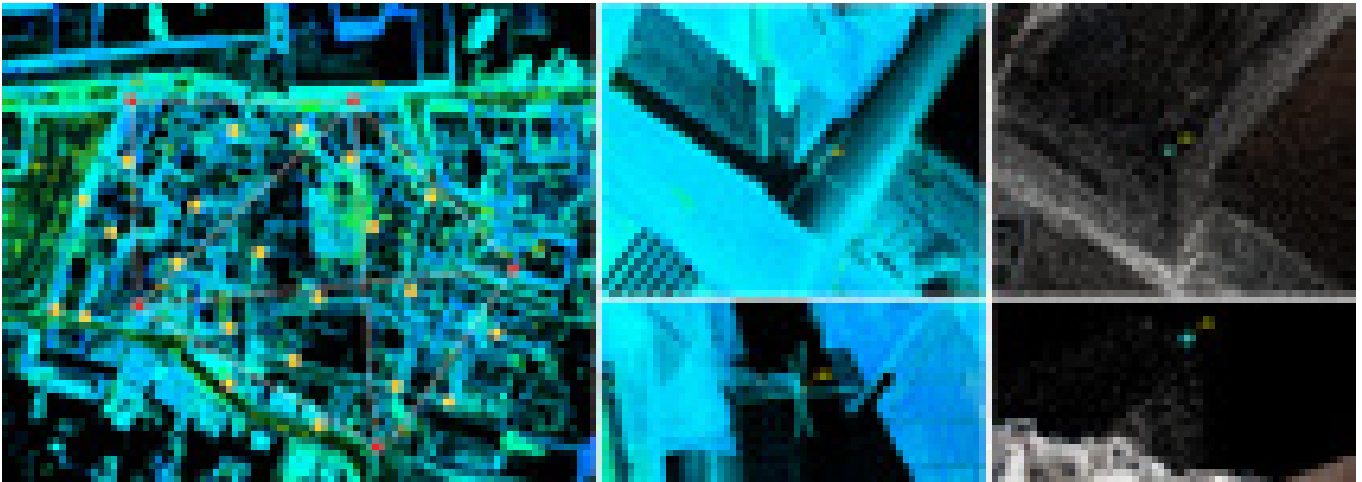


Strategie di pianificazione dei percorsi di ripresa strumentale: (7.176) per fronti urbani lungo i percorsi pubblici e postazioni sopraelevate dai principali edifici del centro (secondo una rete triangolata) nel caso del TLS, (7.177-178) per griglie di scatto divise in aree di mappatura nel caso degli UAV.



La documentazione fotogrammetrica aerea è stata pianificata secondo macro-porzioni di aggregato (7.179), garantendo un dettaglio morfologico adeguato alla lettura delle variazioni formali caratteristiche delle strutture edilizie (7.180). I singoli chunk sono stati poi referenziati tra loro per target conosciuti, fino a ricostruire l'intero tessuto edificato e la conformazione paesaggistica del territorio (7.181).





(7.182-7.184) Integrazione della nuvola di punti da TLS con la dense cloud da fotogrammetria aerea, per la copertura totale di discretizzazione morfo-metrica del tessuto urbano. La referenziazione è stata condotta attraverso target manuali, secondo le differenti accuratèzze di misurazione, impostati su una rete triangolata.

La registrazione delle scansioni sulle coperture ha previsto parametri differenti, dovuti agli elevati scorsi di sovrapposizione di percorsi e fronti urbani visibili dai livelli più alti: in questi casi è stato sfruttato il raggio massimo di 150 metri per la computazione *cloud-to-cloud* e sono stati tollerati errori fino a 5 mm.

Ripresa fotogrammetrica aerea da drone. La limitazione del dato nella documentazione dei livelli superiori di edificato, a causa del tessuto urbano denso e compatto, ha previsto l'integrazione con set di dati morfologici da sistemi speditivi di fotogrammetria aerea UAV, elaborati nella forma di nuvole di punti 3D pur con tolleranze di affidabilità inferiore, dell'ordine di 10-20 cm. Le differenti risoluzioni tra i prodotti metrici hanno impedito di operare una registrazione *cloud-to-cloud*, procedendo con l'identificazione di capisaldi triangolati per l'orientamento. Complessivamente, l'integrazione è stata condotta con una valutazione delle lacune di dato riscontrate sulla nuvola di punti TLS finale e della maggiore affidabilità metrica nelle porzioni di compresenza di dato:

- *Agglomerati urbani:* acquisizione TLS condotta alla quota terrestre dalla totalità di percorsi

stradali ed aree pubbliche. Non è stata prevista alcuna integrazione.

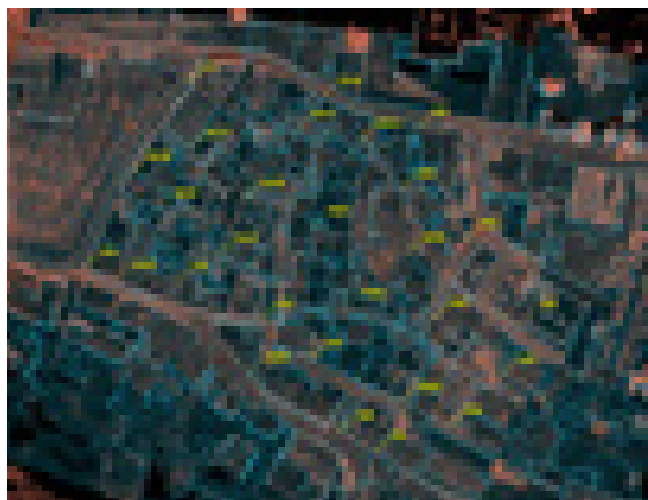
- *Coperture e fronti superiori:* acquisizione TLS condotta da livelli in quota, terrazzamenti, tetti privati e complessi monastici che hanno consentito l'ingresso agli operatori. Integrazione media da fotogrammetria UAV (< del 50% dei dati morfologici).
- *Corti interne:* acquisizione TLS condotta alla quota terrestre per le corti semi-pubbliche o rese accessibili; acquisizione dai livelli di copertura per le corti private o abbandonate. Integrazione bassa da fotogrammetria UAV (< del 25% dei dati morfologici).
- *Aree monumentali/religiose:* acquisizione TLS condotta solo perimetralmente, in corrispondenza dei percorsi urbani pubblici. Integrazione alta da fotogrammetria UAV/scansione Mobile (< del 75% dei dati morfologici).
- *Proprietà residenziali private:* acquisizione TLS condotta alla quota terrestre dalla direttrice stradale più vicina, esternamente alla proprietà privata. Integrazione alta da fotogrammetria UAV (< del 75% dei dati morfologici).

7.4.3. La modellazione come strumento di controllo per la classificazione delle instabilità del tessuto storico sull'aggregato urbano

Il progetto sul centro storico di Betlemme porta il tema della documentazione per l'analisi delle instabilità strutturali ad una scala estensiva di mappatura sull'insediamento diffuso. Il processo di conoscenza si spinge così sulla ricostruzione di una forma strutturale che sia impostata oltre i limiti del complesso architettonico, raggiungendo la dimensione dell'involuppo dell'aggregato per descrivere le logiche meccaniche proprie dell'insieme del tessuto edificato. Al contempo, però, il dettaglio di conoscenza richiesto si riafferma come architettonico, unico in grado di restituire quella particolarità formale di segno e traccia degli aspetti di instabilità agenti sulla struttura.

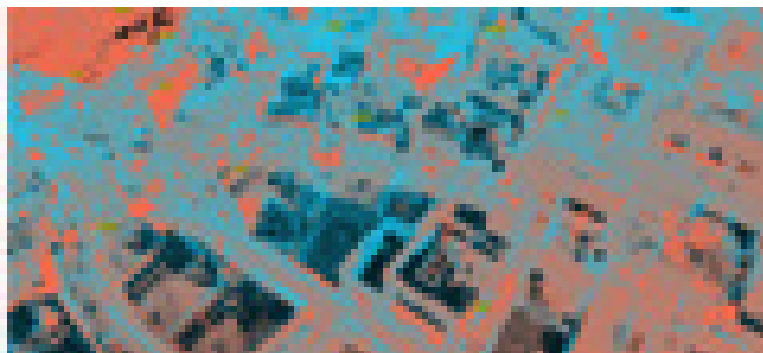
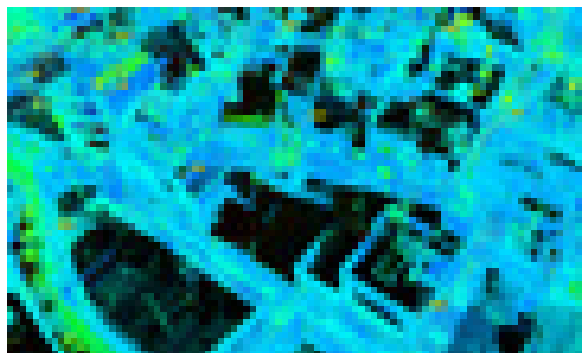
Il metodo di estrazione delle *elevation map* tenta così di essere riapplicato come valutazione preliminare, con tolleranze analoghe al contesto architettonico ed esteso alla dimensione di distribuzione e relazione delle unità urbane. Tale procedura evidenzia però l'insorgere di aspetti critici nell'interpretazione delle *color map* ottenute. La variazione morfologica caratteristica degli episodi locali di deformazione rimane valida, ma con una diffusa alterazione dovuta ai salti di geometria ed allineamento presenti all'interno dei singoli fronti urbani, dove infrastrutture, interventi ed apparati di sovrapposizione non complanari manipolano l'assegnazione di valori della scala cromatica, ed alterano l'informazione corrispondente inserendosi in un linguaggio grafico a loro non destinato.

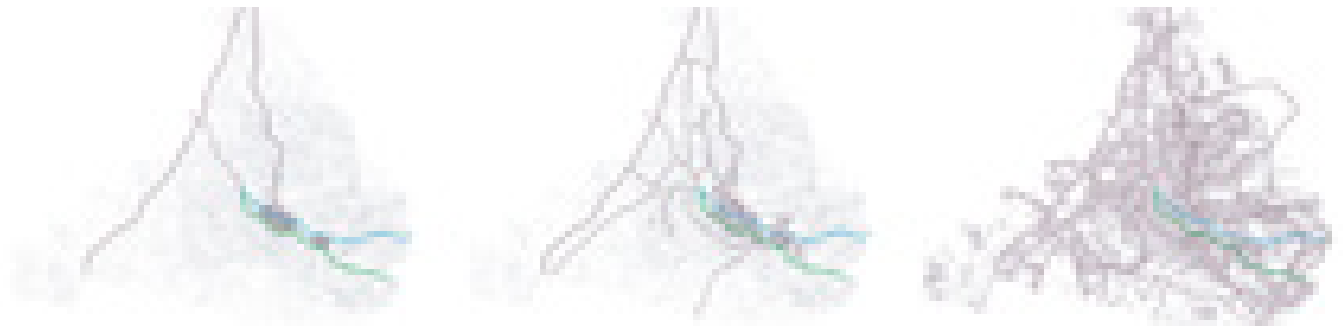
La ricerca di una metodologia di modellazione con scomposizione e certificazione delle variabili di imperfezione formale è così riconfermata, come target visuale sul quale



L'integrazione tra i database provenienti dalle riprese terrestri ed aeree hanno permesso di completare la documentazione sulla forma urbana degli aggregati in corrispondenza dei cortili privati e dei comparti interni, definendo non solo l'involuppo esterno dell'aggregato ma anche le sue modulazioni interne. La differenza di qualità formale è evidente, più approssimata nel caso del dense cloud da drone, e deve essere accuratamente valutata durante il processo di modellazione.

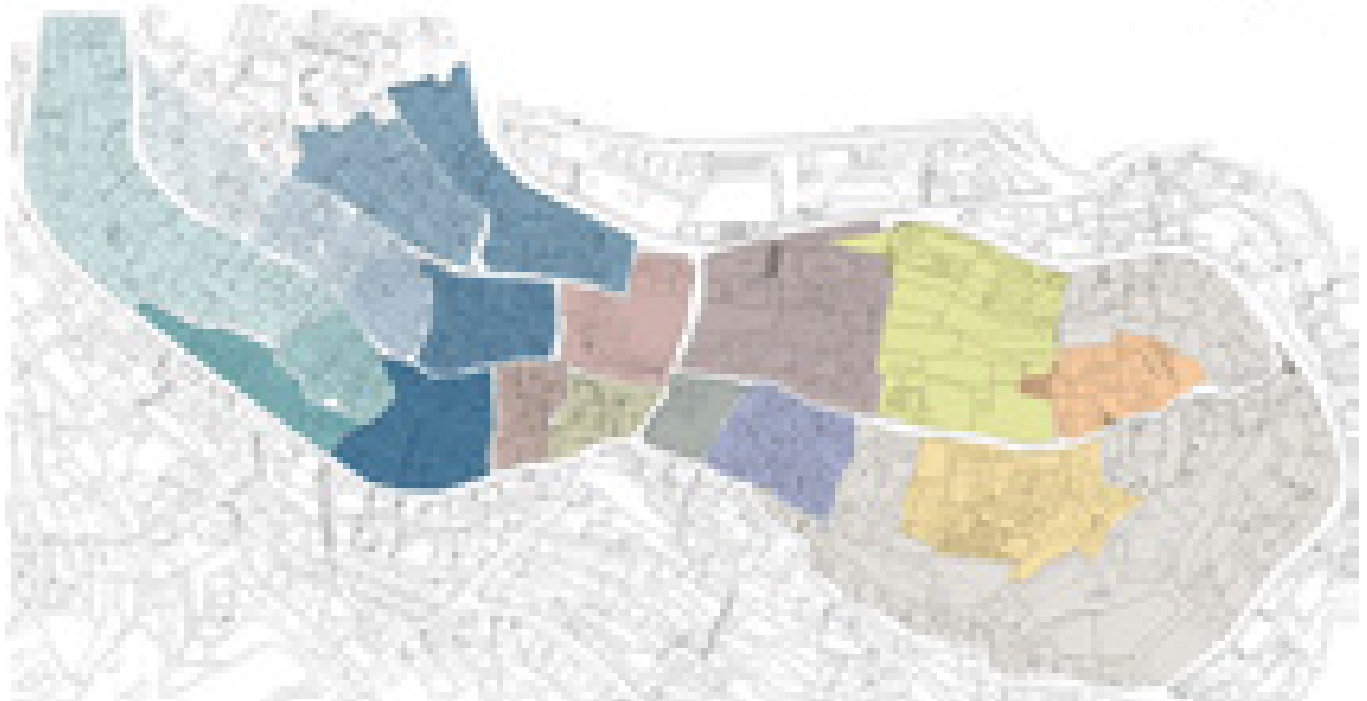
(7.185-7.188) Referenziazione dei dati tra TLS e UAV, in rosa la nuvola TLS sui fronti urbani, in blu la nuvola di punti da UAV all'interno del





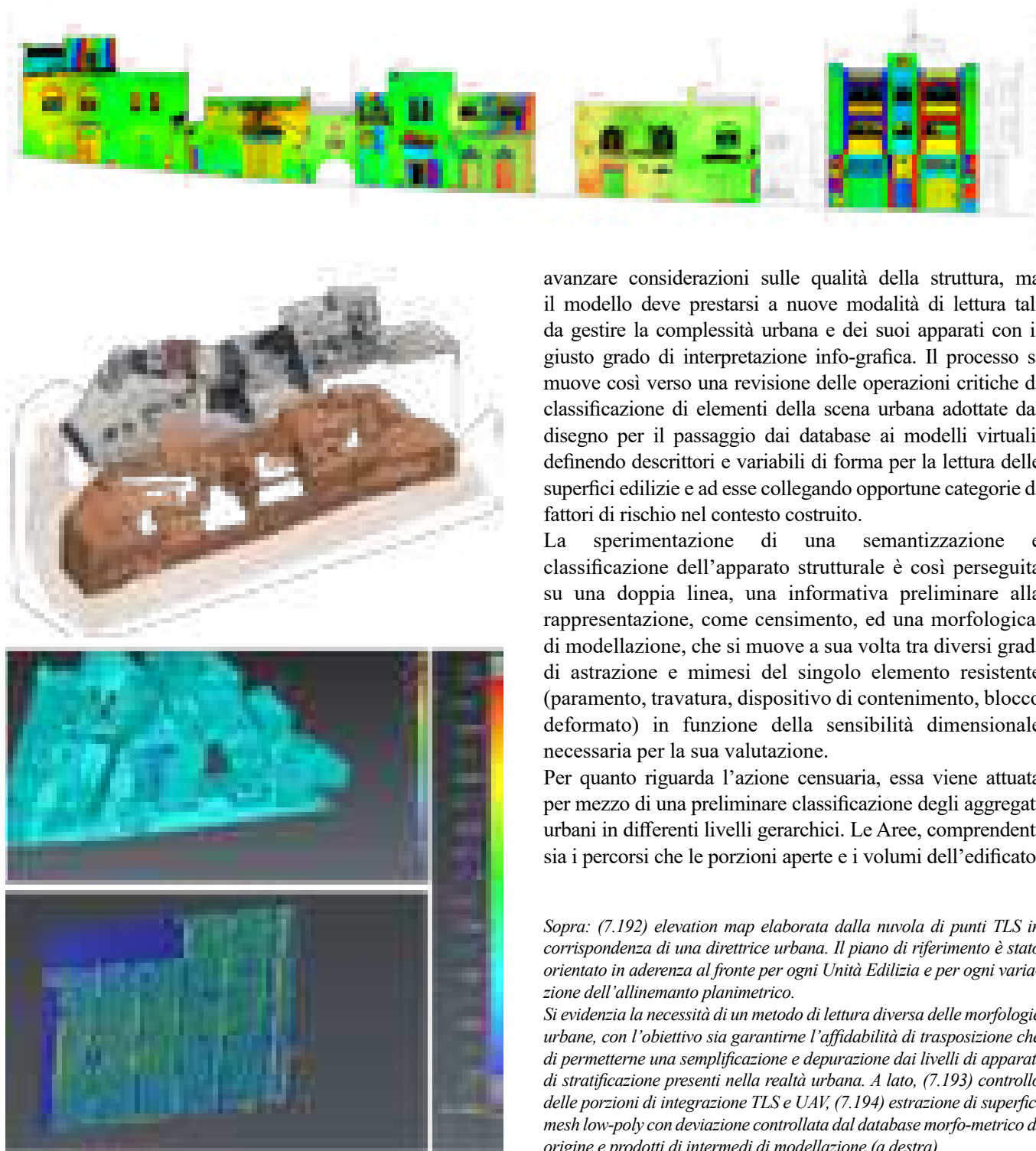
(7.189) Diretrici infrastrutturali e densificazione del territorio edificato all'interno dell'area comunale di Betlemme.

Sotto (7.190) macro-divisione per aree del centro storico di Betlemme, corrispondenti ai quartieri principali di sviluppo storico della città.



Sotto (7.191) dall'analisi delle singole aree e dalla loro scomposizione in Unità Tessuarie e Unità Edilizie è possibile conseguire una divisione logica degli aggregati urbani coerente con la stratificazione e lo sviluppo dei loro apparati strutturali. Tale analisi permette di valutare la gerarchia di innesto ed ampliamento delle singole strutture, e di guidare il processo di modellazione sia per unità che per comparti murari.





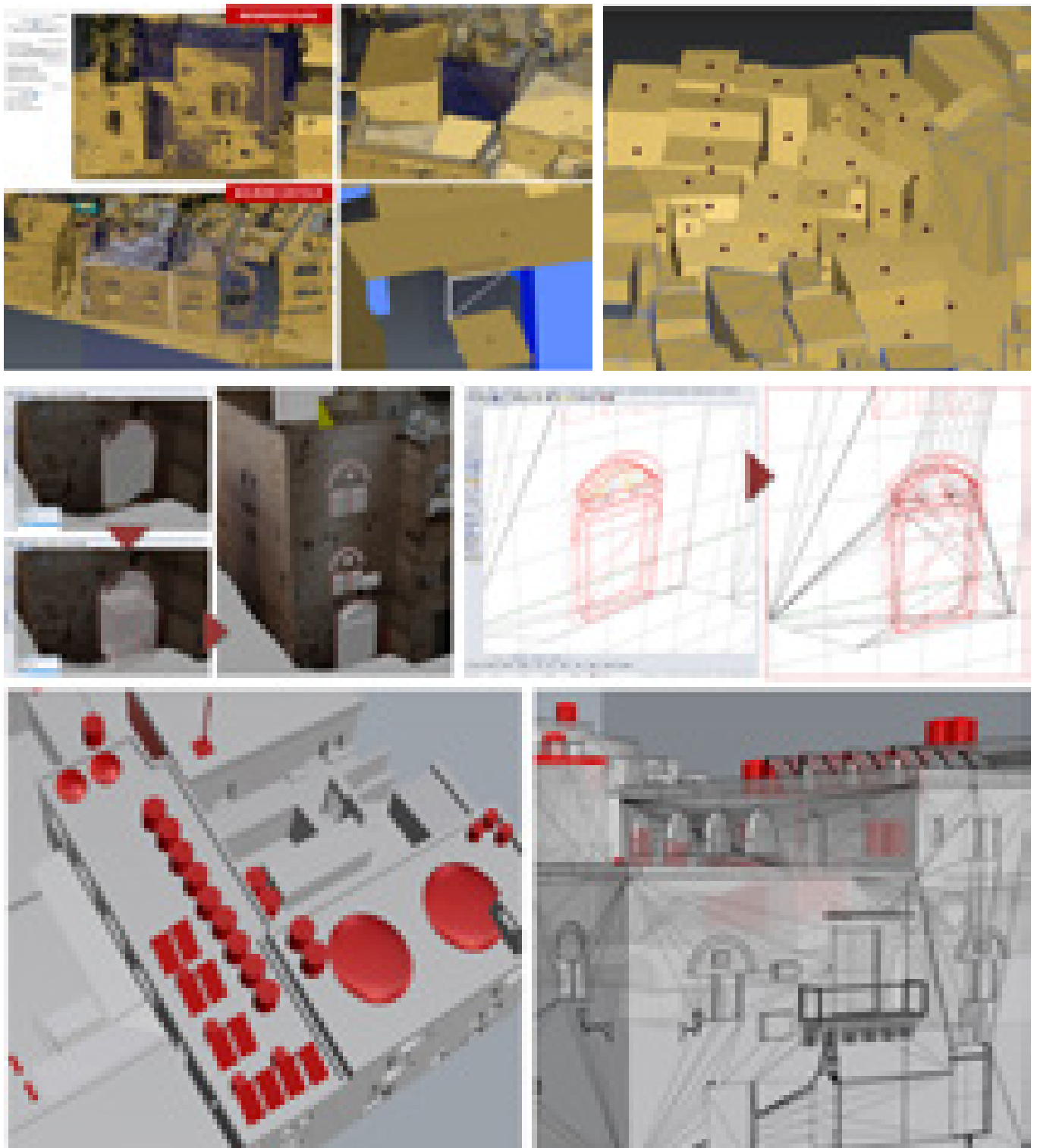
avanzare considerazioni sulle qualità della struttura, ma il modello deve prestarsi a nuove modalità di lettura tali da gestire la complessità urbana e dei suoi apparati con il giusto grado di interpretazione info-grafica. Il processo si muove così verso una revisione delle operazioni critiche di classificazione di elementi della scena urbana adottate dal disegno per il passaggio dai database ai modelli virtuali, definendo descrittori e variabili di forma per la lettura delle superfici edilizie e ad esse collegando opportune categorie di fattori di rischio nel contesto costruito.

La sperimentazione di una semantizzazione e classificazione dell'apparato strutturale è così perseguita su una doppia linea, una informativa preliminare alla rappresentazione, come censimento, ed una morfologica, di modellazione, che si muove a sua volta tra diversi gradi di astrazione e mimesi del singolo elemento resistente (paramento, travatura, dispositivo di contenimento, blocco deformato) in funzione della sensibilità dimensionale necessaria per la sua valutazione.

Per quanto riguarda l'azione censuaria, essa viene attuata per mezzo di una preliminare classificazione degli aggregati urbani in differenti livelli gerarchici. Le Aree, comprendenti sia i percorsi che le porzioni aperte e i volumi dell'edificato,

Sopra: (7.192) elevation map elaborata dalla nuvola di punti TLS in corrispondenza di una direttrice urbana. Il piano di riferimento è stato orientato in aderenza al fronte per ogni Unità Edilizia e per ogni variazione dell'allineamento planimetrico.

Si evidenzia la necessità di un metodo di lettura diversa delle morfologie urbane, con l'obiettivo sia garantirne l'affidabilità di trasposizione che di permetterne una semplificazione e depurazione dai livelli di apparati di stratificazione presenti nella realtà urbana. A lato, (7.193) controllo delle porzioni di integrazione TLS e UAV; (7.194) estrazione di superfici mesh low-poly con deviazione controllata dal database morfo-metrico di origine.e prodotti di intermedi di modellazione (a destra)





(7.195) Modellazione delle strutture degli agglomerati urbani per astrazione degli involucri principali nei blocchi resistenti, derivanti dall'interpolazione delle superfici discrete in mesh low-poly. Il dettaglio formale del modello, criticamente semplificato per superfici, è stato arricchito con elementi di dettaglio costruttivo e tipologico per identificare i principali caratteri architettonici (7.196).

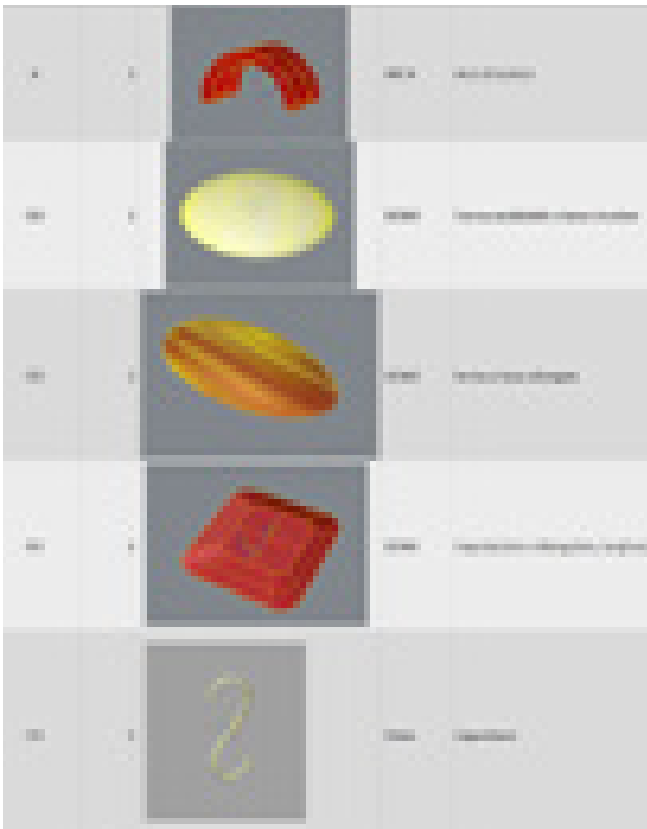
le Unità Tessuarie, definibili come agglomerati di edifici indipendenti delimitati da percorsi pedonali o carrabili, e le Unità Edilizie, che individuano e classificano i singoli edifici sulla base di caratteristiche di continuità tra murature, coperture e organicità tipologica. Ciascuna di esse, descritta attraverso l'analisi dei suoi fronti, approfondisce la conformazione delle superfici strutturali per continuità, tessitura, presenza di volumi ed espansioni, e di soluzioni di stabilità o contenimento meccanico, come diatoni, cordoli lignei, catene e capichiave, cerchiature e contrafforti, diaframmi o arcate di scarico.

L'identificazione di tali descrittori ha condotto ad un'azione di modellazione per il passaggio dal *database* "discontinuo" al modello "continuo" intesa sia per l'elaborazione di un'interfaccia fruitivo tra il contenuto informativo e le trasformazioni sulla città reale, sia per la generazione di un supporto 3D a sua volta rivelatore di ulteriori caratteri e parametri di stabilità. La linea di elaborazione della forma urbana è così duplice.



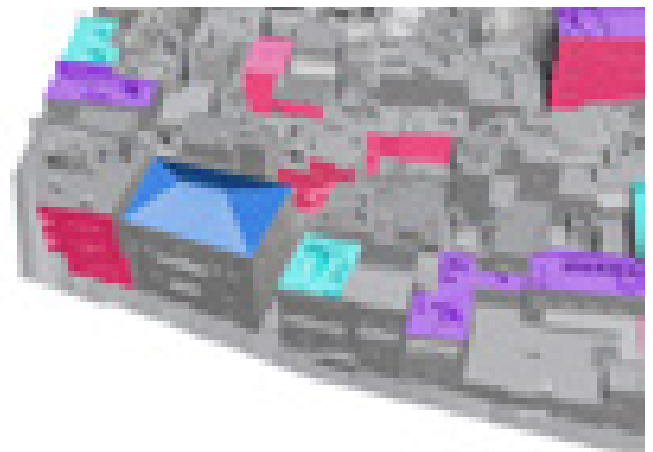
Modellazione alla scala edilizia.

Condotta a partire dal database digitale integrato, tra documentazione terrestre ed aerea, per disporre di informazioni metriche complete sull'involucro architettonico di unità insediative e sistemi urbani. In tal caso, la discretizzazione della forma urbana, mantenuta comunque aderente alla struttura digitale, diviene criterio fondamentale di interpretazione della complessità formale della città per la semantizzazione dei suoi apparati e la conseguente trasposizione nel sistema informativo. La produzione di un abaco di elementi, tipologicamente suddivisi e diversificati per qualità e dimensioni caratteristiche, permette di instaurare un primo livello di collegamento tra dato conoscitivo (integrato nel sistema informativo in celle di valori) e modulo formale di identificazione (visualmente percepito nel sistema generale ed associato dalla piattaforma ad una precisa stringa di valore).

*Modellazione alla scala muraria.*

Condotta sulla qualità di risoluzione ed affidabilità del database, certificato alla scala millimetrica, per l'espressione accurata dei gradi di deformazione dei paramenti storici. La ricostruzione della forma muraria nella sua irregolarità costitutiva diviene requisito essenziale di rappresentazione per prevedere una computazione dei meccanismi di instabilità, aprendo inoltre la possibilità di opportuni approfondimenti mirati in corrispondenza dei locali interni delle unità. La complessità di tale processo è inevitabilmente relazionata alla sovrapposizione di livelli urbani sulla superficie della struttura, dove l'involuppo di descrizione dei comparti è saturato dalle informazioni formali multiple e da esse oscurato.

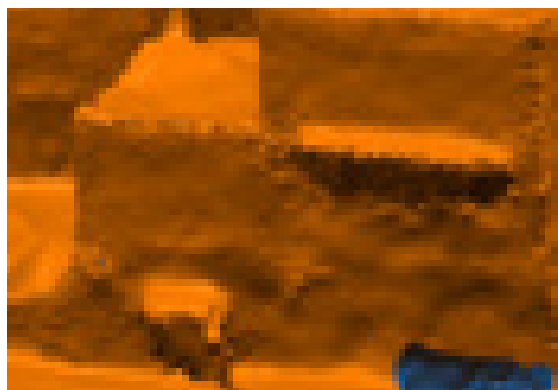
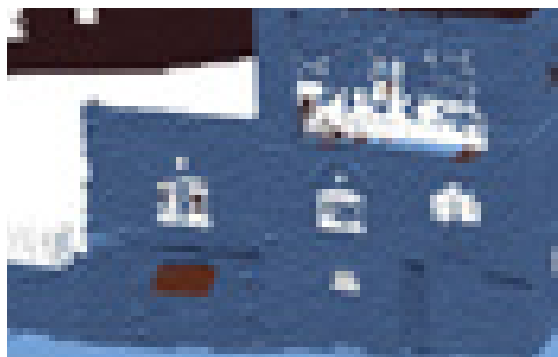
Si instaura un'azione cognitiva volta in prima fase a suddividere gli apparati presenti sul sistema resistente ed a filtrarli per rendere più facilmente gestibili gli aggregati strutturali. Successivamente, le porzioni di elaborazione delle mesh saranno riferite al modello 3D globale e ne aumenteranno il grado di mimesi, fino ad evidenziare i caratteri di conformazione delle soluzioni strutturali rispetto all'intero edificato, consultabili separatamente o coordinate globalmente al più unitario sistema informativo. L'elaborazione di un modello 3D unico del centro storico, scomposto in gerarchie di unità architettoniche e sistemi strutturali, sarà sia un prodotto di indagine e sintesi di forme urbane categorizzate sia un'interfaccia logica per i modelli mesh delle strutture storiche riferite al macrosistema della città.



(7.197) Abaco di classificazione dei principali elementi di influenza strutturale, definiti come valori di campi descrittivi che permettono l'interrogazione tematica del modello, impostato in ambiente GIS e suddiviso per superfici principali (7.198)



Modellazione mesh applicata sul database urbano acquisito da TLS (7.199) e da UAV (7.200). E' evidenziato il tentativo da parte dei due sistemi di procedere ad una ricostruzione della struttura urbana, limitata però all'involuppo dei fronti esterni (per il TLS) o alla macro-volumetria di impianto (UAV). Le letture di dettaglio sulle proprietà costruttive e di tessitura dei manufatti murari sono ancora possibili (7.201-7.203) ma limitate. La manipolazione formale è massima in corrispondenza degli elementi più regolari di aperture, griglie e tettoie, che richiedono uno studio separato di modulazione all'interno di abachi tipologici per permetterne sia un riconoscimento che un completamento nel modello in opera.



NOTE

1 Per una più approfondita ricerca storica, si rimanda a cfr. Acidini C., Colonna Rimbotti M. V., Godoli A., Grifoni P., Natali A., Romualdi A. (2007) "La scala e il ricetto lorenese." *Gli Uffizi. Studi e Ricerche / I pieghevoli*, n. 34, Firenze: Centro Di, 2007.

2 La classificazione alfa-numerica degli ambienti del complesso è ripresa dalla denominazione ufficiale apportata dalla Società Consortile dei Grandi Uffizi, incaricata della gestione degli ambienti e del cantiere della Fabbrica.

3 Nel 1561 Cosimo I, iniziati i lavori per gli Uffizi, fece abbattere buona parte del complesso, tra cui la canonica, il campanile e la loggia. Dal confronto tra le planimetrie dell'archivio degli Uffizi, è possibile riconoscere la possibile condivisione di alcuni resti murari tra il corpo dello Scalone Lorenese ed il precedente complesso di San Pier Scheraggio in corrispondenza del lato nord.

4 Per una più dettagliata descrizione dei presupposti al progetto di ricerca, della metodologia adottata e dei risultati elaborati durante le campagne 2013-2016 di documentazione presso lo Scalone Lorenese del complesso degli Uffizi, si rimanda a cfr. Parrinello S., Porzilli S. (2016) "Rilievo laser scanner 3D per l'analisi morfologica e il monitoraggio strutturale di alcuni ambienti inseriti nel progetto di ampliamento del complesso museale degli Uffizi a Firenze." In Parrinello S., Besana D. (2016) *ReUSO 2016. Contributi per la documentazione, conservazione e recupero del patrimonio architettonico e per la tutela paesaggistica*. Firenze: Edifir, pp. 188-196.; Parrinello S., Porzilli S. (2018) "3D Survey Systems and Digital Simulations for Structural Monitoring of Rooms at the Uffizi Museum in Florence". In Ottaviano E., Pelliccio A., Gattulli V. (2018). *Mechatronics for Cultural Heritage and Civil Engineering*. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, 92. Cham: Springer, pp. 203-233.

5 Per la valutazione tipologica delle sollecitazioni meccaniche relative ai sistemi voltati in canniciato, si fa riferimento alla ricerca ed esperienza pluriennale in loro diagnostica e restauro dei proff. E. Quagliarini, M. D'Orazio e S. Lenci del Dipartimento di Architettura, Costruzioni e Strutture dell'Università Politecnica delle Marche, e della fattiva collaborazione scientifica con la Restauri Innovativi Tecnologici S.r.l. In particolare, cfr. Quagliarini E., D'Orazio M. (2005). "Recupero e conservazione di volte in *"camorcanna"*. Dalla "regola d'arte" alle tecniche di intervento". Firenze: Editrice Alinea; D'Orazio M., Quagliarini E. (2002). "Il recupero delle strutture lignee rivestite con stuoaiati: interventi di consolidamento, valutazione del comportamento meccanico". *Recupero e Conservazione*. vol. 44, pp.62-66., DeLettera Editore.

6 L'inclusione dei due locali contigui all'ambiente di estradosso nelle operazioni di rilievo ha permesso di escludere eventuali variabili di cedimento o ribaltamento della muratura longitudinale di appoggio. Tale ipotesi era di valutazione più remota ma comunque possibile per la spiegazione del fenomeno globale, in particolare considerando come tali murature poggiino sugli allineamenti portanti

interessati dalle opere di sventramento e ricostruzione del precedente complesso della Chiesa di San Pier Scheraggio, parzialmente demolito ed inglobato nel complesso degli Uffizi.

7 Lo stato dell'arte nella modellazione di strutture composte di profili lignei, come quelli a capriate, si è da tempo orientato su processi di estrazione di sezioni rappresentative (almeno due di estremità per elemento) da nuvole di punti, successivamente collegate per estrusione geometrica. Il tentativo è stato quello di aggirare il problema di gestione di grandi moli di dati delle *point cloud*, pur cercando di garantire una migliore aderenza del modello al caso studio specifico rispetto ad una tipologia ideale indeformata. Recentemente, il controllo delle superfici di estrusione viene affidato ad algoritmi di generazione parametrica collegati alle piattaforme di modellazione, permettendo così di iterare la forma voluta con un numero crescente di sezioni intermedie. Vanno comunque considerati i tempi di gestione della nuvola, il *clipping* delle sezioni scelte in *limit box*, l'esportazione delle stesse, l'importazione in ambiente geometrico, l'elaborazione dei *box* di parametri e delle connessioni algoritmiche ed il calcolo degli *sweep* proporzionale ai profili considerati. I processi di comparazione della deviazione tra i modelli ottenuti, per l'interpretazione dei cinematicismi, risultano invece paralleli tra questo metodo e quello con modelli reality-based direttamente triangolati. Per un esaustivo caso di applicazione, cfr. Prati D., Rrapaj I., Mochi G. (2018). "Contribution of parametric modeling in the interpretation of deformations and displacements of wooden trusses." *SCIRES*, 8(1), 2018, pp. 105-120.

8 A seguito delle campagne di monitoraggio e delle relative considerazioni operate attraverso la ricerca del laboratorio DAda Lab dell'Università di Pavia, dal 19 novembre 2019 è stato avviato il progetto architettonico per il consolidamento e il restauro dell'ossatura lignea che sostiene la volta dello Scalone Lorenese. I lavori sono coordinati dalle Gallerie degli Uffizi insieme alla Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la Città Metropolitana di Firenze e le Province di Pistoia e Prato.

9 La sequenza ha avuto inizio il 24 agosto 2016, con un terremoto di magnitudo momento M_w 6.0 con epicentro localizzato nel comune di Accumoli, ed è stata seguita da altri tre venti principali: il 26 ottobre in prossimità di Castelsantangelo sul Nera (M_w 5.9), il 30 ottobre vicino a Norcia (M_w 6.5) e l'ultimo il 18 gennaio 2017 in prossimità di Capitignano (M_w 5.5). L'area era già stata interessata da una precedente storia sismica, particolarmente densa di eventi di elevata intensità, ed i monitoraggi macrosismici accertati sul territorio hanno mostrato come i danni strutturali siano divenuti più gravi al procedere della sequenza. Per una trattazione più estesa sugli effetti del sisma 2016 sul patrimonio storico architettonico delle chiese del Centro Italia, cfr. Penna A., Calderini C., Sorrentino L., Carocci C. F., Cescatti E., Sisti R., Borri A., Modena C., Protta A. (2019). "Damage to churches in the 2016 central Italy earthquakes". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 2019, pp. 5763-5790.

10 Ivi, p. 5764.

11 Sul portale della chiesa e sulle merlature della torre di

guardia sono ancora riconoscibili gli stemmi a gigli della casata d'Angiò, governante dell'esteso Regno di Napoli dal 1246 al 1442.

12 Informazioni storiche sull'originaria conformazione costruttiva della Chiesa di S. Giovanni Battista sono documentate da Niccola Palma (1777-1840), originario di Campi e considerato il maggior storico della Provincia di Teramo grazie alla sua preziosa opera "*Storia ecclesiastica e civile della Regione più Settentrionale del Regno di Napoli*" 1832-1836.

13 Si rimanda al D.L. 17 ottobre 2016 n. 189, nel quale confluisce il D.L. 205/2016.

14 Una consistente frana di grossa porzione del territorio di Castelnuovo ha avuto luogo nel febbraio 2017. Nel settembre 2018 ulteriori allarmi sono sorti a seguito della segnalazione di un'evidente macchia di umidità nel costone sottostante la Chiesa di S. Giovanni Battista. Fonte web dall'archivio *Notizie Teramo*. <https://www.emmelle.it/Prima-pagina/Cronaca/Castelnuovo-di-Campi-torna-a-preoccuparsi-Controllate-quella-infiltrazione-sotto-alla-chiesa/11-46281-1.html>

15 Le informazioni sui danni sono state schedate dalle squadre della Fondazione EUCENTRE successivamente al fenomeno sismico, e sono disponibili presso il database condiviso: <http://learningfromearthquakes.org/2016-08-24-central-italy/11-resources/69-field-team-survey-of-the-san-giovanni-battista-church-in-castelnuovo-te>

16 La presenza di queste catene, inusualmente estese ed applicate sulle murature trasversali, può essere ricondotta all'originario impianto della chiesa ed alla sua suddivisione in campate, influenzante il precedente sistema di scarico delle tensioni che, riconvertito su direzione ortogonale di sviluppo, ha richiesto l'inserimento di tiranti per quelle che erano le originarie superfici longitudinali.

17 La scheda, codificata "A-DC Scheda Chiese", presenta una struttura ufficialmente approvata dal Dipartimento della Protezione Civile e dal MiBACT, ed è suddivisa in 3 sezioni: identificazione/descrizione dell'edificio e catalogazione delle opere culturali al suo interno, valutazione del danno strutturale, raccolta di raccomandazione sull'uso dell'edificio e sulle misure di sicurezza ed emergenza da implementare. Delle 27 sezioni di cui risulta composta, solo una (A₂₃) prevede l'inserimento di dati grafici con piante, sezioni, prospetti e l'illustrazione di dissesti particolari (eventualmente allegati), mentre un abaco grafico di 28 possibili macro-mechanismi di collasso per 13 elementi architettonici è incluso a fondo scheda. Le valutazioni date, in un punteggio da 0 a 5 per ciascun meccanismo, risultano completamente convenzionali e non calibrate sullo specifico contesto, dove la rappresentazione geometrica può fornire dati di supporto a considerazioni sulla distribuzione delle tensioni della struttura. Tale sistema di compilazione rientra così nel paradosso di decentrare il dato grafico osservato dall'obiettivo di documentazione, richiamandolo però come supporto alle istruzioni di compilazione proprio in funzione della sua unica immediatezza descrittiva.

18 Cfr. Penna A. et al., *op. cit.*, p. 5767.

19 La squadra di ricerca del dipartimento di Supporto all'Emergenza della Fondazione EUCENTRE è stata coordinata dalla dott. Ing. Chiara Casarotti e formata dall'ing. Martina Mandirola, dott. ing. Ilaria Senaldi e dott. ing. Emanuele Brunesi.

20 Precedenti sperimentazioni del supporto di strumenti LiDAR mobile per il rilevamento paesaggistico ed architettonico sono in corso dal 2014, attraverso la collaborazione con SINECO S.p.a. e la sperimentazione del sistema a veicolo XXXX all'interno della documentazione del complesso del Santuario de La Verna (AR).

21 Per una trattazione più dettagliata sulla comunicazione virtuale per la gestione ed interrogazione dei dati sulla Chiesa di S. Giovanni Battista a Campi, cfr. Dell'Amico A. (2019). "Fast survey: metodi di rappresentazione speditiva per il monitoraggio e la gestione delle chiese colpite dal sisma nella provincia di Teramo". In Belardi P. (2019). *Riflessioni. L'arte del disegno/Il disegno dell'arte*. Collana UID per il disegno. Roma: Gangemi Editore, pp. 1533-1542.

22 Le considerazioni condotte richiederebbero nuove e ripetute verifiche sulla potenzialità della gamma KAARTA Stencil in merito alla diagnostica strutturale, grazie ai progressivi aggiornamenti che la casa proprietaria sta sperimentando sullo strumento. Rispetto al rilievo condotto nel 2018, ad oggi i prodotti generati da Laser Mobile hanno acquisito (a seguito di due aggiornamenti consistenti del software di registrazione e referenziazione dei dataset) una maggiore definizione in termini di dettaglio morfologico e affidabilità della misura, oltre a più consapevoli pratiche di applicazione dello strumento dovute all'incremento della ricerca sul suo uso nel rilievo architettonico. Rimane pressoché invariato l'errore di registrazione su più dataset (dell'ordine di 4-5 cm), ma risulta migliorata la qualità di una singola traiettoria di ripresa. Ulteriori verifiche sulle prestazioni dello strumento sono in corso di ricerca presso il laboratorio DAda Lab dell'Università degli Studi di Pavia.

23 Il riconoscimento deriva dal report dell'incontro di esperti del World Heritage Committee WHC-94/CONF.003/INF.13, "Routes as a part of our Cultural Heritage" (Madrid, Spagna, Novembre 1994), successivamente implementato dall'ICOMOS nella "Charter on Cultural Routes", 2008. È centrale il riconoscimento del patrimonio delle rotte come "*sum of elements referring to a whole [...] within a joint system which enhances their significance*" portando a una "*dynamic conformation of cultural landscape*". La recente inclusione di gran parte di queste rotte (a titolo di esempio, l'Hansa 1991, El Legado andalusì 1997, il patrimonio industriale della Valle del Reno 2002, la Rotta dei Pirenei 2003, i Siti cluniacensi 2005, la Transromanica 2007, le Abbazie cistercensi 2010, le Città termali storiche 2010, le Fortezze di Carlo V 2015, le città fortificate della Grande Région 2016) i loro programmi di documentazione circa le condizioni storiche e fisiche, il valore architettonico ed i programmi operativi di intervento per la gestione territoriale risultano ancora scarsi. I progetti esistenti si concentrano principalmente su un approccio turistico, educativo e formativo (progetti HECTOR e CERTESS, dell'Istituto europeo di percorsi culturali), mancando di un protocollo dedicato per la gestione architettonica e territoriale unificata dei siti.

24 Le ricerche di A.S. Teryohin, G. D. Kantorovich, I. V. Makovetskiy e V. A. Tsypushtanov hanno fornito un fondamentale contributo alla conoscenza del patrimonio dell'Upper Kama nella loro opera del 1970. Nel 1988 la monografia di Kostochkin ha integrato le precedenti ricerche, oltre all'archivio del Perm Scientific Restoration Atelier che dal 1986 fornisce dati affidabili sui monumenti esistenti per lo sviluppo di progetti di conservazione e restauro. Lo studio più recente sull'architettura dell'Upper Kama è condotto da W. Brumfield nella forma di report fotografico del 2012.

25 La documentazione del patrimonio costruito dell'Upper Kama è parte di un programma di attività sviluppato dal 2013 dal Professor Sandro Parrinello dell'Università degli Studi di Pavia e dalla prof. Svetlana V. Maximova della Perm National Research Polytechnic University. Tre summer schools sono state organizzate nel 2015, 2016 e 2018 coinvolgendo professori, ricercatori e studenti di università internazionali, e supportate dal contributo del Russian Academy of Painting, Sculpture and Architecture, Stroganov Chambers Historic Architectural Museum di Usolye e dall'amministrazione di Usolye.

26 A seguito dell'ascesa sovietica, numerosi complessi furono abbandonati o videro una riconversione dei loro spazi per altre funzioni, prevalentemente di produzione energetica (come la Church of the Annunciation of the Blessed Virgin di Pokcha convertita in centrale elettrica nel 1940, il caso della Church of the Exaltation of the Holy Cross a Solikamsk, abbandonata nel 1929 e successivamente trasformata in un birrifico, e la Church of the Epiphany a Cherdyn, oggi sede di un panificio). L'evento centrale è rappresentato dalla costruzione della stazione elettrica sulla Kama nel 1954, con l'esondazione del fiume e la variazione del rapporto idrogeologico territoriale tra i livelli di falda ed i siti di fondazione dei complessi, causa di evidenti dissesti e condizioni di instabilità che ne contraddistinguono oggi la condizione di patrimonio in emergenza.

27 Le informazioni sullo sviluppo dell'insediamento di Pokcha hanno inizio solo dal 1472 in corrispondenza della prima documentazione architettonica del Cremlino ligneo, identità del governatorato territoriale locale. La decentralizzazione politica seguita al grande incendio del 1535, con il trasferimento della sede rappresentativa locale nella città di Cherdyn, portano l'insediamento a concentrare il suo sviluppo in ambito commerciale. Nel XVII secolo Pokcha diventa un importante centro di costruzione di chiatte dell'Upper Kama fino all'inizio del XX secolo, con la compagnia di navigazione privata del commerciante S. V. Chernykh, e ottenendo il ruolo amministrativo indipendente quale insediamento rurale Pokchinsky del distretto di Cherdyn.

28 La chiesa di pietra nel nome della Beata Vergine Maria fu eretta al posto di due chiese in legno fatiscanti del XVI secolo, Blagoveshchenskaya Church e Georgievskaya, nel 1579. Alla fine del XVIII secolo, la diffusione dell'uso del laterizio ed il rinnovato ruolo amministrativo di Pokcha portano alla comparsa di numerose case in mattoni ed al rifacimento del principale sito religioso, la Chiesa dell'Annunciazione della Beata Vergine, con una nuova fabbrica in pietra e mattoni costruita nel 1785 e consacrata nel 1794. Cfr. Shumilov E.N. *Orthodox Churches and Temples of Common Faith in Perm Krai: short historical guide*. Perm, 2003.

29 Le funzioni religiose locali sono svolte all'interno della Kazan Chapel, costruita nel 1913 ed ora tornata all'originaria funzione dopo la conversione in magazzino del grano nel 1951.

30 Il "dominio dello spazio" nella città mediorientale è principio di ricerca gestionale per garantire una continuità tra le tradizioni passate e le nuove esigenze architettoniche, sociali, urbanistiche. Gli effetti negativi della odierna crisi progettuale sono ovviamente più evidenti e gravi in quelle città storiche dove il tessuto urbano si è mantenuto quasi indisturbato, regolamentato nelle modifiche invasive sull'esistente quanto indisciplinato nella massima concentrazione di sub-unità e strutture effimere. Dove il rapporto spaziale ed esteriore tra edifici di epoca differente è più omogeneo, tanto maggiore è la percezione di "soffocamento" della città da parte di innesti volumetrici, impianti e superfetazioni edilizie. Cfr. Galdieri E. (2005) "Progetto, tradizione e linee di sviluppo nell'architettura islamica." In De Filippi F. (a cura di) (2005) *L'ambiente costruito nella cultura islamica*. Torino: Politecnico di Torino.

31 Per una trattazione più estesa sul tema dell'architettura insediativa tradizionale palestinese, cfr. Dabdoub Nasser, C., Hifz al-Turāth al-Thaqāfi, M. (2005) "Anatreh Quarter: An Urban and Architectural Study of a Bethlehem Quarter." Bethlehem: Centre for Cultural Heritage Preservation; Fuchs R. (1998). *The Palestinian Arab House and the Islamic "Primitive Hut"*. Leida: Brill Editore.

32 Lo sviluppo di un'indagine strutturale approfondita sul contesto di Betlemme è supportato dalla varietà strutturale riscontrata nell'analisi della forma urbana della città mediorientale. La sistemazione degli agglomerati urbani attorno all'ambiente collinare, appartenente all'ultima linea di faglia montagnosa e sismica prima della depressione della valle desertica del Mar Morto, ha predisposto la configurazione di unità insediative complesse, con la compresenza di sistemi architettonici ed interventi costruttivi di diversa epoca. Il risultato definisce una gerarchia di paramenti murari, unità innestate, diaframmi tra aggregati e cortine murarie a generare una forma strutturale di complessità unica sia nella sua rappresentazione che nelle possibilità di analisi. Altre criticità, legate all'elevazione dell'edificio, sono particolarmente influenti in relazione alle pratiche diffuse di sopraelevazione di livello delle unità edilizie, sia storiche che contemporanee, senza verifica di corrispondenza con l'impianto strutturale sottostante. Cfr. Minutoli G., *op. cit.*, pp. 42-43.

33 Per una più specifica analisi condotta sulla lettura delle aree storiche di Betlemme, delle qualità di densità del costruito e dei caratteri architettonici e strutturali funzionali alla documentazione, cfr. Picchio F., De Marco R. (2019). "Landscape Analysis and Urban Description of Bethlehem Historical Center: A Methodological Approach for Digital Documentation". *HERITAGE*, vol. 2(1), p. 507-518.

34 La traduzione spaziale del *cluster* richiama una modulazione degli spazi in sequenze articolate differenti per scala di raggruppamento e qualità individuale. L'aggregazione individua solitamente una struttura aperta con spazi principali gerarchizzati con relazioni ad ulteriori spazi a scala più piccola e più grande, in un modello a crescita indefinita, come lo stesso sistema "città" alla macro-scala.



CONCLUSIONI

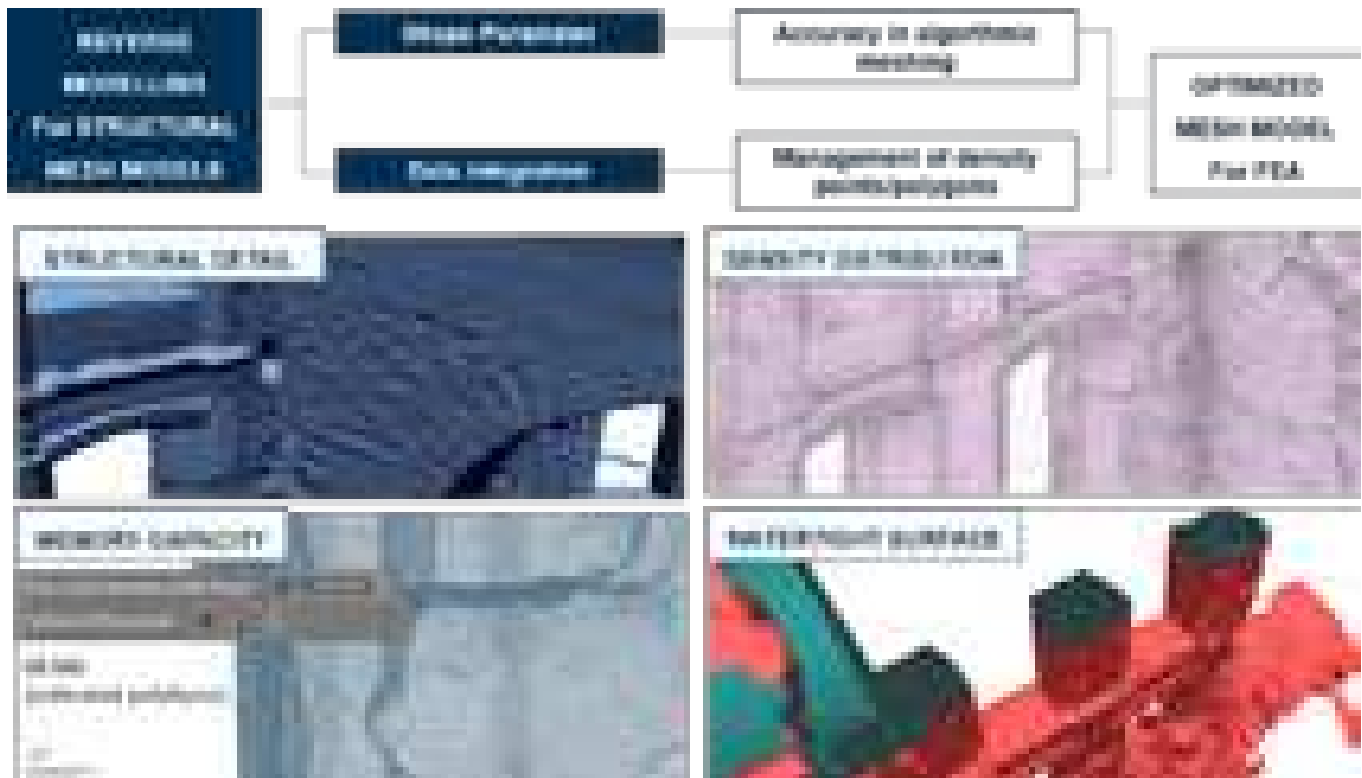
Da un lato l'ingegneria strutturale sta elaborando algoritmi e stringhe di calcolo empiricamente sempre più affidabili e corrispondenti alle sperimentazioni reali, dall'altro si stanno abbandonando gli stessi propositi di corrispondenza dei supporti formali a tali analisi. L'astrazione di forma che i modelli strutturali stanno subendo, spesso perdendo la riconoscibilità del sistema reale verso una rigorosa ma irrealistica schematizzazione in aste e blocchi regolari, non trova fondamento negli sviluppi conseguiti dalla ricerca nel campo del rilievo, sempre più affinata per garantire, in modo non invasivo, gradi di risoluzione e precisione elevati della forma rappresentabile in tempi e processi utili all'azione.

Da tali propositi, l'obiettivo è stato quello di porre a sintesi un percorso di maturazione ravvisabile nei prodotti grafici del disegno per le strutture, dalle avvisaglie tedesche del 1200 ad una più definita trattazione scientifica e manualistica proposta nell'Illuminismo francese del XVIII secolo. L'applicazione di un filtro di analisi e riflessione visuale, orientato non solo sull'aspetto dimensionale degli apparati ma anche sulle loro caratteristiche di forma, ha evidenziato le potenzialità di caratterizzazione grafica dei disegni sull'espressione meccanica dei comportamenti tecnici e deformativi, se opportunamente direzionati nella manipolazione dei loro caratteri di tratto e contorno. In tal senso, il discorso sulle modalità di espressione e modellazione della forma ha collegato il rapporto tra strutture "reali" e "virtuali" fino alla pratica del disegno assistito 3D, focalizzando come la grammatica dei linguaggi digitali stia ora non solo riscrivendo ma anche specificando le entità ed i moduli di trasposizione per superfici e forme concrete. Nella traduzione al formato *bit*, disegno ed algoritmo tendono ad uniformare il proprio codice genetico in "codici digitali", ed in tale spazio di interazione si aprono opportune dimensioni dove questi sistemi possono dialogare su metadati integrati di prodotti compatibili.

Il *pattern*, intuitivamente visualizzabile come forma e regolarmente gestibile come formulazione algoritmica, si presta come uno dei possibili linguaggi comuni tra i due canali, ed in tal modo richiama il ruolo dei modelli *mesh* nella loro proprietà descrittiva della struttura: come insiemi computazionali di poligoni algoritmici ma logicamente orientati a conseguire un significato formale, ovvero un disegno. A tali insiemi si è cercato di declinare approcci e soluzioni possibili in rapporto alle metodologie di rilevamento digitale disponibili nell'aggiornamento della ricerca alla disciplina, sia per migliorare quel target di forma al centro del dibattito, sia risolvere le difficoltà di *processing* e gestione dei database che ad oggi continuano a scoraggiare i processi di triangolazione su superfici discrete spazialmente complesse.

Lo studio non si è proposto di individuare nel modello *mesh reality-based* una soluzione preferenziale al tema del rilievo delle strutture storiche, ma ha cercato di ricostruire una più consapevole conoscenza delle scelte di rappresentazione che ne sono alla base. Si è cercato così di formulare una strategia di produzione grafica centrata sulle esigenze di descrizione strutturale, soffermandosi sulle qualità richieste per la comunicazione di informazioni utili e sulla corrispondenza della modellazione poligonale a risolvere tali necessità. In particolare, ne è emerso come:

- L'imperfezione formale necessaria per la mappatura e comprensione dei meccanismi di danno ed instabilità sulle fabbriche storiche sia una delle prime variabili visuali a rischio di perdita attraverso la sintesi della rappresentazione, sia bidimensionale che 3D.
- Tale rinuncia sia solo in parte relativa alla scala di indagine del manufatto strutturale, ma abbia un impatto maggiormente legato ai corrispondenti schemi di impostazione statica rispetto alla complessità formale del reale, i quali costituiscono



Qualità e caratteristiche di entità conseguite per i modelli mesh reality-based declinati sulla documentazione degli apparati strutturali.

un riferimento fisso dalla scienza delle costruzioni verso il quale la pratica analitica è sbilanciata.

- L'affinamento dei database di rilevamento digitale, sviluppati a conseguire un dettaglio morfometrico sempre più affidabile, scoraggia in realtà l'adozione dei dati nella loro piena risoluzione e dimensione a causa della loro natura di difficile gestione, sempre più assimilata al campo dei Big Data.
- Le superfici mesh, una volta conseguite ed estratte dalle letture qualitative e quantitative di cui sono archivio, perdono la centralità del loro ruolo a scapito di sistemi parametrici ed informativi più strutturati e che permettono maggiori gradi di implementazione (oltre che estrazioni) di informazioni legate alla diagnostica ed all'intervento strutturale.

Parallelamente, emerge una riflessione compresente a quella metodologica che riguarda la scala di sviluppo degli apparati strutturali all'interno del patrimonio costruito. La ricerca si è volontariamente concentrata, a seguito di uno studio pilota, su un repertorio di casistiche che, offerte all'interno dell'opportunità del triennio, meglio rappresentassero diversi livelli dimensionali dell'oggetto di analisi. In tali casi la dimensione è stata indice sia un impegno maggiore in termini sia di estensione dei dati superficiali di elaborazione, che riguardo le specifiche caratteristiche formali rintracciabili nella struttura per descriverne l'influenza meccanica.

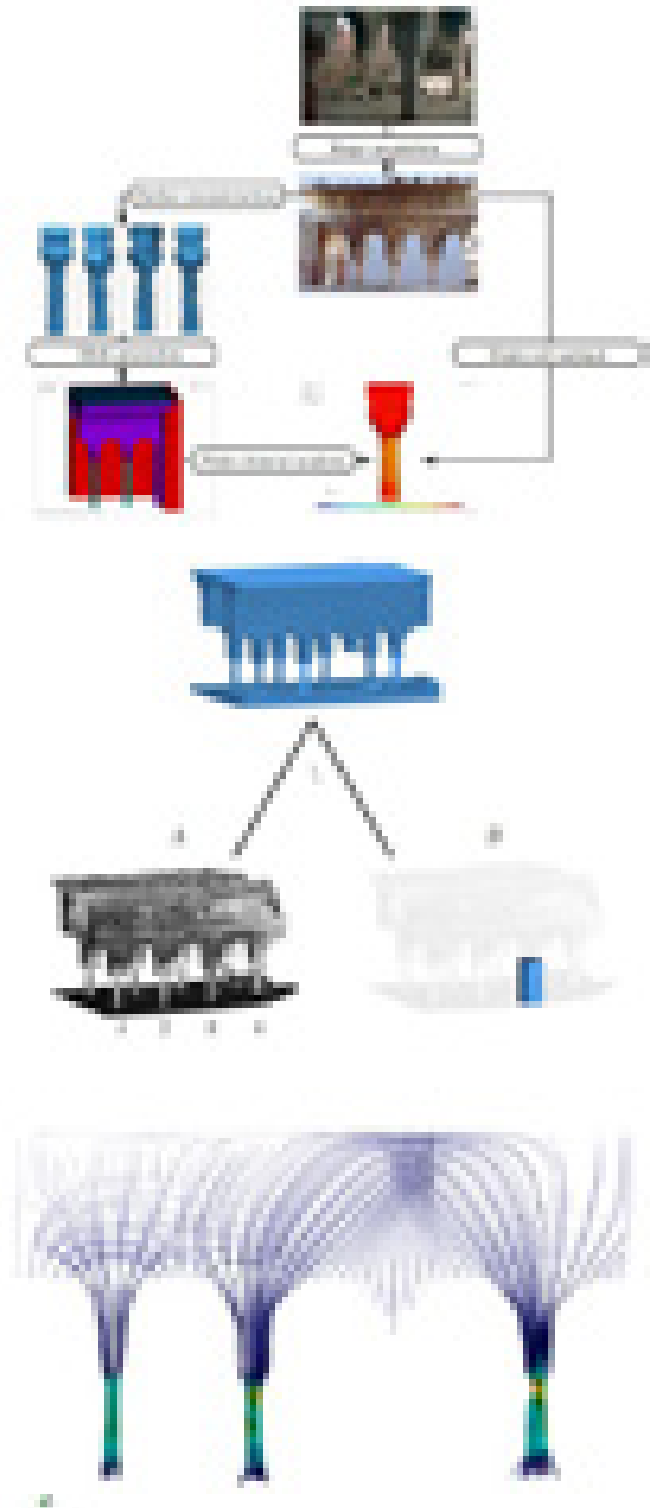
I quattro casi affrontati, dal componente costruttivo all'aggregato urbano, non hanno potuto raggiungere un medesimo grado di sviluppo e conseguimento di risultati, ma sono stati volontariamente declinati, dopo una coerente ottimizzazione per la certificazione dei risultati, su percorsi di *processing* diversi. In tal modo essi hanno

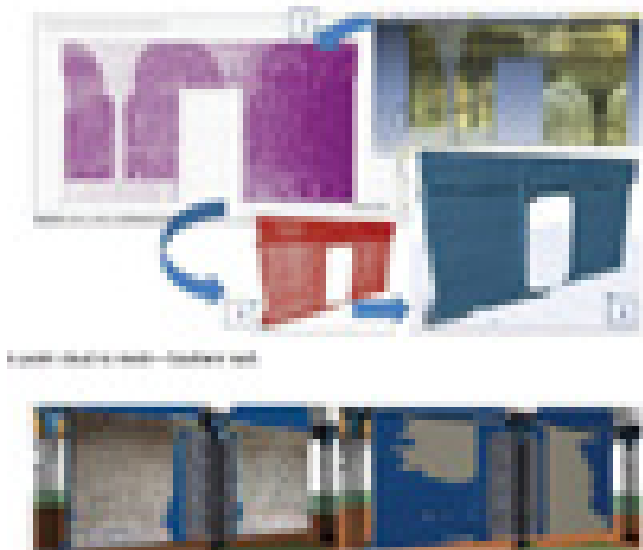
offerto la sperimentazione di un'ampia copertura di *tools* e configurazioni utilizzabili nell'ambito del *reverse modelling*, per evidenziare caratteristiche e qualità delle entità tridimensionali coerenti con le proprietà strutturali ricercate. Le proprietà specifiche della superficie continua, come curvatura e deviazione, sono state declinate in differenti aspetti, tra banche dati monitorate nel tempo o configurazioni ideali dell'insieme, per mettere in luce qualità dell'involuppo logicamente riconducibili a cause di instabilità, del componente costruttivo (Scalone Lorenese degli Uffici), dell'unità resistente (Chiesa di San Giovanni Battista a Campi) e del complesso architettonico (Chiesa dell'Annunciazione di Pokcha).

Il caso studio sull'aggregato urbano del tessuto denso di Betlemme lascia volontariamente aperta la parentesi di ricerca, raggiungendo un livello di complessità dove la scala architettonica si trova a confrontarsi con più specifici caratteri urbani che avanzano livelli di lettura differenti sulle modalità di aggregazione della struttura. La ricerca di quelle specifiche qualità formali di imperfezione si arricchisce di informazioni legate al rapporto tra singole unità e complessi, che sono però analizzate e acquisite come un unicum e non come target individuale dei casi precedenti.

In questo quadro di sviluppo della ricerca presentata, vanno così delineandosi due possibili direzioni di specializzazione dell'applicazione dei modelli *mesh*, tra modellazione computazione e modellazione informativa, le quali vedono entrambe un inevitabile scontro con le esigenze di semplificazione della forma.

- La traduzione di tali superfici all'interno di piattaforme FEA, per quanto interfacciabile nell'automazione di trasformazione dei modelli *watertight* da poligoni superficiali a tetraedri solidi, avvia una riflessione sul carattere meccanico di ogni modulo del *pattern*. Il numero





Sopra: Juan Enrique Nieto-Julián, Daniel Antón & Juan José Moyano (2019): *Implementation and Management of Structural Deformations into Historic Building Information Models*, *International Journal of Architectural Heritage*.

Sotto: Raissa Garozzo, Massimiliano Lo Turco, Cettina Santagati (2019) *Modelli informativi e gestione della complessità per un progetto integrato di conoscenza*, *disegno 4/2019*.



di nodi e gradi di vincolo, assegnabile per ciascun vertice, orienta la ricerca sull'interesse a sperimentazioni di avanguardia per l'analisi numerica da *boundary approaches* e *finite cell domains*. Tali ricerche, in grado di controllare con sempre maggior dinamismo la traduzione di codici da supporti formali, stanno avvantaggiando la diffusione di database range e image-based come supporto all'analisi statica nelle strutture architettoniche, orientandosi ora anche verso le entità di modellazione.

- Le esigenze di gestione informativa delle fabbriche costruttive e strutturali sono sempre più avanzate all'interno di corrette pratiche di programmazione per interventi e restauri. Il modello informativo BIM, oltre a popolare piattaforme collaborative dove più operatori possono operare in simultanea come un team virtuale, offre possibilità di interfaccia che esplicitano informazioni tecniche specifiche e quantificabili, come aree, volumetrie e parametri. In tal senso, la loro potenzialità descrittiva è da considerarsi tanto valida quanto lo è l'affidabilità che tali modelli conservano rispetto al contesto reale, garantendo un corretto dimensionamento di componenti e quadri di danno che inevitabilmente si trovano a deformare gli involucri progettuali. In tal senso, le caratteristiche reality-based del continuo mesh sono chiamate a trovare opportunità di confronto con i moduli parametrici, qualificando possibili nuovi LoD nei quali l'imperfezione formale possa essere parametrizzata.

L'opportunità di aver testato l'ottimizzazione delle strategie di *reverse modelling* applicate ai modelli *mesh reality-base* permette ora alla ricerca di muoversi consapevolmente fuori dal loro specifico ambiente di formazione verso ulteriori dimensioni di applicazione ed implementazione. La qualità formale di cui si rendono portavoce, consapevolmente ricostruita e motivata dallo stato dell'arte della sua definizione, ha ora definito un'identità adeguata da poter instaurare un confronto paritario con altri strumenti e metodologie di rappresentazione, rimanendo solidamente qualificata al rapporto signico-mimetico con l'opera reale ma pronta a declinarsi ad ulteriori dimensioni informative ed immersive del disegno.

La ricerca, in tal senso, rappresenta solo un primo passo per gli studi di questa strategia di modellazione, da inserirsi in un più ampio panorama scientifico in cui sia le sue basi che i suoi sviluppi sono tutt'altro che esauriti. I progressi conseguiti esponenzialmente nell'ambito del rilievo procedono in parallelo a nuove forme di interazione e informazioni offerte dalle piattaforme di fruizione e visualizzazione dei dati 2D e 3D, e al contempo sempre più categorie di utenti ed operatori sono proiettati a sfruttarne le potenzialità. Dall'intervento localizzato, al recupero di complessi o monumenti in rovina, il supporto della modellazione strutturale può sempre più declinarsi alla dimensione di un monitoraggio esteso, regolamentando il complesso rapporto tra architettura e territorio attraverso un consapevole lavoro sinergico dei suoi operatori.

BIBLIOGRAFIA CITATA

- Acocella A. (1954). "L'architettura di pietra: antichi e nuovi magisteri costruttivi". Firenze: Alinea, ed. 2004
- Amoruso G., Brevi F., Ceconello M., Pierluisi G., Rossi M., Russo M. (2013) "Verso l'era post-digitale. Disegnare il progetto, tra design e architettura", Giornata di studi 23 novembre 2012, Milano: Maggioli Editore.
- Anceschi G. (1992) "L'oggetto della raffigurazione". Milano: ETAS libri
- Arnheim R. (1969). "Il pensiero visivo". Torino: Einaudi
- Arnheim R. (2004) "Arte e percezione visiva". Milano: Feltrinelli Editore. Ed. orig. Arnheim R. (1954). "Art and Visual Perception: a Psychology of the creative eye". Regents of the University of California.
- Attene, Marco, Campen, Marcel, Kobbelt, Leif. 2013. "Polygon mesh repairing: An application perspective". *ACM Computing Surveys*. 45, 2, 1-6
- Augè M. (2004) "Rovine e macerie. Il senso del tempo". Torino: Bollati Boringhieri. Ed. orig. Augè M. (2003). "Le temps en ruines", Paris.
- Baerentzen J. A., Gravesen J., Anton F., Aanæs, H. (2012). "Guide to Computational Geometry Processing: Foundations, Algorithms, and Methods". New York: Springer-Verlag.
- Barbarito B. (1993) "Collaudo e risanamento delle strutture". Torino: UTET.
- Bastide R. (1974). "Usi e significati del termine struttura". Milano: Bompiani.
- Battro A., Denham P. J. (2010) "Verso un'intelligenza digitale". Milano: Ledizioni
- Baudrillard J., Nouvel J. (2003). "Architettura e nulla. Oggetti singolari". Milano: Electa. Ed. orig. "Les objets singuliers: architecture et philosophie". Paris: Calmann-Levy, 2000
- Bernot L. (1955) "Contribution a l'etude internationale des Structures Sociale". *Bulletin International des Sciences Sociales*, VII, 4, pp. 643-651
- Bertin J. (1970). "Le graphique". In *Communications*, 15, 1970, monografico sul tema "L'analyse des images".
- Bertocci S. (2015). "Il contributo del rilievo urbano dei centri storici italiani per il recupero e la prevenzione della vulnerabilità sismica: alcuni casi studi in Abruzzo, Toscana ed Emilia". In Marotta Anna, Novello Giuseppa. *Disegno & Città. Cultura, Arte, Scienza, Informazione*. Roma: Gangemi Editore, 2015, pp. 397-405.
- Bini M., Bertocci S. (2017). "Il rilievo per il restauro dei tessuti storici in contesti colpiti da eventi sismici", Editoriale. *DisegnareCON*, vol. 10, (18), pp. 0.1-0.4
- Bravo L., Mingucci R. (2008) "Centri storici. Evoluzione normativa e modelli di rappresentazione". *DisegnareCON* 1 (2), 2008, pp. 1-17
- Bridgman P. W. (1965) "La logica della fisica moderna". Torino: Boringhieri.
- Brusaporci S. (2010) "Sistemi informativi integrati per la tutela, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio architettonico e urbano". Roma: Gangemi.
- Caliari P. F., "La forma nel tempo", in Cattiodoro S. (2012). "Il fondamento effimero dell'architettura". Roma: Aracne Editrice
- Calvano M. (2019) "Disegno digitale esplicito. Rappresentazioni responsive dell'architettura e della città." Roma: Aracne editrice.
- Candito C. (2012) "Quale fondamento? Quale immagine?" *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 5-12
- Canestrà M., De Marco R., Dell'Amico A. (2018). "Il rilievo digitale per la documentazione morfologica: diagnostica e recupero del complesso monumentale di Al-Jazzar ad Aciri, Israele." In: Reuso 2018: L'intreccio dei saperi per rispettare il passato interpretare il presente salvaguardare il futuro. Roma: Gangemi Editore, pp. 195-206.
- Cardone V. (2008). "Modelli grafici dell'architettura e del territorio". Salerno: CUES.
- Caroti G., Franconi A., Piemonte A. (2012) "Metodologia di elaborazione di dati laser scanner la generazione di modelli utili al calcolo strutturale". *Proceedings 16° Conferenza Nazionale ASITA*. Vicenza, p. 383-390
- Carpò M. (1998) "Il disegno dell'architettura all'epoca della sua

riproducibilità meccanica”, in Carpo M. (1998), “L’architettura dell’età della stampa. Oralità, scrittura, libro stampato e riproduzione meccanica dell’immagine nella storia delle teorie architettoniche”, Milano: Jaca Book

Castellazzi G., D’Altri A. M., de Miranda S., Ubertini F. (2017) “An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings”. *Engineering Structures* Volume 132, 1 February 2017, Pages 229-248

Centofanti M. (2008) “Dalla matrice geometrica vitruviana alla regola. Aspetti del disegno di architettura nel Cinquecento”. Roma: Aracne.

Centofanti M., Brusaporci S. (2012). “Architectural 3D modeling in historical buildings knowledge and restoration processes”. In: Gambardella, Carmine. 2012. *Le vie dei mercanti*, X Forum Internazionale di Studi, More or Less. Fabbrica della Conoscenza, vol. 16, pp. 331-340. Napoli: La scuola di Pitagora editrice, 2012.

Chiabrando F., Donadio E., Sammartano G., Spanò A. (2015). *La tecnologia laser scanning per la valutazione statica delle strutture storiche*. Proceedings 19° Conferenza Nazionale ASITA. Lecco, pp. 253-261.

Chirone E. (2007) “Oggetti e forme all’origine della standardizzazione”, in Terenzi B. (a cura di) (2008) “Dal protodesign al design. La qualità dell’oggetto tra passato e presente guardando al futuro”. Bergamo: Sestante Edizioni

Cruciani-Fabozzi G. (1989). “Il rilievo per la conservazione: dalla raffigurazione dell’architettura alle “carte tematiche” della fabbrica”. In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 135-141

Coisson E., Ottoni F. (2012). “Il monitoraggio storico, ovvero la lezione della storia agli strutturalisti.” In Di Stefano R. (a cura di) (2012) *Filosofia della conservazione e prassi del restauro*. Arte Tipografica Editrice, pp. 364-368.

Croci G. (2001) “Conservazione e restauro strutturale dei beni architettonici”. Torino: UTET.

D’Altri A. M., Milani G., de Miranda S., Castellazzi G., Sarhosis V. (2018) “Stability Analysis of Leaning Historic Masonry Structures”. *Automation in Construction* Volume 92, August 2018, pp. 199-213

D’Angelo P. (2011), “Estetica”. Roma: Laterza.

Da Porto F., Munari M., Prota A., Modena C. (2013) “Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L’Aquila (Central Italy)”, In: *Construction and Building Materials*, 38, 1221–1237

DeLuca, Livio, Veron, Philippe, Florenzano, Michele. 2006. “Reverse-engineering of architectural buildings based on an hybrid modeling approach”. *Computers& Graphics*, Volume 30, Issue 2, pp. 160–176.

De Marco R. (2018). “Shapes and Models: the Survey for the study of Structures in Historical Buildings”. In: *Nexus 2018 Architecture and Mathematics - Conference Book*. p. 289-292, Kim Williams Books.

De Marco R. (2019). “Documentazione morfo-metrica per la struttura della forma urbana. Calibrazione ed ottimizzazione del rilievo Laser Scanner per lo sviluppo di una banca dati affidabile sul sistema urbano di Betlemme.” In: Parrinello S. (edited by). *3D BETHLEHEM. Management and control of urban growth for the development of heritage and improvement of life in the city of Bethlehem*. Volume 1. DISEGNO, RILIEVO E PROGETTAZIONE, Firenze:Edifir, p. 57-84

DeRosa A. (2011) “Il disegno e la rappresentazione: lezioni dall’architettura contemporanea”. *Rivista di Estetica*, 47/2011: disegno pp. 95-103

De Rubertis R. (1989) “Relazione introduttiva a il rilievo tra storia e scienza”. *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 11-12

De Rubertis R. (1994). “Il disegno dell’architettura”. Roma: La Nuova Italia Scientifica

De Sivo B., Cardarelli U. (1965). “La struttura in edilizia e in urbanistica”. Napoli: Istituto di Architettura e Urbanistica.

Di Pasquale S. (1996). “L’arte del costruire, tra conoscenza e scienza”. Venezia: Marsilio.

Doglionis F. (1950). “Stratigrafia e Restauro. Tra conoscenza e conservazione dell’architettura”. Trieste: LINT

Dorfles G. (2000). “Scritti di Architettura (1930-1998)”, a cura di L. Tedeschi, Milano: Mendrisio Academy Press

Evans R. (1997) “Translation from Drawing to Buildings and Other Essays”. Londra: AA Publications.

- Formisano A., Florio G., Landolfo R., Mazzolani F. M. (2011) "Un metodo per la valutazione su larga scala della vulnerabilità sismica sugli aggregati storici". XV Convegno ANDIS – L'ingegneria sismica in Italia.
- Formisano A. (2017) "Theoretical and numerical seismic analysis of masonry building aggregates: case studies in San Pio Delle Camere (L'Aquila, Italy)". In: *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2), 227-245
- Fortunato G., Funari M. F., Lonetti P. (2017) "Survey and seismic vulnerability assessment of the Baptistery of San Giovanni in Tumba (Italy)". *Journal of Cultural Heritage*, 26 (2017), 64–78
- Fragomeli A., Galasco A., Graziotti F., Guerrini G., Kallioras S., Magenes G., Malomo D., Mandirola M., Manzini C. F., Marchesi B., Milanese R. R., Morandi P., Penna A., Rossi A., Rosti A., Rota M., Senaldi I. E., Tomassetti U., Cattaro S., da Porto F., Sorrentino L. (2017) "Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 - Parte 2: Esempi di centri colpiti". *Progettazione Sismica – Vol. 8, N.3, Anno 2017*, pp. 75-98
- Fusco G. (1989). "Rilievo e memoria". In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 128-130
- Galasso D. (2008) "Villard de Honnecourt, la rivoluzione strutturale del medioevo". *Archigrafica* 13, 2008
- Gardner H. (1999). "Intelligence reframed: Multiple intelligences for the 21st Century". New York, NY: Basic Books
- Garzino G., Bocconcino M. M., Donato V. (2017) "Metodi e codifiche grafiche per il rilievo della vulnerabilità sismica alla scala architettonica e alla scala urban". *DisegnareCON* 10 (18), pp. 3.1-3.23
- Gausa M., Guallart V., Muller W. (2003). "The Methapolis dictionary of advanced architecture". Barcelona: Actar.
- Giuffrè A. (1989). "Il rilievo nella scienza delle costruzioni". In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 50-52
- Giuffrè A. (1990). "Lettura sulla meccanica delle murature storiche". Roma: Kappa
- Giuffrè, Antonino, Carocci, Caterina F. (1993). "Restauro strutturale. Il rilievo quale indispensabile preliminare dell'analisi meccanica". *XY Dimensioni del disegno*, anno VII, n. 17-19, pp. 34-33.
- Giuffrè, Antonino, Carocci, Caterina F. (1993). "Statics and dynamics of historical masonry buildings". In: *International Workshop on Structural Restoration of Historical Buildings in Old City Centers, Heraclion, Crete*, 1994.
- Giuffrè A. (1994). "Una proposta di restauro per la Colonna di Marco Aurelio". *Palladio*, nuova serie, anno VII, n. 14, luglio-dicembre 1994, p.1-17.
- Giuffrè A. (2011) "Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro. Saggi 1985-1997". Roma: Gangemi Editore
- Gombrich E. (1985), "L'immagine e l'occhio. Altri studi sulla psicologia della rappresentazione pittorica." Torino: Giulio Einaudi Editore.
- Guarnieri A., Pirotti F., Pontin M., Vettore A. (2005) "Combined 3D Surveying Techniques for Structural Analysis Applications". In *Proceedings of the International Symposium on Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 2005, vol. XXXVI-5/W1, pp. 22-24.
- Guarnieri A., Milan N., Vettore A. (2013) "Monitoring Of Complex Structure For Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (Tls) And Photogrammetry". *International Journal of Architectural Heritage* 7(1): pp.54-67
- Guidi G., Russo M., Beraldin J. A. (2010) "Acquisizione 3D e modellazione poligonale". Milano: McGraw-Hill,
- Harris J. (1998) "The Geometry of Schemes". Verlag: Springer.
- Heidegger M. (1954) "La questione della tecnica", in Heidegger M. "Saggi e discorsi". Milano: Mursia, 1991, pp. 5-27.
- Heyman J., Rugarli P. (2014) "Lo scheletro di pietra. Ingegneria strutturale dell'architettura in muratura". Roma: EPC.
- Hjelmlev L. (1943), trad. it. "I fondamenti della teoria del linguaggio". Torino: Einaudi.
- Iori T., Poretti S. (2015) "Il linguaggio delle strutture", in Martire F. (a cura di) (2015) "Storia dell'ingegneria strutturale in Italia – SIXXI 2, Roma: Gangemi Editore

- Kandinskij V. V. (1968) "Punto, linea, superficie". Milano: Adelphi.
- Kandinskij V. V. (2011). "Il problema delle forme e l'almanacco del Cavaliere azzurro". Milano: Abscondita
- Klee P. (1959). "Teoria della forma e della figurazione, vol. I". Milano: Feltrinelli. Ed. orig. Klee P. (1956). "Das Bildnerische Denken".
- Köhler W. (1961) "La psicologia della Gestalt". Milano: Feltrinelli.
- Koyrè A. (1967). "Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione". Torino: Einaudi. Ed. originale "Du monde de l'«à-peu-près» à l'univers de la précision". Paris: Armand Colin, 1961
- Jay M. (1994) "Downcast Eyes. The Denigration of Vision in Twentieth-Century French Thought". Berkeley, Los Angeles: University of California Press.
- Levy M., Salvadori M. (1997) "Perchè gli edifici cadono", I edizione. Milano: Strumenti Bompiani.
- Maldonado T. (1993) "Reale e virtuale". Milano: Feltrinelli.
- Mastrodicca S. (2003) "Dissesti statici delle strutture edilizie. Milano: Hoepli.
- Marotta A. (2012) "Geometria e costruzione: modelli mentali e tipi realizzati nel territorio della difesa." *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 161-166
- Marotta A., De Bernardi M. L. (2012) "Geometria ovvero il cristallo del pensiero". *DisegnareCON* 2012, 5 (9), pp. 41-46
- Martí Aris C. (1996) "Le variazioni dell'identità - Il tipo in architettura". Barcellona: Città Studi
- Meogrossi P. (1989). "Gli indicatori storici, occasione e supporto di verifica del rilievo." In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 135-141
- Middleton R., Watkin D. (1989) "Architettura dell'Ottocento." Milano: Mondadori Electa.
- Migliacci A. (1997) "L'architettura dell'equilibrio e della deformazione". Milano: Masson.
- Migliari R. (2004). "Disegno come Modello". Roma: Edizioni Kappa
- Migliari R. (a cura di). 2000. *Il disegno e la pietra*. Gangemi editore.
- Migliore T. (a cura di), (2007). "Trattato del segno visivo". Milano: Bruno Mondadori.
- Minutoli G. (2017) "Percorsi di conoscenza per la salvaguardia della città storica". Firenze: didapress.
- Mitchell W.J. (1992) "The Reconfigured Eye: Visual Truth in the PostPhotographic Era". Cambridge: MIT Press.
- Moles A. A. (1972), "Teoria informazionale dello schema". *VS*, n.2 (marzo), 1972.
- Moglia G. (2010) "Il sistema normativo mediatore tra conoscenza e progetto." In Coppo D., Boido C. (a cura di) "Rilievo urbano: conoscenza e rappresentazione della città consolidata", Firenze: Alinea Editrice pp.154-161
- Norberg-Schulz C. (1974). "Significato nell'architettura occidentale". Milano: Electa.
- Nuti G. (1989). "La lettura del tempo e ricerca dei segni". In *XY Dimensioni del disegno*, (V), 11-12, 1989, pp. 38-46
- Oreni D., Brumana R., Banfi F., Bertola L., Barazzetti L., Cuca B., Previtali M., Roncoroni F. (2014) "Beyond Crude 3D Models: From Point Clouds to Historical Building Information Modeling via NURBS". In: Ioannides M., Magnenat-Thalmann N., Fink E., Žarnić R., Yen AY., Quak E. (eds) *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*. EuroMed 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8740. Springer, Cham, pp. 166-175
- Pancani G. (2017) *Il centro storico di Poppi: analisi a livello urbano per la valutazione del rischio sismico*. *DisegnareCON* 10/18, 9.1-9.10
- Pardi G. (2012) "Il fatto architettonico. Le risorse della produzione industriale". Milano: Franco Angeli.
- Paris, L. (2010) "Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura". In *X Congresso International Espresión gráfica aplicada a la edificación*. Alicante: APEGA, 2010.

- Parisi F., Augenti N. (2013) "Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks". *Engineering Failure Analysis* 34 (2013) 735–760
- Parra G., Binci M., Magagnini M., Sardella P., Zannoni M. (2005) "Il disegno dell'architettura", Bologna: Pitagora Editrice.
- Parrinello S. (2012) "Il disegno dell'imperfetto. Esigenze descrittive per l'analisi architettonica". In *APEGA Asociación de profesores de Expresión Gráfica Aplicada a la Edificación. Investigación Gráfica Expresión Arquitectónica*. Valencia, 2012.
- Parrinello S. (2013) "Disegnare il paesaggio. Esperienze di analisi e letture grafiche dei luoghi". Firenze: Edifir.
- Parrinello S., De Marco R. (2018). "Dal rilievo al modello: la trasposizione grafica dell'evento sismico". *DISEGNARE IDEE IMMAGINI*, vol. 57, p. 70-81.
- Parrinello S., De Marco R. (2018). "Dalla città alla pietra: il rilievo digitale per la definizione dei comportamenti strutturali dell'architettura storica." In: *Rappresentazione Materiale/Immateriale. UID PER IL DISEGNO*, p. 747-754, Milano: Gangemi Editore.
- Parrinello S., De Marco R. (2019). "Integration and modelling of 3D data as strategy for structural diagnosis in Endangered Sites. The study case of Church of the Annunciation in Pokcha (Russia)". In: *2019 IMEKO TC-4 INTERNATIONAL CONFERENCE ON METROLOGY FOR ARCHAEOLOGY AND CULTURAL HERITAGE*. p. 223-228
- Parrinello S., Picchio F., Becherini P., De Marco R. (2018). "The Drawn Landscape in 3D Databases: The Management of Complexity and Representation in the Historical City". In: *7th Annual International Conference on urban Studies & Planning. ATINER'S CONFERENCE PAPER SERIES*, p. 3-26, Athens: Athens Institute for Education and Research.
- Parrinello S., Picchio F., De Marco R. (2017). "New generations of Digital Databases for the development of Architectural Urban Risk Management". In: *Gambardella, Carmine, 2017. Le Vie dei Mercanti XV Forum Internazionale World Heritage and Disaster*. Fabbrica della Conoscenza, vol. 71, pp. 1-10. Napoli: La scuola di Pitagora editrice.
- Parrinello S., Picchio F., De Marco R. (2018). "Urban modelling experiences for the representation of the historical city in Holy Land." *DISEGNARE CON...*, vol. 11, p. 5.1-5.22.
- Paupério E., Romão X., Arêde A., Costa A., Varum H., Guedes J., Pouca N. V. (2016). "Structural survey and diagnosis of historical constructions the experience of the Construction Institute." *Vitruvio Journal* 1/2016, pp. 49-62
- Picard E. (1905). "La science moderne et son e'tat actuel". Paris: Flammatiou.
- Pieraccini M. Dei D., Betti M., Bartoli G., Tucci G., Guardini N. (2014) "Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy)". *Journal of Cultural Heritage* 15 (2014) 275–282
- Pietroboni M. (2010) "Architettura, linguaggi etici", Tesi di Dottorato XXII ciclo, relatore prof. M. G. Folli, Politecnico di Milano.
- Pizzetti G., Zorgno Trisciuglio A. M. (1980). "Principi statici e forme strutturali". Torino: Utet.
- Quaroni L. (1979). "Progettare un edificio: otto lezioni di architettura". Milano: Mazzotta, "Lezione seconda" p. XX
- Recht R. (2001) "Il disegno d'architettura. Origine e funzioni". Milano: Jaca Book.
- Salvadori M. (1998) "Perchè gli edifici stanno in piedi", V edizione. Milano: Strumenti Bompiani.
- Sanna A. (2009) "Il nuovo progetto per i centri storici, tra conservazione e modificazione", in Ortu G. G., Sanna A. (a cura di) (2009) "Atlante delle culture costruttive della Sardegna". Cagliari: DEI Tipografia del Genio Civile.
- Senaldi I., Magenes G., Penna A. (2010). "Numerical investigations on the seismic response of masonry building aggregates". In: *Advanced Materials Research*, 133, 715-720
- Senaldi I., Guerrini G., Graziotti F., Caruso M., Di Santo F., Comini P., Magenes G., Beyer K., Penna A.. (2017). "Shaking-table test of a half-scaled natural stone masonry building aggregate with flexible diaphragms". In: *ANDIS 2017 Conference*, Pistoia.

Simondon G. (2011). "L'individuazione alla luce delle nozioni di forma e d'informazione". Milano-Udine: Mimesis, [ed. orig. *L'individuation à la lumière des notions de formes et d'information*. Paris: Aubier, 1989].

Soletti A. (1993) "Capitolato o Carta del rilievo?" *XY Dimensioni del disegno*, n°17-18-19/1993, pp.165-169

Tagliaventi I. (1988) "L'organismo architettonico. Vol.1 Sistemi e strutture". Bologna: Editrice CLUEB.

Tagliaventi G. (1996) "Morfologia strutturale dell'architettura. Forma, materia, spazio, caratteri, tecnologia". Roma: Gangemi.

Tsakiri M., Licht D., Pfeifer N. (2006). "Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring". In *Proceedings of 3rd IAG/12th FIG Symp.*, Baden

Ugo V. (1994). "Fondamenti della rappresentazione architettonica". Bologna: Società Editrice Esculapio

Van Riel S. (2007) "Consolidamento degli edifici storici. Appunti e Note". Firenze: Centro Stampa AZ.

Vernizzi C. (2007) "La conoscenza integrata dell'architettura storica monumentale come strumento primario della sua tutela." Conference: E-Arcom07 - Sistemi Informativi per l'Architettura Volume: Atti del Convegno E-Arcom07 - Sistemi Informativi per l'Architettura - Alinea Editrice, Firenze

Vernizzi, Chiara, (2007). "Considerazioni sul rilevamento per la valutazione strutturale: le volte della navata centrale del Duomo di Parma". In *Disegnare. Idee immagini*, vol. 35, pp. 74-85.

Will T, Meier H-R. "Cultural heritage and natural disasters: risk preparedness and the limits of prevention". In: *International council on monuments and sites (ICOMOS). Heritage at risk, special edition*. Dresden: TUD Press; 2007

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2000) "The Finite Element Method, Volume 1: The Basis". 5th Edition. Boston, Oxford: Butterworth-Heinemann

CREDITI AI PROGETTI DI RICERCA INERENTI AI CASI STUDIO AFFRONTATI

Sono riportati, di seguito, i crediti relativi ai progetti di ricerca di cui i casi studio, analizzati e sperimentati nell'ambito di questa tesi di dottorato, fanno parte. Sono stati riportati, per ogni progetto, i nomi dei componenti del team di ricerca e dei laureandi o degli studenti che hanno partecipato a seminari tematici.

Le immagini elaborate dai laureandi o dagli studenti nel corso dei seminari tematici, che ho personalmente seguito, se presenti, sono indicate con il numero di pagina a termine di ogni paragrafo del progetto di ricerca.

ANALISI MORFOLOGICA DEL SISTEMA VOLTATO LIGNEO DELL'AMBIENTE F20BIS PRESSO IL COMPLESSO MUSEALE DEGLI UFFIZI A FIRENZE

RESPONSABILE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
DURATA DEL PROGETTO: 2013 - IN CORSO
COORDINATORE TECNICO: PHD. ARCH. SARA PORZILLI (2013-2017)
PHD.S. ING. RAFFAELLA DE MARCO (2018 - IN CORSO)

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
LS3D - LABORATORIO CONGIUNTO (UNIVERSITÀ DI PAVIA - UNIVERSITÀ DI FIRENZE)
GRANDI UFFIZI - SOCIETÀ CONSORTILE S.C.R.L. (FIRENZE)
MIBAC - MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITÀ CULTURALI

COLLABORATORI: PHD ARCH. FRANCESCA PICCHIO, PHD.S. ANNA DELL'AMICO, PHD.S. ARCH. SILVIA LA PLACA

DOCUMENTAZIONE DIGITALE E RILIEVO URBANO DEL CENTRO STORICO DELLA CITTÀ DI PAVIA.

RESPONSABILE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
DURATA DEL PROGETTO: 2014 - IN CORSO
COORDINATORE SCIENTIFICO: PHD ARCH. FRANCESCA PICCHIO

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
LS3D - LABORATORIO CONGIUNTO (UNIVERSITÀ DI PAVIA - UNIVERSITÀ DI FIRENZE)

COLLABORATORI: PHD ARCH. ANDREA PAGANO, PHD.S. ING. RAFFAELLA DE MARCO

PROGETTO DI ANALISI ED INVESTIGAZIONE DIGITALE PER LA VALORIZZAZIONE DEL COMPLESSO MONUMENTALE DELL'ALHAMBRA E DEL GENERALIFE DI GRANADA, SPAGNA.

RESPONSABILI SCIENTIFICI: PROF. SANDRO PARRINELLO, PROF. ANTONIO GOMEZ-BLANCO PONTES
DURATA DEL PROGETTO: 2017 - IN CORSO
COORDINATORE SCIENTIFICO: PHD ARCH. FRANCESCA PICCHIO
COORDINATORE TECNICO: PHD.S. ANNA DELL'AMICO

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
ETS ESCUELA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA
DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
LS3D - LABORATORIO CONGIUNTO (UNIVERSITÀ DI PAVIA - UNIVERSITÀ DI FIRENZE)
SMLAB LAB (SURVEY AND MODELING LAB OF ARCHITECTURAL HERITAGE DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA)
PATRONATO DE LA ALHAMBRA Y GENERALIFE
EBIME, BIM CONSULTING SERVICES FOR ARCHITECTURE AND ENGINEERING

COLLABORATORI: PHD CONCEPCIÓN RODRÍGUEZ MORENO, ARCH. ÁGATA A. MICHOT ROBERTO,

STUD. EMILIA NAVARRETE RUIZ, PHD.S. PIETRO BECHERINI, PH.D.S. MATTEO BIGONGIARI, PHD.S. RAFFAELLA DE MARCO, PHD.S. FEDERICO CIOLI, PHD.S. EUGENIA BORDINI, ARCH. KSENIIA MEZENINA, PHD.S. MONICA BERCIGLI, ARCH. JOSÉ PÉREZ GARRIDO, ARCH. CARLOS RODA GARCÍA, PHD JUAN FRANCISCO REINOSO GORDO, PHD. ESTEBAN RIVAS LÓPEZ, PROF. RAFAEL GARCÍA QUESADA.

ARCHITECTURAL DOCUMENTATION AND 3D LASER SCANNER SURVEY OF AL-JAZZAR MOSQUE IN ACRE, ISRAEL.

RESPONSABILE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
 DURATA DEL PROGETTO: 2017
 COORDINATORE SCIENTIFICO: PHD ARCH. FRANCESCA PICCHIO

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA LS3D - LABORATORIO CONGIUNTO (UNIVERSITÀ DI PAVIA - UNIVERSITÀ DI FIRENZE) WELFAR ASSOCIATION TAWOON

COLLABORATORI: PHD.S. RAFFAELLA DE MARCO, PHD.S. PIETRO BECHERINI, PHD.S. MONICA BERCIGLI, PHD.S. MATTEO BIGONGIARI, PHD.S. ANNA DELL'AMICO, PHD.S. KSENIIA MEZENINA, ARCH. NAJATI FITIANI, ING. RAIF A. TOURI, STUD. MARIANGELA CANESTRALE.

Alcuni dei risultati dei rilievi, presenti a p.162 sono stati estrapolati dalla Tesi di Laurea Magistrale Quinquennale di Mariangela Canestrà in Ingegneria Edile e Architettura dell'Università degli Studi di Pavia dal titolo: *La documentazione della Moschea di Al-Jazzar ad Acri, in Israele. Metodologie di rilievo integrato per indagini diagnostiche non invasive..* Relatore Prof. Sandro Parrinello, Correlatore PhD Francesca Picchio. Aprile 2018.

DOCUMENTAZIONE DIGITALE DEL SISTEMA FORTIFICATO URBANO DELLA CITTÀ STORICA DI PAVIA.

RESPONSABILE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
 DURATA DEL PROGETTO: 2017 - IN CORSO
 COORDINATORE TECNICO: PHD.S. ING. RAFFAELLA DE MARCO

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA

COLLABORATORI: PHD.S. FRANCESCA GALASSO, ING. CHIARA MALUSARDI

3D SURVEY AND DOCUMENTATION FOR SEISMIC ASSESSMENT OF NATURAL STONE MASONRY BUILDINGS IN BASEL, SWITZERLAND.

RESPONSABILE SCIENTIFICO DEL RILIEVO: PROF. SANDRO PARRINELLO
 RESPONSABILI SCIENTIFICI DEL PROGETTO: PROF. GUIDO MAGENES, PROF. ANDREA PENNA, PROF. KATRYN BEYER

DURATA DEL PROGETTO: 2017 - 2019
COORDINATORE TECNICO PER IL RILIEVO: PHD.S. ING. RAFFAELLA DE MARCO
COORDINATORE TECNICO PER IL PROGETTO PHD. ING. ILARIA SENALDI

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
FONDAZIONE EUCENTRE, CENTRO EUROPEO DI FORMAZIONE E RICERCA IN
INGEGNERIA SISMICA

COLLABORATORI: PHD.S. PIETRO BECHERINI, PHD.S. MATTEO BIGONGIARI, PHD.S. FEDERICO
CIOLI, PHD.S. ANNA DELL'AMICO, PHD.S. KSENIA MEZENINA, STUD.
MARIANGELA CANESTRALE.

Alcuni degli elaborati dei rilievi, presenti alle pp.148, 176-180, 183-187, 190-193, sono stati estrapolati dalla Tesi di Laurea Magistrale Quinquennale di Manuel Desole in Ingegneria Edile e Architettura dell'Università degli Studi di Pavia dal titolo: *Applicazione di tecniche di rilevamento LiDAR e acquisizione dinamica 3D in test su tavola vibrante di un prototipo in scala 1:2 di un edificio in muratura di pietra naturale*. Relatori Prof. Andrea Penna, Prof. Sandro Parrinello, Correlatori PhD Ing. Ilaria Senardi, PhD.S. Raffaella De Marco, Febbraio 2019.

SPERIMENTAZIONI DI FAST SURVEY PER IL MONITORAGGIO E LA GESTIONE DELLE CHIESE COLPITE DA SISMA NELLA PROVINCIA DI TERAMO.

RESPONSABILE SCIENTIFICO DEL RILIEVO: PROF. SANDRO PARRINELLO
DURATA DEL PROGETTO: 2018
COORDINATORE SCIENTIFICO: PHD FRANCESCA PICCHIO

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
FONDAZIONE EUCENTRE, CENTRO EUROPEO DI FORMAZIONE E RICERCA IN
INGEGNERIA SISMICA

COLLABORATORI: PHD.S. RAFFAELLA DE MARCO, PHD.S. PIETRO BECHERINI, PHD.S. ANNA
DELL'AMICO, PHD. ING. CHIARA CASAROTTI, PHD. ING. ILARIA SENALDI, ING.
MARTINA MANDIROLA, PHD. ING. EMANUELE BRUNESI.

EU HORIZON 2020-R&I-RISE-RESEARCH & INNOVATION STAFF EXCHANGE MARIE SKŁODOWSKA-CURIE PROGETTO EUROPEO "PROMETHEUS" (PROTOCOLS FOR INFORMATION MODELS LIBRARIES TESTED ON HERITAGE OF UPPER KAMA SITES). GRANT AGREEMENT NO 821870.

COORDINATORE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
DURATA DEL PROGETTO: 2019-2021 (36 MESI)

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA, ITALIA
UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA, SPAGNA
PERM NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY RESEARCH, RUSSIA
SISMA, SISTEMI INTEGRATI DI MONITORAGGIO ARCHITETTONICO, FIRENZE
EBIME, BIM CONSULTING SERVICES FOR ARCHITECTURE & ENGINEERING, SPAGNA

TEAM DI RICERCA: PROF. SANDRO PARRINELLO, PHD FRANCESCA PICCHIO, PHD.S. RAFFAELLA
DE MARCO, PHD.S. ANNA DELL'AMICO, PROF. LUIS PALMERO IGLESIAS, PROF.

MARÍA-ISABEL GINER-GARCÍA, PROF. FERNANDO COS-GAYÓN LÓPEZ, PROF. SVETLANA V. MAXIMOVA, PHD. ANNA SHAMARINA, PHD.S. JULIA BUSHMAKOVA, PHD. S. ANASTASIA SEMINA

Alcuni degli elaborati dei rilievi, presenti alla p.256, 258-259, sono stati estrapolati elaborati all'interno del corso di *Architectural Survey and Restoration* (Prof. Sandro Parrinello, Prof. Giovanni Minutoli) dell'Italian-Chinese Double Degree in Building Engineering and Architecture dell'Università di Pavia e Tonji University of Shanghai per l'a.a. 2018-2018.

3D BETHLEHEM - SISTEMA DI GESTIONE E CONTROLLO DELLA CRESCITA URBANA PER LO SVILUPPO DEL PATRIMONIO E IL MIGLIORAMENTO DELLA VITA NELLA CITTÀ DI BETLEMME - PROGETTO AICS AGENZIA ITALIANA PER LA COOPERAZIONE ALLO SVILUPPO

COORDINATORE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
DURATA DEL PROGETTO: 2019-2021
CAPOFILO DEL PROGETTO: COMUNE DI PAVIA

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: COMUNE DI PAVIA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA
COMUNE DI BETLEMME
UNIVERSITÀ DI BETLEMME
PROVINCIA DI PAVIA
ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI PAVIA
SISTERR SISTEMA TERRITORIALE PAVESE PER LA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE
ANCI LOMBARDIA
VIS – VOLONTARIATO INTERNAZIONALE PER LO SVILUPPO
PALESTINIAN ENGINEERS ASSOCIATION - JERUSALEM CENTER

COLLABORATORI ALLA RICERCA: PROF. MARCO MORANDOTTI, PROF. DANIELA BESANA, PROF. ROBERTO DE LOTTO, PHD FRANCESCA PICCHIO, PHD.S. RAFFAELLA DE MARCO, PHD.S. PIETRO BECHERINI, PHD.S. FRANCESCA GALASSOM MSC. ELISABETTA DORIA, STUD. PAROLA BARAZZONI, STUD. ALBERTO PETTINEO

Alcuni degli elaborati dei rilievi, presenti alla p.279, sono stati estrapolati dalla Tesi di Laurea Magistrale Quinquennale di Paola Barazzoni in Ingegneria Edile e Architettura dell'Università degli Studi di Pavia dal titolo: *Betlemme. Rilievo e analisi del nucleo urbano antico per la comprensione dell'edificato storico*. Relatore Prof. Sandro Parrinello, Correlatori PhD Francesca Picchio, PhD Andrea Arrighetti, Aprile 2019.

RILIEVO 3D GEOMETRICO E MATERICO DELLA TORRE DELL'OROLOGIO DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA, PER L'ANALISI MORFOLOGICA ED IL MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI PLASTICHE.

RESPONSABILE SCIENTIFICO: PROF. SANDRO PARRINELLO
DURATA DEL PROGETTO: 2019
COORDINATORE TECNICO: PHD.S. ING. RAFFAELLA DE MARCO

PARTNERSHIP E ISTITUZIONI PUBBLICHE: UNIVERSITÀ DI PAVIA, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
DADA LAB. - LABORATORIO SPERIMENTALE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA

COLLABORATORI: ING. ALESSIA MICELI, PHD.S. ANNA DELL'AMICO, PHD.S. FRANCESCA GALASSO, PHD.S. SILVIA LA PLACA

Abstract

La predisposizione di pratiche di tutela al patrimonio architettonico, sia nell'ambito di interventi di pura conservazione che nel caso di progetti di riuso e riabilitazione funzionale, pone in evidenza tra i molteplici livelli di analisi dell'impianto edilizio quello del comportamento strutturale dei fabbricati. L'analisi strutturale, con un percorso di evoluzione storica che ne ha influenzato assunti ed applicazioni pratiche in relazione all'eterno connubio di Arte e Scienza, si trova oggi orientata verso risultati di natura quantitativa numerica derivanti da sperimentazioni di sollecitazione meccanica e simulazione dinamica, già predisposti per le soglie di valutazione dalle prescrizioni normative. Tali operazioni sono solite produrre elaborati codificati, di carattere preferenzialmente numerico e schematico che, pur definendo puntualmente il riscontro di grandezze statiche e cinematiche univoche, sono a richiedere algoritmi e competenze specifiche con conseguenti difficoltà settoriali nella comunicazione globale ed integrata dei dati rilevati.

Le strutture ingegneristiche, così forzate a processi di semplificazione iconici, esprimono nel confronto con la controparte figurale architettonica tutte le incoerenze derivanti dalla modellazione sintetica adottata in via computazionale: apparati scheletrici, "scarni" di specificità materiale e concretezza storica, omissi della complessa ma reale imperfezione costruttiva ed impoveriti nella propria identità morfologica, che per prima ne è invece parametro di espressione fenomenica per comportamenti ed effetti meccanici.

Lo studio della struttura in quanto Forma, su tali basi, vuole recuperare il ruolo della grafica nell'ambito strutturale, concentrandosi sulle possibilità offerte dalle odierne metodologie di acquisizione, ricostruzione e sintesi

dell'immagine virtuale nella percezione e rappresentazione della forma architettonica. In particolare, attraverso l'applicazione di tecniche di rilevamento digitale per la definizione di modelli 3D ad alta affidabilità, si tenta di individuare protocolli funzionali alla documentazione dei comportamenti statici con procedure di indagine non invasive, svincolate dal supporto di laboratori di ingegneria sperimentale e capaci di mobilitare speditive azioni congiunte di monitoraggio ed intervento in contesti di emergenza.

La ricerca tratta la sperimentazione di metodologie di rilevamento digitale e modelli 3D reality-based per la documentazione del comportamento statico delle strutture complesse nell'architettura storica, valutando le possibilità di ottimizzazione e relazione tra rilievo digitale, banche dati morfologiche e modelli virtuali nel monitoraggio strutturale di fabbriche architettoniche e comparti urbani. Attraverso la sperimentazione congiunta con il centro di ricerca in ingegneria sismica EUCENTRE e la convalida su alcuni casi studio, l'obiettivo è di evidenziare la capacità dei modelli 3D virtuali di elevata aderenza formale, denominati "reality-based" poiché derivanti da una trasposizione dell'imperfezione materico-costruttiva, come privilegiati veicoli di comunicazione dell'informazione strutturale, nei loro contenuti geometrici e nei corrispondenti dati analitici. Il fine è di sviluppare approcci univoci, immediati e ad ampio raggio comunicativo tra dato meccanico e disegno architettonico, introducendo protocolli di ricerca integrata tra il campo dell'indagine rappresentativa architettonica ed il settore ingegneristico-strutturale.

Abstract

The organisation of protection practices for the architectural heritage, both in the context of pure conservation interventions and in the case of reuse and functional rehabilitation projects, highlights the structural behavior of the buildings among the multiple levels of analysis of the built system. Structural analysis, with a path of historical evolution that has influenced its assumptions and practical applications in relation to the eternal constraint of Art and Science, is now oriented towards results of a quantitative and numerical nature deriving from mechanical stress and dynamic simulation experiments, already prepared for the assessment thresholds from the regulatory requirements. These operations usually produce coded documents, preferentially numerical and schematic, which, while defining punctually the response of unique static and kinematic quantities, require specific algorithms and skills with consequent sectoral difficulties in the global and integrated communication of the surveyed data.

The engineering structures, thus forced to iconic simplification processes, express in comparison with the architectural figural counterpart all the inconsistencies deriving from the synthetic modeling computationally adopted: skeletal apparatuses without material specificity and historical concreteness, omitted from the complex but real constructive imperfection and impoverished in their morphological identity, which is instead the first parameter of phenomenal expression for mechanical behavior and effects.

The study of the structure as Shape, on these bases, wants to recover the role of graphics in the structural context, focusing on the possibilities offered by today's methodologies of acquisition, reconstruction and synthesis of the virtual image in

the perception and representation of the architectural form. In particular, through the application of digital survey techniques for the definition of highly reliable 3D models, attempts are made to identify functional protocols for the documentation of static behaviors with non-invasive investigation procedures, released from the support of experimental and capable engineering laboratories to mobilize expeditious joint monitoring and intervention actions in emergency contexts.

The research deals with the experimentation of digital survey methodologies and reality-based 3D models for the documentation of the static behavior of complex structures in historical architecture, evaluating the possibilities of optimization and relationship between digital survey, morphological databases and virtual models in structural monitoring of architectural blocks and urban units. Through a joint experimentation with EUCENTRE, seismic engineering research center, and with the validation on some case studies, the goal is to highlight the capability of virtual 3D models with high formal adherence, called "reality-based" since they derive from a transposition of the material-constructive imperfection, as privileged vehicles of communication of structural information, in their geometric contents and in the corresponding analytical data. The aim is to develop unique, immediate and wide-ranging communication approaches between mechanical data and architectural drawing, introducing integrated research protocols between the field of architectural representative investigation and the engineering-structural sector.