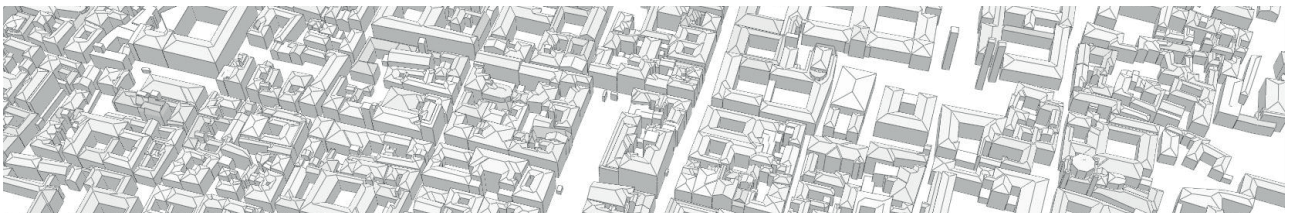
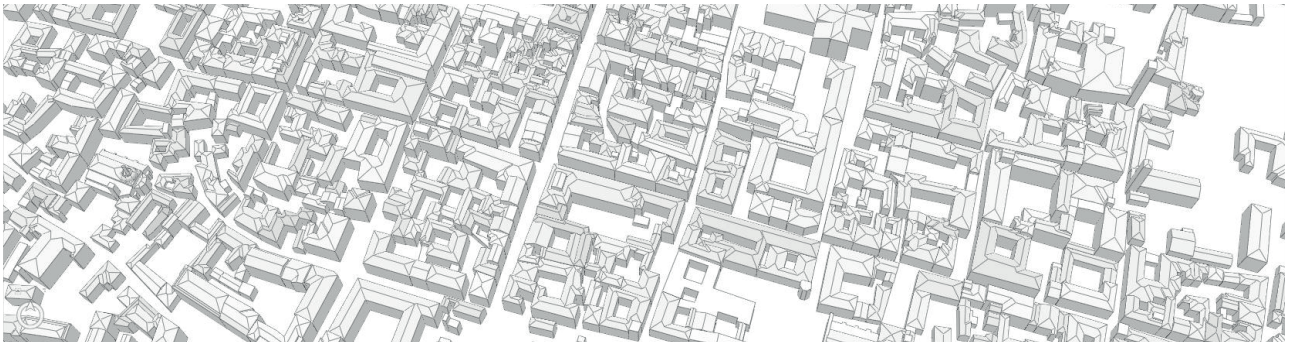


Università degli Studi di Pavia
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Dottorato di ricerca XXXIII ciclo
Design, Modeling and Simulation in Engineering



MODELLI DIGITALI MULTISCALARI PER LA GESTIONE
DELL'INFORMAZIONE TECNICA SUI PATRIMONI EDILIZI
CONOSCENZA E SUPPORTO ALLA DECISIONE PER IL
MIGLIORAMENTO ENERGETICO DEL COSTRUITO



Coordinatore:
Prof. Alessandro Reali

Tutor:
Prof. Marco Morandotti
Prof. Anna Magrini

Candidata:
Cristina Cecchini

Università degli Studi di Pavia
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
Dottorato di ricerca XXXIII ciclo
Design, Modeling and Simulation in Engineering
Indirizzo Civil Engineering and Architecture
Settore disciplinare ICAR/10 - Architettura Tecnica

Membri del collegio docenti:

Prof. Ferdinando Auricchio (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 08)
Prof. Domenico Asprone (Napoli, Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura – ICAR 09)
Prof. Roberto De Lotto (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 20)
Prof. Marco Morandotti (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 10)
Prof. Simone Morganti (Pavia, Ingegneria Industriale e dell'Informazione – Ing/Ind 34)
Prof. Sandro Parrinello (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 17)
Prof. Andrea Penna (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICA 09)
Prof. Alessandro Reali (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 08)
Prof. Stefano Sibilla (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 01)
Prof. Andrea Capodaglio (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 03)
Prof. Enrico Creaco (Pavia, Ingegneria Civile e Architettura – ICAR 02)
Prof. Matteo Negri (Pavia, Matematica – Mat 05)
Prof. Annalisa Buffa (Lausanne, Institute of Mathematics – MAT 08)
Prof. Laura De Lorenzis (Braunschweig, Institute for Applied Mechanics – ICAR 08)
Prof. Marco Marengo (Brighton, Advanced Engineering Centre – ING/IND 10)
Prof. Ulisse Stefanelli (Vienna, Faculty of Mathematics – MAT 05)

Candidata
Cristina Cecchini

Tutor
Prof. Marco Morandotti
Prof. Anna Magrini

Coordinatore
Prof. Alessandro Reali

Direttore Scuola di Alta Formazione Dottorale SAFD
Prof. Giuseppe Savarè

Indice

ABSTRACT	9
INTRODUZIONE	15
1. Obiettivi della ricerca	17
1.1. Conoscenza	18
1.2. Supporto alla decisione	19
2. Ambito di applicazione	21
2.1. Gli edifici pubblici	23
2.1.1. L'edilizia universitaria	24
2.2. Sintesi del quadro normativo	27
2.2.1. Le leggi nazionali	28
2.3. Progetti di ricerca europei	30
3. La riqualificazione energetica del costruito	41
3.1. Gli interventi di miglioramento energetico	45
3.1.1. Gli interventi sull'involucro	47
3.1.2. Gli interventi sull'impianto	64
3.2. Il caso degli edifici storici	71
3.2.1. Le linee guida per la riqualificazione degli edifici storici	73
4. Presentazione del caso studio	79
4.1. L'Università di Pavia	79
PARTE 1: UN DATABASE SPAZIALE PER LA GESTIONE DELL'INFORMAZIONE TECNICA SUI PATRIMONI EDILIZI	85
1. Il ruolo dell'informazione tecnica nel processo edilizio	87
1.1. L'approccio tecnologico all'edificio	88
1.2. Le opportunità dell'ICT	92
2. Analisi dei requisiti	95
2.1. Classe 1: Replicabile/Standardizzato/Aperto/Interoperabile	95
2.2. Classe 2: Interoperabile/Multiscalare/Multidisciplinare	97
2.3. Classe 3: Multidisciplinare/Tematico/Modulare/Estensibile	99
2.4. Classe 4: Navigabile/Semantico/Georeferenziato	102
3. Strumenti	105
3.1. Dati input	105
3.1.1. Dati geografici	105
3.1.2. Dati energetici	107
3.2. Modelli informativi tridimensionali	109
3.2.1. Scala urbana	110
3.2.2. Scala edile	113
3.3. Integrazione multiscalare	117
3.4. Gestione dell'informazione	126
3.4.1. Base di dati fondata su CityGML	128
3.5. Veicolo per l'interoperabilità	130
3.6. Conclusioni	131
4. Metodologia	133
4.1. GIS tridimensionale	134
4.2. Modelli informativi	138
4.3. Application Domain Extension	143
4.4. CityGML LOD1,2	147

4.5. CityGML LOD3,4.....	154
4.6. Base di dati.....	161
4.7. Conclusioni.....	169
5. Caso studio.....	171
5.1. Flusso di lavoro.....	171
5.2. Applicazioni.....	177
5.2.1. Geolocalizzazione degli APE.....	177
5.2.2. Visualizzazione dei dati energetici del patrimonio UNIPV.....	182
5.3. Conclusioni.....	186
PARTE 2: UNO STRUMENTO DI SUPPORTO ALLA DECISIONE PER IL MIGLIORAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI ESISTENTI.....	189
1. Il decision-making nelle fasi preliminari del processo edilizio.....	191
1.1. I sistemi di supporto alla decisione.....	194
1.2. Le applicazioni in ambito energetico.....	196
2. La metodologia cost-optimal.....	199
2.1. Procedura di calcolo.....	202
2.1.1. Dati input.....	202
2.1.2. Stima economica.....	203
2.1.3. Valutazione energetica.....	205
2.1.4. Applicazione al contesto italiano.....	208
2.2. Metodo ERS/ES.....	208
3. Applicazione al progetto.....	211
3.1. Inserimento nel processo.....	216
3.1.1. Limiti e applicabilità.....	216
3.1.2. Integrazione dei dati.....	218
3.1.3. Estrazione dei dati.....	221
3.1.4. Elaborazione numerica.....	224
3.2. Conclusioni.....	228
4. Caso studio.....	231
4.1. Catalogo delle ERS.....	231
4.2. Parametri di calcolo.....	238
4.3. Esempi applicativi.....	239
4.3.1. Palazzo Botta.....	240
4.3.2. Palazzo San Felice.....	254
4.4. Conclusioni.....	269
CONCLUSIONI.....	273
1. Considerazioni conclusive.....	275
1.1. Risultati raggiunti.....	276
1.2. Prospettive aperte.....	277
BIBLIOGRAFIA.....	281
ALLEGATI.....	301

ABSTRACT

La digitalizzazione delle informazioni sull'ambiente costruito è un tema di grande complessità e richiede un approccio multidisciplinare per adattarsi alle esigenze di una pluralità di utenze, che possono avvalersi di diversi modelli degli edifici per il raggiungimento di obiettivi specifici. In questo contesto, con la finalità di fornire rappresentazioni coerenti e non ridondanti, occorre pensare a nuove soluzioni per l'archiviazione e la condivisione delle informazioni tecniche, che siano in grado di capitalizzare le conoscenze già acquisite e di integrare i dati nel corso di tutto il ciclo di vita degli organismi edilizi. In questa direzione, progressivamente i metodi di rappresentazione degli edifici si sono evoluti verso le tecnologie digitali e, tra di esse, sta emergendo l'opportunità di utilizzare sinergicamente la modellazione informativa a scala edile (BIM - Building Information Modeling) e urbana (GIS - Geographic Information System) attraverso la definizione di database spaziali multiscalarari. L'impiego di questi strumenti permette di costituire archivi digitali che organizzano la conoscenza sui beni sfruttando le potenzialità delle IT (Information Technology) per la realizzazione di applicazioni rivolte alla visualizzazione, all'interrogazione e all'analisi delle informazioni sul costruito.

La ricerca presentata propone un flusso di lavoro per la creazione di un sistema informativo fondato su GIS e BIM, capace di raccogliere e armonizzare in un'unica piattaforma navigabile dati eterogenei sul patrimonio costruito. La struttura si fonda su un nucleo centrale costituito da un database spaziale in formato standard, che è possibile arricchire per mezzo del collegamento a moduli di approfondimento tematici e strumenti di supporto alla decisione, determinando una configurazione modulare ed estensibile.

Nel caso in esame, si approfondisce il tema del comportamento energetico degli edifici esistenti e della valutazione comparativa di eventuali scenari di riqualificazione. Nel contesto europeo, l'efficienza energetica dei patrimoni immobiliari costituisce un campo di indagine estremamente stimolante in virtù della natura dei beni coinvolti, che spesso includono manufatti obsoleti dal punto di vista tecnologico, ma fondamentali nella definizione del quadro identitario delle comunità, per i quali coesistono interessi volti alla tutela del valore e all'aggiornamento delle prestazioni.

La metodologia è stata applicata al centro storico della città di Pavia, con particolare riferimento all'asset immobiliare dell'Università, un patrimonio di grande interesse sia per l'eccezionale valore culturale, che per la sua vastità e varietà. In relazione al caso studio, sono state sviluppate applicazioni per la consultazione delle informazioni di carattere energetico e per la valutazione degli scenari trasformativi ottimali in funzione dei costi di gestione sul ciclo di vita.

Le sperimentazioni dimostrano l'operabilità del flusso di lavoro e consentono di mettere in luce i vantaggi derivanti dalla disposizione di una piattaforma per la raccolta e la condivisione

dei dati sull'ambiente costruito, concepita per supportare indagini a diverse scale di dettaglio e per essere inclusiva nei confronti di tutti le classi di utenza.

The digitalisation of information on the built environment is a complex theme, which requires a multi-disciplinary approach to suit the needs of different users while each class could make use of specific models to reach their targets. In this context, intending to provide coherent and non-redundant representations, we need to think to new solutions for storing and sharing technical information. These should be able to capitalize existing knowledge and to integrate new data during the whole lifecycle of buildings. In this direction, representation methods have progressively evolved toward digital technologies, among those the opportunity of making joint use of GIS (Geographic Information System) and BIM (Building Information Modeling) through multi-scalar spatial database is emerging. The adoption of those tools allows defining digital archives that organize knowledge by taking advantage of the potential of IT (Information Technology) for realizing applications aimed at visualizing, querying and analysing building information.

The research proposes a workflow for the creation of an information system based on GIS and BIM, able to collect and harmonize heterogeneous data on the built environment within a single platform. The structure is founded on a central core consisting of a standard spatial database, which can be enriched by linking thematic modules and decision support tools, realizing a modular and extensible configuration.

In the present case, the theme of energy behaviour and refurbishment of existing buildings is examined in detail. In the European context, the energy efficiency of the built environment is a field of investigation of great interest given the building typologies that are involved. In fact, they often include constructions that are obsolete from a technical perspective, but crucial in the definition of the identity of the communities. For those buildings, interests addressed to the conservation of value and the upgrading of performance could coexist, determining a complex framework.

The methodology was applied to the historical centre of Pavia, with a focus on the property asset of its University, which is extremely interesting due to its exceptional value, other than its vastness and variety. Concerning the case study, some applications for displaying energy information and assessing refurbishment scenarios were developed.

The experiments show the operability of the workflow and allow to highlight the advantages deriving from the organization of a platform for collecting and sharing data on the built environment, designed to support investigation at different scales and to be inclusive with regard to all users.

INTRODUZIONE

1. Obiettivi della ricerca

La presente ricerca vuole fornire un contributo nell'ambito della gestione dei patrimoni immobiliari, sfruttando le potenzialità di sistemi informativi e modelli predittivi per promuovere processi edilizi efficaci, sviluppati grazie alla capitalizzazione dei quadri informativi esistenti sul costruito. In un'ottica multiscalare e multidisciplinare, ciò può avvenire per mezzo di una struttura dinamica, progettata per raccogliere ed armonizzare i dati già disponibili e per integrare le nuove informazioni sugli organismi edilizi. Nella pratica ordinaria, infatti, è comune acquisire ed elaborare dati, senza che esista una visione sistematica sulla loro gestione [1]. Rilievi geometrici, indagini strutturali, audit energetici e altre tipologie di analisi sugli edifici vengono spesso eseguite da soggetti diversi, con una prospettiva strettamente monodisciplinare che non considera il potenziale valore aggiunto che scaturirebbe dalla lettura coordinata dei risultati. Eppure, la gestione degli edifici esistenti è un tema intrinsecamente multidisciplinare, che richiede l'integrazione di numerosi tipi di informazione e lo sfruttamento della conoscenza sviluppata da diverse figure professionali [2]. Il superamento di questa visione frammentaria, che genera potenzialmente errori e sovraccosti nella fase di gestione e manutenzione delle opere [3], può essere agevolato dalla definizione di piattaforme informative multiscalari, organizzate in strutture standard, adatte alla condivisione e alla fruizione da parte di classi di utenza differenziate [4]. Il lavoro svolto punta alla realizzazione di un sistema informativo per la gestione dell'informazione tecnica sul patrimonio costruito, sviluppato attraverso modelli dati aperti e interoperabili, ancorché standardizzati, per fornire uno strumento di supporto ai processi che investono gli edifici durante tutto il loro ciclo di vita. Sebbene lo strumento possa essere utilizzato con profitto da soggetti diversi, la metodologia viene impostata nell'ottica di fornire uno strumento particolarmente utile alle amministrazioni pubbliche che necessitano di tracciare traiettorie di sviluppo sostenibili per i propri beni.

L'attenzione è principalmente focalizzata sulla gestione energetica del patrimonio costruito e sulle opportunità di miglioramento delle prestazioni associate, un tema che risulta centrale nelle politiche di sviluppo della Commissione Europea fin dalla sua origine e che è stato recentemente rilanciato per mezzo dell'iniziativa "renovation wave" [5], finalizzata alla promozione di strumenti tecnici ed economici per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Tuttavia, l'obiettivo a lungo termine è quello di arrivare alla realizzazione di una struttura modulare, atta a supportare un sistema informativo multidisciplinare. Questo potrà essere basato su un core centrale, costituito dai modelli

geometrici degli edifici, a cui poter agganciare moduli tematici per l'approfondimento di specifici domini della conoscenza. Il risultato finale della sperimentazione non è, quindi, un prodotto statico, ma un ambiente che si evolve e prende forma nel tempo, accompagnando il ciclo di vita degli edifici con l'arricchimento dei relativi quadri informativi.

Operativamente, la struttura è realizzata attraverso la messa a sistema di modelli GIS (Geographic Information System) e BIM (Building Information Modeling) all'interno dello schema informativo CityGML (City Geographic Markup Language) e dalla successiva costruzione di una base di dati relazionale per l'organizzazione dei contenuti, così da garantisce integrità e accessibilità dei dati.

Con la definizione di tale strumento, gli obiettivi specifici che si vogliono raggiungere sono due: organizzare e favorire lo sviluppo della conoscenza sugli edifici esistenti e, per mezzo di questa, supportare i processi decisionali per la gestione e l'eventuale trasformazione degli stessi.

1.1. Conoscenza

Perché un'operazione sul costruito sia un'azione responsabile, occorre che si basi su una solida base di conoscenza. Non a caso, la pratica del miglioramento sismico degli edifici, che risulta all'avanguardia fra le discipline che operano sul costruito [6], fonda su Livelli di Conoscenza e Fattori di Confidenza il giudizio sulla valutazione della sicurezza e sul progetto degli interventi. Tuttavia, se in passato tale conoscenza poteva essere gestita in modo analogico, coinvolgendo pochi soggetti e una mole limitata di dati, ad oggi il livello di complessità raggiunto nei processi edilizi ha reso centrale il tema della rappresentazione e del coordinamento dell'informazione [7], focalizzando in particolare l'attenzione sulle opportunità legate all'utilizzo di strumenti informatici per la sua manipolazione [8].

In risposta a questo quadro esigenziale, la piattaforma oggetto di questa ricerca, si propone come uno strumento capace di raccogliere ed armonizzare grandi moli di dati sul costruito, rendendole facilmente accessibili e condivisibili per mezzo di modelli tridimensionali navigabili, organizzati secondo strutture database standardizzate. L'organizzazione dell'informazione tecnica per mezzo di modelli tridimensionali navigabili offre importanti benefici, in termini di gestione e comunicazione, per la costruzione di una conoscenza condivisa sul patrimonio costruito, in quanto:

- Aumenta la leggibilità di grandi quantità di dati eterogenei, grazie alla possibilità di visualizzare graficamente gli esiti delle

analisi, anche attraverso la produzione di mappe tematiche capaci di evidenziare gli aspetti più rilevanti;

- Consente di condurre indagini multidisciplinari, connettendo aspetti afferenti a diversi domini di conoscenza e attivando la possibilità di eseguire valutazioni di carattere trasversale;

- Permette di porre in relazione diretta le informazioni con le entità fisiche a cui si riferiscono, migliorando l'effettiva comprensione dei fenomeni complessi e della loro incidenza sul panorama naturale e costruito.

Inoltre, la progettazione di uno strumento informativo dotato di un ambiente di visualizzazione efficace ha un importante risvolto in ambito sociale, in quanto rende accessibile l'informazione tecnica a tutte le classi di utenza, in un'ottica inclusiva.

Se, infatti, la combinazione di dati rigorosi con grafiche chiare e di facile interpretazione, può favorire le dinamiche di comunicazione fra il personale tecnico e i soggetti incaricati della governance, al fine di supportare l'elaborazione sinergica di azioni di sviluppo degli stock edilizi. Sul versante opposto, la condivisione delle informazioni con gli utenti finali favorisce la diffusione di una cultura conoscitiva sul costruito, che si traduce nell'educazione delle comunità ad un uso responsabile degli edifici. Questo aspetto assume particolare rilevanza in ambito energetico, in cui una maggiore consapevolezza sui consumi può indurre ad un migliore utilizzo delle risorse, stimolando il cosiddetto energy-aware consuming [9].

1.2. Supporto alla decisione

Nelle fasi preliminari dei processi edilizi prendono forma decisioni strategiche, il cui effetto si ripercuote sulle prestazioni dell'edificio nel corso del suo intero ciclo di vita [10]. Tuttavia, proprio perché ci si trova nei primi momenti di approccio al progetto, non è possibile fondare queste scelte su analisi dettagliate, che vengono solitamente svolte negli stadi successivi di indagine. Si rende, quindi, di fondamentale importanza sfruttare al massimo i quadri conoscitivi già disponibili, e capitalizzare l'informazione attraverso la messa in opera di strumenti di supporto alla decisione basati sulle tecnologie informatiche, sviluppati per evidenziare il rapporto tra le scelte progettuali e i loro effetti in termini di prestazioni attese e di impatti sull'esistente [11]. Dal punto di vista degli enti gestori, ciò consente un migliore controllo dei processi edilizi, nel rispetto dei principi di conduzione della pubblica amministrazione.

In questa direzione, nell'ultimo decennio, si è assistito all'introduzione di testi normativi volti ad incoraggiare lo sfruttamento dei vantaggi delle IT (Information Technology) per la definizione di flussi di lavoro più funzionali in ambito

edilizio. In particolare, la Direttiva Europea 2014/24/EU sui contratti pubblici [12] e i suoi recepimenti a livello nazionale hanno spinto verso l'adozione di strumenti di modellazione informativa, richiedendo anche l'attivazione di procedure di confronto di scenari progettuali alternativi, in relazione al miglior rapporto tra costi e benefici. In particolare, sul tema energetico, la Direttiva Europea 2010/31/EU [13] sulle prestazioni degli edifici ha introdotto il quadro metodologico cost-optimal, per la valutazione comparata degli interventi di riqualificazione, basata su una procedura di ottimizzazione multicriteriale, che considera costi di esercizio e fabbisogni energetici nell'orizzonte del ciclo di vita.

Al fine di fornire una risposta alle esigenze appena descritte, in coerenza con il quadro normativo comunitario e nazionale, si propone la definizione di uno strumento di supporto alla decisione, da utilizzarsi nell'ambito degli interventi volti al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici esistenti, integrato con la base di dati spaziale sul patrimonio costruito. In questo modo, si sfruttano le informazioni già raccolte e organizzate, grazie alla messa a sistema della procedura cost-optimal in un contesto di modellazione informativa gestita per mezzo di database.

Il sistema così definito permette di condurre simulazioni preliminari su grandi insiemi di alternative progettuali, al fine di comprendere quali siano, a livello strategico, i benefici ed i costi di ciascuno scenario trasformativo. Come risultato dell'analisi, il processo restituisce il posizionamento di tutte le soluzioni nei confronti dei criteri selezionati e individua il set delle strategie ottimali. In questo modo, non si arriva alla determinazione univoca della migliore alternativa ma, al contrario, si predispongono uno spazio di dialogo, che i soggetti coinvolti a vario titolo nel processo edilizio possono arricchire sulla base di ulteriori ragionamenti di carattere quantitativo o qualitativo, al fine di raggiungere una decisione sugli scenari da indagare ad un livello di dettaglio superiore e, in seguito, da implementare nei progetti.

2. Ambito di applicazione

Nell'Energy Efficiency Plan del 2011 [14], la Commissione Europea afferma che il più grande potenziale di risparmio energetico a livello comunitario risiede negli edifici. In particolare, il consumo energetico per il riscaldamento e il raffrescamento degli spazi chiusi rappresentava nel 2012 il 51% del fabbisogno europeo senza una prospettiva concreta di miglioramento [15]. Di questo, il 45% era imputabile al settore residenziale, il 37% all'industria e il 18% al terziario (Fig. 1). Scomponendo ulteriormente i dati si può affermare che, della quantità di energia totale spesa nel condizionamento a livello europeo, il 51% riguardava il riscaldamento e il 2% il raffrescamento degli ambienti [16] (Fig. 2), nonostante il peso secondo contributo risulti in costante aumento, anche a causa del fenomeno di riscaldamento globale, a cui si sta assistendo con preoccupazione crescente a partire dalla metà degli anni '70. Ad aggravare la situazione, si constata che, dell'energia necessaria, solo il 18% proveniva da fonti di tipo rinnovabile, a fronte del 75% derivante da combustibili fossili (il rimanente 7% è da imputarsi all'impiego di energia nucleare), dato che trova conferma se si prende visione delle statistiche europee di consumo energetico per vettore, che evidenziano la persistenza della dipendenza dalle fonti energetiche di tipo fossile, pur rilevando un aumento lento ma costante dell'impiego di fonti rinnovabili [17].

In questo quadro generale, risulta significativo affermare che gli edifici sono responsabili di grandi consumi energetici non in modo inevitabile, ma principalmente a causa della scarsa qualità di costruzione e della vetustà degli impianti tecnici, questione fortemente correlata all'età media dell'edificato e alla lentezza registrata nel tasso di rinnovamento degli stessi. Secondo il rapporto "Europe's buildings under the microscope", pubblicato nel 2011 dal BPIE (Buildings Performance Institute Europe) [18], in un'analisi riferita agli edifici residenziali, una percentuale che supera il 30% del numero totale di costruzioni è stata realizzata prima del 1960 (Fig. 3), in un'epoca in cui non vi era ancora nessuna riflessione sul contenimento dei consumi energetici. A prova di ciò, lo stesso documento mette in esplicita relazione, per la tipologia edilizia della casa unifamiliare, il periodo di costruzione con le performance energetiche, rappresentando per alcuni paesi campione il mutamento del fabbisogno annuale per il riscaldamento, del valore medio di trasmittanza termica delle chiusure verticali e del livello di tenuta all'aria nel corso del '900. I grafici risultanti dimostrano un inequivocabile miglioramento nel tempo del comportamento energetico su tutti i fronti di indagine, imputabile ad una crescente sensibilità sul tema accompagnata da un importante sviluppo tecnologico rivolto nella stessa direzione.

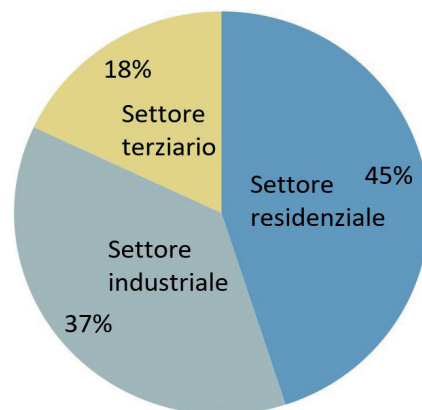


Fig. 1. Settori responsabili dell'uso di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, rielaborazione da [16].

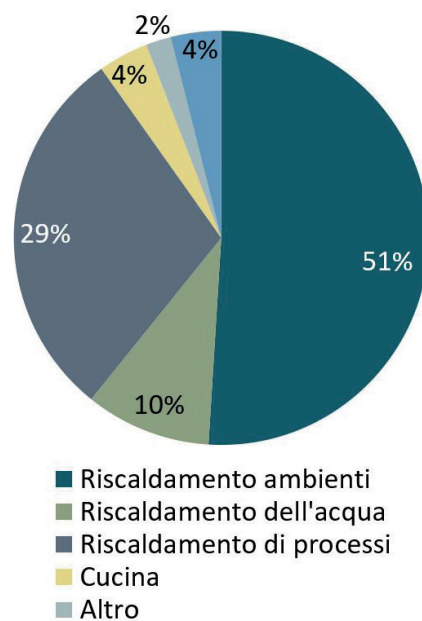
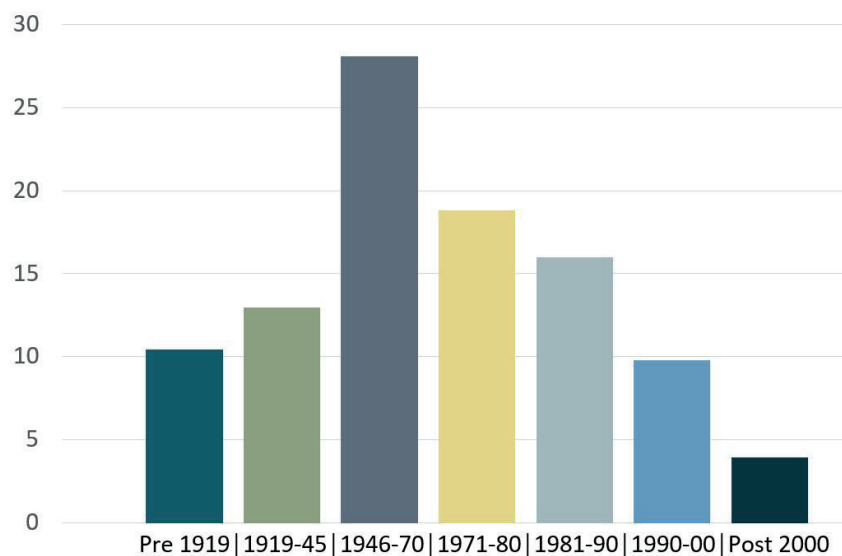


Fig. 2. Scomposizione del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento dell'Unione Europea nel 2012, rielaborazione da [15].

Fig. 3. Distribuzione percentuale di edifici esistenti in Europa per epoca di costruzione, rielaborazione da [18].



Un ragionamento analogo è ripetibile per il caso degli edifici non residenziali [19], anche se, in generale, l'acquisizione di dati statistici risulta più difficoltosa.

In definitiva, è dimostrato che il forte impatto energetico che caratterizza il settore delle costruzioni, non è di natura intrinseca, e pertanto impossibile o difficile da abbattere, ma, al contrario, risulta legato ad un'obsolescenza tecnologica, e presenta perciò ampi margini di miglioramento. Le tecniche e tecnologie odierne ci permettono, infatti, di progettare edifici nZEB (nearly Zero Energy Buildings) in tutto il territorio dell'Unione Europea, senza che i fattori climatici costituiscano un limite determinante [20], tanto che le direttive comunitarie indicano l'obbligo di raggiungere tale livello prestazionale per tutte le nuove costruzioni a partire dal 2021 (dal 2019 per gli edifici pubblici) [21].

Tuttavia, è ampiamente condiviso che, per promuovere uno scenario efficace e sostenibile di rinnovamento del panorama costruito, le operazioni di demolizione e ricostruzione risultano complessivamente più onerose di quelle di riqualificazione dell'esistente [22]. Per questo motivo, in un contesto come quello europeo, caratterizzato da un numero elevato di edifici sottoutilizzati, è necessario far convergere gli sforzi sul tema della riqualificazione energetica dell'ambiente costruito.

Per quanto riguarda gli edifici esistenti, la Commissione Europea raccomanda un'azione di rinnovamento profondo che coinvolga almeno il 2% della superficie costruita [23], rendendo però obbligatorio il raggiungimento dell'obiettivo solo per gli edifici pubblici che, in virtù del ricoprimento di un ruolo esemplare, devono garantire un tasso di rigenerazione pari ad almeno il 3% della superficie esistente [24].

Numerosi studi dimostrano che edifici soggetti ad azioni di profondo rinnovamento possono raggiungere alti livelli di

performance, paragonabili a quelli delle nuove costruzioni e allineati con i requisiti degli nZEB [25, 26, 27] e alcune ricerche dimostrano la fattibilità perfino nel caso di edifici storici [28, 29]. In questo scenario, infatti, gli edifici storici rappresentano il limite di applicabilità delle strategie per la riqualificazione energetica. Risulta infatti chiaro che non per tutti i manufatti esistenti il contenimento dei consumi può essere considerato un'asse di sviluppo prioritario. Gli edifici storici, e in particolare quelli sottoposti a vincoli di tipo diretto, sono parte integrante del patrimonio culturale Europeo e, attraverso la loro sostanza fisica, si fanno portatori di valori e tradizioni che testimoniano la storia dei popoli che li hanno costruiti e utilizzati. Gli interventi su questa categoria di beni sono estremamente delicati e vanno progettati con l'obiettivo primario di conservare e trasmettere i valori ad essi connessi. Si vedrà in seguito come questo possa essere tutt'altro che in contrasto con il tema del miglioramento energetico.

Prendendo in considerazione il contesto italiano, il quadro europeo viene pressoché confermato: l'energia totale è utilizzata per il 22% dall'industria, per il 30% dai trasporti, per il 29% dal settore residenziale e per il 16% nell'ambito dei servizi, ribadendo una forte impronta delle costruzioni sul bilancio totale [17] (Fig. 4).

Nel 2012, il 53% dell'energia totale in uso nel paese era destinato ai processi di condizionamento, di cui il 21% veniva prodotto a partire da fonti rinnovabili. Le incidenze parziali per uso finale indicavano che il 55% veniva utilizzato per il riscaldamento degli ambienti e il 5% per il raffrescamento [16], porzione sensatamente più alta rispetto alla media europea.

In relazione all'età media del parco edilizio italiano, i dati ISTAT (istituto Nazionale di statistica) relativi al censimento del 2011 per il settore residenziale [30] riportano che il 25,9% degli edifici è stato costruito prima del 1945, il 60,2% tra il 1946 e il 1990 e il restante 13,9% dopo il 1991 (Fig. 5). Il prospetto riporta anche un indicatore sul tasso di edifici "in pessimo stato di conservazione", registrando un'incidenza media di poco superiore all'8% tra le costruzioni antecedenti al 1945, che scende rapidamente all'1% nella fascia 1946-1990 e si annulla per le costruzioni realizzate nell'ultimo trentennio (0.17%). Il quadro statistico nazionale risulta quindi allineato con quello europeo, confermando l'applicabilità delle misure di riqualificazione energetica di cui si è trattato a livello comunitario.

2.1. Gli edifici pubblici

Secondo dati statistici del 2010, in Europa il 12% dell'edificato è di proprietà pubblica [31] e la sua gestione e manutenzione risulta particolarmente onerosa per le amministrazioni a causa della

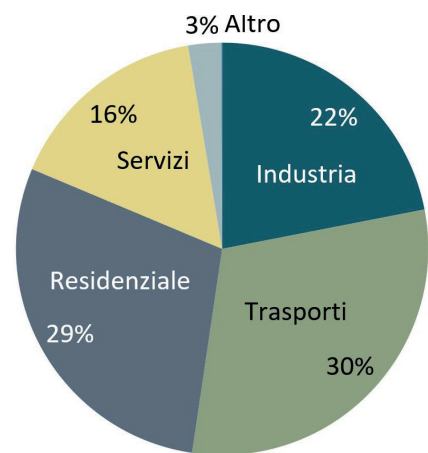


Fig. 4. Ripartizione percentuale degli usi finali di energia registrati in Italia nel 2017, rielaborazione da [17].

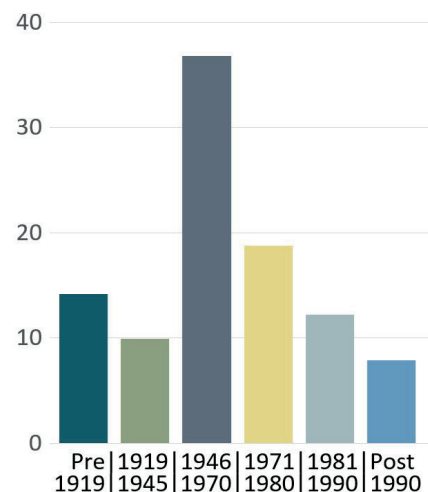


Fig. 5. Distribuzione percentuale di edifici esistenti in Italia per epoca di costruzione, rielaborazione da [30].

forte presenza di fabbricati costruiti prima degli anni '70 [32], e quindi non rispondenti alle leggi fondamentali sulle prestazioni degli edifici, che nei decenni successivi hanno definito standard di comportamento in relazione a differenti ambiti disciplinari.

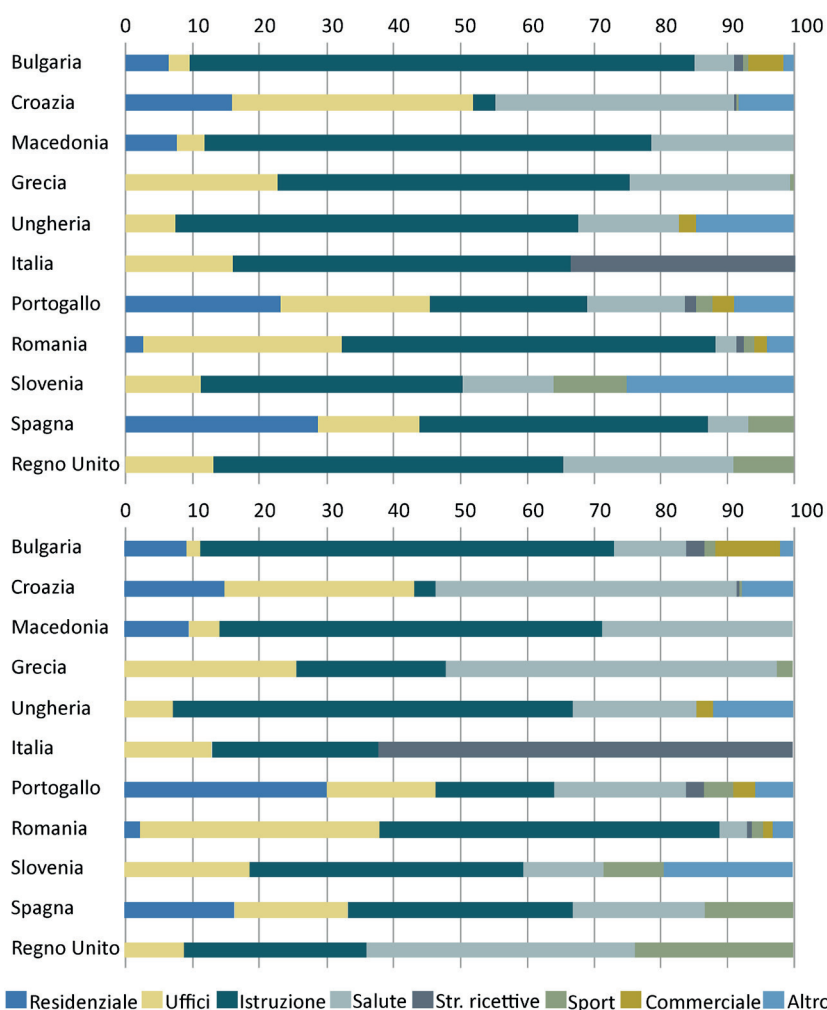
Alla luce di questi dati, il miglioramento delle performance del patrimonio edilizio pubblico si trova oggi fra le priorità delle politiche per la crescita sostenibile dell'Unione Europea, che incoraggia l'attivazione di un processo di riqualificazione proprio a partire da questi beni, affidandogli un ruolo primario all'interno del suo quadro di sviluppo e imponendo un tasso di rinnovamento annuo superiore a quello previsto per l'edilizia privata. L'articolo 5 della Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) [24], uno dei testi normativi fondamentali per la disciplina energetica applicata agli edifici, dispone infatti che il 3% dell'area totale di pavimento di edifici riscaldato o raffrescati, che siano posseduti o occupati dalle istituzioni centrali, debba essere rinnovata annualmente, con l'obiettivo di raggiungere almeno i requisiti minimi di prestazione energetica, definiti secondo le disposizioni vigenti.

In riferimento a ciò, va sottolineato che gli edifici pubblici sono spazi di riferimento per la collettività, e per questo sono chiamati a farsi testimoni di una cultura attenta alla sostenibilità e dell'opportunità di puntare al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici nuovi ed esistenti [33]. In questo panorama, alle amministrazioni è richiesto di agire attraverso approcci fortemente multidisciplinari, capaci di definire processi virtuosi perseguendo il pubblico interesse in linea con i principi di efficacia ed efficienza.

In aggiunta, poiché l'elevata età media del costruito comporta un'importante presenza di edifici storici marcati da vincoli che ne tutelano il sistema identitario, si introduce un ulteriore grado di complessità, andando a costituire un problema che vede contrapporsi tensioni volte alla conservazione ad altre indirizzate alla trasformazione. Su questo frangente, nonostante il quadro normativo preveda la possibilità di attivare deroghe ai requisiti minimi, qualora il rispetto degli stessi implichi alterazioni inaccettabili, è importante orientarsi verso un approccio che veda nel contenimento dei consumi energetici un'opportunità di valorizzazione del patrimonio culturale e non un motivo di perdita [34], nell'idea di inserire i beni architettonici in un processo di sviluppo che consideri la sostenibilità nella sua accezione più completa, includendo obiettivi ambientali, sociali ed economici.

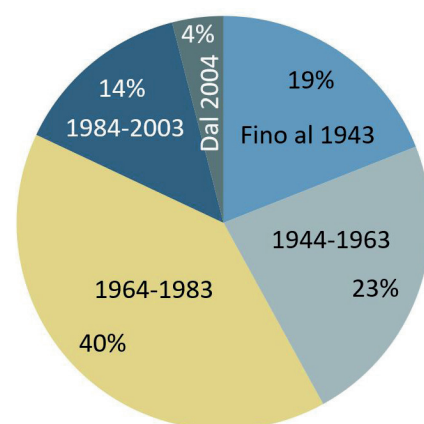
2.1.1. L'edilizia universitaria

Nella fase iniziale di indagine, il progetto europeo RePublic_ZEB ha confezionato un interessante report sul comportamento energetico degli edifici pubblici negli 11 paesi partecipanti



(Bulgaria, Croazia, Grecia, Ungheria, Italia, Portogallo, Romania, Slovenia, Spagna, Macedonia e Regno Unito) [35]. Il quadro che ne emerge mette in luce che, fra tutte le categorie di edifici pubblici, quella destinata all'educazione (comprendendo asili, scuole e università) risulta particolarmente incidente, sia per quanto riguarda le dimensioni (Fig. 6), che in relazione ai fabbisogni energetici (Fig. 7). In particolare, in Italia, appartengono a questa classe circa 52'000 edifici, con un'area totale di pavimento che supera i 73 milioni di m² e costituisce quasi il 2% della superficie costruita non residenziale. In relazione all'età gli edifici scolastici, poi, si conferma la situazione già vista a livello generale, con il 42% degli edifici costruiti prima del 1963 (Fig. 8).

Tuttavia, l'attenzione che si vuole qui riservare a tale categoria di edifici, non è associata tanto al loro impatto energetico, quanto più all'interessante complessità che ne determina le traiettorie di sviluppo. L'analisi delle caratteristiche peculiari dell'edilizia universitaria e le dinamiche connesse ad eventuali azioni



trasformative sono state ampiamente analizzate ed esplicitate dal Prof. Morandotti [36]. Di seguito, si riporta una sintesi del suo ragionamento, che costituisce una premessa essenziale per il presente lavoro di ricerca.

Il patrimonio edilizio universitario costituisce un campo di prova estremamente stimolante per i processi di decision-making volti al miglioramento delle prestazioni degli edifici esistenti, che ben si presta alla sperimentazione e alla validazione di metodologie di tipo predittivo. L'edilizia universitaria, infatti, è chiamata a soddisfare un sistema di requisiti estremamente complesso, che vede coinvolte destinazioni d'uso e classi di utenza anche molto diverse fra loro. Ciò assume un ulteriore significato quando si considerano le università storiche, che si sono sviluppate nei secoli di pari passo con le città che le ospitano, formando con esse un legame indissolubile. Queste sono generalmente associate ad asset immobiliari di grande varietà, comprendenti costruzioni che fanno parte del patrimonio storico-architettonico insieme ad altre all'avanguardia in relazione alla forma architettonica e ai profili prestazionali.

Nel corso del loro ciclo di vita, gli edifici universitari sono soggetti a pressioni trasformative sia interne che esterne, che possono presentarsi anche in contrasto tra loro, le quali possono essere sintetizzate in due espressioni prevalenti. Da una parte esiste una spinta che si genera dall'interazione degli utenti con gli edifici. Questa ha a che fare direttamente con il tema della gestione funzionale dei luoghi, i cui obiettivi sono la razionalizzazione, l'adeguamento, la sicurezza e la fruibilità degli spazi, che si esplicano in termini sia legislativi che prestazionali, al fine di adeguarsi ai mutamenti delle esigenze della ricerca e della didattica contemporanea. Si pensi, ad esempio, al bisogno di rendere tutti gli spazi accessibili alle persone con disabilità o alla necessità di dotare aule e spazi di lavoro di prese di corrente per l'utilizzo di computer, fino alle esigenze specifiche e uniche che possono caratterizzare i laboratori sperimentali.

Contemporaneamente, quegli stessi edifici, a cui si richiede di essere versatili nell'erogazione di servizi sempre più particolari, sono chiamati a mantenere intatti i loro caratteri identitari come parte della storia e della tradizione dei relativi contesti urbani e sociali, oltre che come poli attrattivi per una fruizione turistica delle città, riportando così in primo piano le esigenze dettate dalla conservazione della materia come portatrice di un sistema di valori in cui la comunità accademica e quella cittadina si riconoscono.

Questo quadro di riferimento, declinato nel contesto pubblico, genera una dinamica complessa e sfidante finalizzata alla prioritizzazione degli obiettivi in un'ottica di sviluppo sostenibile. Sebbene in questa sede si valuti primariamente l'aspetto energetico della gestione del costruito, occorre sottolineare

che l'analisi delle tematiche da cui partire per un progetto di riqualificazione è notevolmente più ampia e una strategia efficace dovrebbe tenere in considerazione uno spettro tematico integrato, capace di inquadrare gli edifici universitari almeno sotto quattro punti di vista [37]:

- Come beni culturali, in quanto spesse volte si tratta di edifici di riconosciuto valore storico-architettonico, edificati all'interno dei centri storici delle città;
- Come risorse di tipo sociale, poiché sono di luoghi all'interno dei quali la comunità accademica vive e lavora e il cui stato di conservazione può influire fortemente sulla percezione degli utenti;
- Come asset immobiliari, in relazione alla grande quantità di risorse legate alla loro gestione e alla relativa capitalizzazione;
- Come valori di tipo scientifico, nel senso che possono costituire un proficuo campo di sperimentazione per la ricerca applicata sui patrimoni immobiliari.

2.2. Sintesi del quadro normativo

La crescente sensibilità sul tema del risparmio energetico ha generato un quadro normativo articolato, che, a partire dagli anni '90, si è progressivamente arricchito con l'obiettivo generale di identificare i requisiti minimi di prestazione per gli edifici nuovi ed esistenti, di promuovere scenari di sviluppo sostenibili e di definire gli strumenti con cui misurare l'efficacia.

A livello comunitario, il Parlamento Europeo si è espresso per la prima volta sul tema del comportamento energetico degli edifici nel 2002 con la Direttiva 2002/91/CE [38], nota come Energy Performance Building Directive (EPBD). Nel testo si invitano gli stati membri ad adottare una metodologia di calcolo per il rendimento degli edifici, a fissare requisiti minimi per i nuovi edifici e le ristrutturazioni, a redigere attestati di certificazione energetica da allegare obbligatoriamente agli atti di compravendita o locazione e a introdurre le ispezioni periodiche dei sistemi impiantistici. Già in questa prima stesura compare la possibilità di agire in deroga per quanto riguarda i requisiti minimi di prestazione nel caso di "edifici e monumenti ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro speciale valore architettonico o storico, nel caso in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto" [38].

Successivamente, la Direttiva 2009/28/CE [39] ha trattato la promozione dell'uso di fonti energetiche di tipo rinnovabile, richiedendo agli stati membri di fissare dei livelli minimi di energia da fonti rinnovabili da imporre a tutti gli edifici nuovi e a quelli esistenti sottoposti a ristrutturazioni rilevanti.

Un anno dopo, la Direttiva 2010/31/UE [13] ha riformulato

la versione del 2002, introducendo un quadro metodologico comune per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici e rimodulando i requisiti minimi per le costruzioni nuove ed esistenti. Come ulteriore elemento di novità, si introduce il concetto di "Edifici a energia quasi zero" (nZEB – nearly Zero Energy Buildings) e l'attestato di certificazione energetica si modifica nell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), comprendente anche una sezione di raccomandazioni per il miglioramento ottimale delle prestazioni in considerazione dei costi. La Direttiva stabilisce poi un quadro metodologico comparativo per calcolare livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica: la metodologia cost-optimal. Ad integrazione del testo normativo, nel 2012 viene emesso il Regolamento Delegato n. 244 [38], che ne esplicita le modalità di calcolo.

Nello stesso anno, la Direttiva 2012/27/EU [24] sull'efficienza energetica si è pronunciata in relazione agli obiettivi dell'Agenda 2020, per favorirne l'attuazione. In particolare, l'attenzione viene rivolta al tema della riqualificazione energetica del parco edilizio esistente, ponendo in prima linea il caso degli edifici pubblici, incaricati a svolgere un ruolo esemplare nei processi di rinnovamento urbano.

Nel 2018, la Direttiva 2018/844 [21] integra e modifica le precedenti 2010/31/UE e 2012/27/UE, alterando singoli articoli in modo puntuale. Si tratta un testo di carattere strategico, che incita ad accelerare il processo già iniziato per il raggiungimento dei nuovi obiettivi comunitari di sviluppo sostenibile.

In ultima, la Direttiva 2018/2002/UE [41] affronta il tema della contabilizzazione e della ripartizione dei costi per il riscaldamento, il raffrescamento e la produzione di acqua calda per uso domestico.

2.2.1. Le leggi nazionali

A livello nazionale, i temi del comportamento energetico degli edifici e dell'efficienza energetica vengono introdotti dal legislatore in un periodo precedente a quello dell'emissione delle Direttive europee.

Il primo intervento, infatti, avviene con la legge 30 aprile 1976, n. 373 [42] recante "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici", nella quale si discute del dimensionamento degli impianti per il riscaldamento degli ambienti e dell'isolamento termico degli edifici, definendo i primi requisiti minimi di prestazione degli involucri, con riferimento alla sola stagione di riscaldamento. La legge introduce le prime grandezze di controllo tra le quali: il coefficiente di dispersione volumico e il rapporto tra superficie disperdente e volume riscaldato.

Successivamente, la legge 10/1991 [43] costituisce la prima norma quadro per la progettazione e la gestione del sistema edificio-impianto. Tra le altre cose, il testo rende obbligatoria l'emissione di alcuni documenti per il controllo delle performance energetiche degli edifici: la relazione tecnica che certifica il rispetto delle prescrizioni normative, in vigore ancora oggi, e la certificazione energetica, da allegare nei casi di compravendita o di locazione. Per quanto concerne il secondo documento, un decreto applicativo mai emanato ne ha rallentato l'attuazione fino all'intervento delle Direttive europee.

Nel 1993, il decreto attuativo n. 412/1993 [44] introduce i criteri per il calcolo del FEN (Fabbisogno Energetico Normalizzato) e del rendimento globale stagionale dell'impianto termico. Per entrambi vengono fissati dei limiti, determinati anche in funzione delle nuove classificazioni delle zone climatiche basate sui gradi giorno e delle categorie di destinazione d'uso degli edifici.

Dopo un lungo silenzio sul tema, i riferimenti normativi successivi si applicano in attuazione delle Direttive europee, emanate a partire dal 2002. In particolare, il Decreto legislativo n. 192/2005 [45] definisce il metodo di calcolo per la certificazione energetica degli edifici e fissa i primi requisiti minimi di prestazione. Il testo rimodula anche le grandezze di riferimento per il calcolo dei livelli minimi prestazionali, introducendo: la trasmittanza termica dell'involucro edilizio, il rendimento globale medio stagionale dell'impianto e il fabbisogno annuo di energia primaria.

Il Decreto legislativo n. 311/2006 [47], prosegue ad integrazione del testo precedente e definisce gli step temporali per l'adozione del certificato di prestazione energetica. Si fa inoltre riferimento per la prima volta all'obbligatorietà di includere l'uso di fonti di energia di tipo rinnovabile per le nuove costruzioni. La procedura di attuazione della Direttiva 2002/91/CE [38] si chiude nel 2009, con Decreto Presidenziale n. 59, che definisce i requisiti minimi del sistema edificio-impianto per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria e introduce la valutazione delle prestazioni per il raffrescamento. Il Decreto individua infine le norme tecniche di riferimento per il calcolo nella serie UNI TS 11300.

Il Decreto Ministeriale n. 158/2009 [47] compie un passo ulteriore, definendo le Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici. In particolare, nell'Allegato A viene riportato il modello di certificato, caratterizzato dalla divisione in classi dalla A alla G, individuate in funzione dell'indice di prestazione energetica globale, sebbene i limiti di legge sussistano ancora solo per il caso del condizionamento invernale. Successivamente, il Decreto Legislativo n. 28/2011 [48] si occupa della promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili, ridefinendo le frazioni obbligatorie di impiego nel caso di nuove costruzioni e di ristrutturazioni rilevanti.

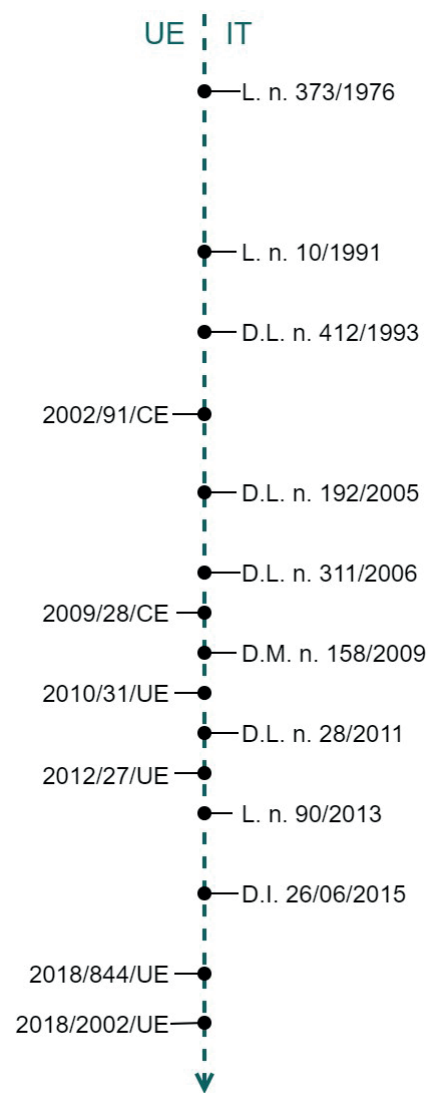


Fig. 9. Rappresentazione dell'evoluzione normativa comunitaria e italiana sul piano temporale.

In seguito all'emanazione della Direttiva 2010/31/UE [13], la Legge n. 90/2013 [49] modifica l'attestato di certificazione energetica (ACE) nell'Attestato di Prestazione Energetica (APE). L'obbligo di allegare il nuovo documento viene esteso nel caso di qualsiasi atto che coinvolga la compravendita, la locazione o la cessione di un immobile.

Infine, nel 2015 vengono emanati tre decreti attuativi della Legge n. 90/2013, tutti individuabili come Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 [50], che costituiscono lo status normativo attuale. Il primo riguarda l'adeguamento delle Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici e definisce un nuovo modello per l'Attestato di Prestazione Energetica che si basa su un edificio di riferimento, anziché su valori tabellari. Il secondo indica le prescrizioni aggiornate dei requisiti minimi prestazionali per gli involucri edilizi e gli impianti tecnici e le relative modalità di verifica. L'ultimo, invece, tratta dell'aggiornamento della Relazione Tecnica. In generale, cambiano gli ambiti di applicazione classificando gli interventi tra: nuova costruzione, a cui sono assimilati la demolizione e ricostruzione e l'ampliamento e la sopraelevazione, ristrutturazioni importanti, suddivise in primo e secondo livello, e riqualificazione energetica, che include interventi sull'involucro e/o sul sistema impiantistico. In funzione delle suddette classi di interventi, vanno eseguite verifiche differenziate.

2.3. Progetti di ricerca europei

I forti input provenienti dal contesto socioeconomico e dalle disposizioni normative hanno portato negli ultimi anni allo sviluppo di numerosi progetti europei che riguardano le prestazioni energetiche dell'ambiente costruito e le opportunità derivanti da un loro miglioramento. Le ricerche di livello comunitario hanno declinato i temi in diversi modi, concentrando tendenzialmente l'attenzione su categorie di beni omogenei (edifici residenziali, edifici storici, edifici pubblici). Gli studi individuati sono accomunati dal fatto di trattare gli argomenti dal punto di vista del gestore pubblico e possono essere divisi in due gruppi in relazione alla loro finalità: quelli indirizzati alla comprensione delle caratteristiche energetiche degli edifici esistenti e quelli rivolti a definire una metodologia per l'identificazione delle misure di riqualificazione più efficaci. Nel primo caso, i risultati portano all'identificazione di tipologie ricorrenti di edifici che siano uniformi per quanto riguarda le proprietà termiche e i fabbisogni energetici, con lo scopo di definire abachi di riferimento da applicarsi per analisi preliminari su vasta scala. Le ricerche della seconda categoria, invece, tendono a definire metodologie di supporto alla decisione ripetibili, che si basano generalmente su metodi matematici.

Di seguito si riporta un panorama degli studi ritenuti più influenti al fine della trattazione della presente tesi.

DATAMINE [51]

Titolo: DATAMINE - Collecting data from energy certification to monitor performance indicators for new and existing buildings

Identificativo: EISAV/EIE/05/097/2005

Durata: 2006-2008

Sito web: www.meteo.noa.gr/datamine

Il progetto DATAMINE (Fig. 10) si propone di utilizzare i Certificati di Prestazione Energetica (EPC) come fonti informative al fine di monitorare lo stato del parco edilizio europeo e le iniziative di riqualificazione. Inoltre, l'analisi delle procedure di certificazione e della loro formattazione differenziata vuole essere una spinta per lo sviluppo di un sistema di monitoraggio armonizzato. Lo studio ha coinvolto 12 paesi dell'Unione Europea e complessivamente 18 000 edifici. Ciascuno stato membro ha potuto lavorare in autonomia, raccogliendo i dati in funzione delle tipologie di certificati diffuse nei rispettivi territori. Una fase finale di analisi e di confronto ha permesso l'armonizzazione e la comparazione dei risultati ottenuti.

L'esito di maggiore rilevanza riguarda la creazione di una banca dati che raccoglie tutte le informazioni contenute nei Certificati e che permette di sviluppare analisi di tipo statistico su un campione di ampiezza significativa. Il data set analizzato nel complesso risulta composto prevalentemente da edifici di tipo residenziale costruiti a partire dal 1960. Le statistiche estratte riguardano le caratteristiche termiche e le dimensioni degli elementi dell'involucro edilizio, il fabbisogno di riscaldamento per unità di area e le tipologie di vettori energetici impiegati. Globalmente, si assiste a un miglioramento degli indicatori con il procedere del tempo, verso edifici più recenti, mentre si osserva

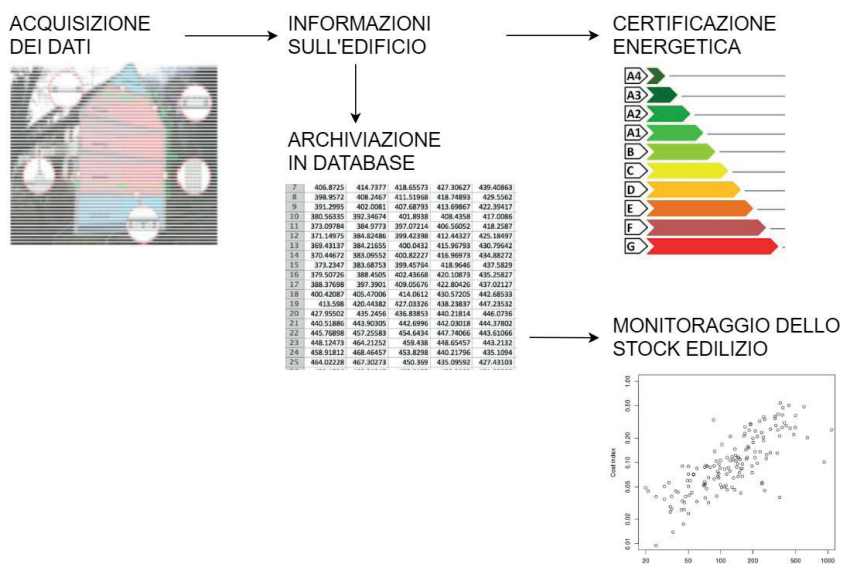


Fig. 10. Schema concettuale del progetto DATAMINE. Rielaborazione da [51].

che i valori medi degli stessi sono strettamente legati alle nazioni e quindi difficilmente generalizzabili su scala comunitaria. In seguito alla chiusura del finanziamento il database non è stato più aggiornato, riducendo la grande potenzialità del progetto.

TABULA [52]

Titolo: TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment

Identificativo: IEE/08/495/SI2.528393

Durata: 2009-2012

Sito web: www.episcope.eu

TABULA si occupa della categorizzazione energetica di edifici, raggruppati per nazione, periodo di costruzione e tipologia, concentrandosi in particolare sul caso degli edifici residenziali. L'analisi è estesa a 15 paesi dell'Unione Europea e suddivide il parco edilizio residenziale in 4 tipologie (casa singola, a schiera, edificio plurifamiliare e blocco di appartamenti) e 8 periodi di costruzione, che possono variare in funzione della nazione considerata, in considerazione delle specificità dello sviluppo edilizio e tecnologico di ciascun paese (Fig. 11).

Lo studio include una valutazione delle caratteristiche di edifici e impianti di ciascuna categoria al fine di definire modelli rappresentativi dell'ambiente costruito europeo. Il lavoro sull'identificazione degli edifici di riferimento risulta di enorme interesse, e costituisce un solido punto di partenza per numerose ricerche a venire. Oltre alla categorizzazione dell'esistente, il progetto propone la simulazione di scenari di miglioramento energetico a due livelli di efficienza, che coinvolgono sia l'involucro edilizio che le componenti impiantistiche.

I risultati sono consultabili mediante uno strumento di sintesi accessibile online, che permette di interrogare i dati ed eseguire le simulazioni.

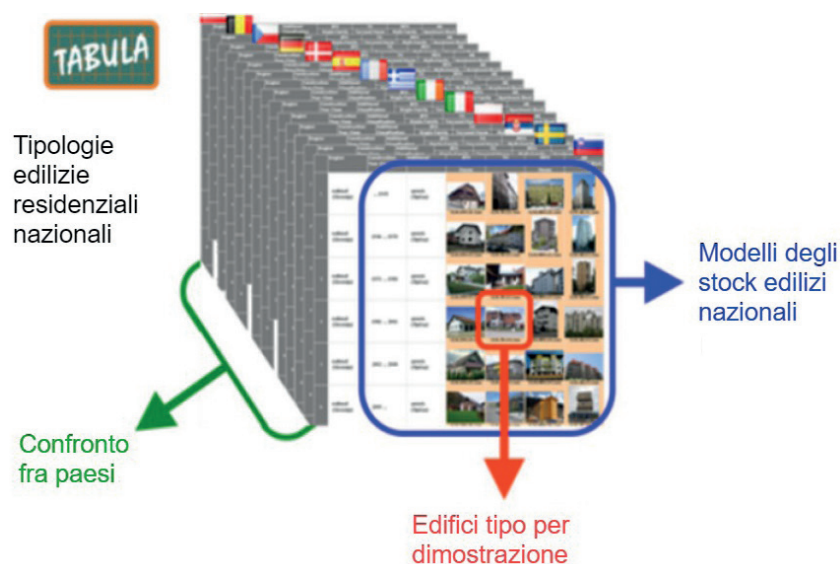


Fig. 11. Progetto TABULA. Matrice delle tipologie edilizie del contesto italiano per l'area climatica media. Gli archetipi degli edifici tipo sono illustrati attraverso immagini reali [52].

EPISCOPE [53]

Titolo: EPISCOPE - Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks

Identificativo: IEE/12/695

Durata: 2013-2016

Sito web: www.episcope.eu

In seguito al grande successo del progetto TABULA, EPISCOPE ne rappresenta la continuazione. Il progetto, infatti, riprende la classificazione precedentemente teorizzata ed arricchisce la matrice aggiungendo 6 nuovi paesi e nuovi livelli di riqualificazione energetica, definiti incorporando le strategie per il raggiungimento di edifici nZEB.

3ENCULT [54]

Titolo: 3ENCULT - Efficient Energy for EU Cultural Heritage

Identificativo: 260162

Durata: 2010-2014

Sito web: www.3encult.eu

Il progetto si concentra sul miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici storici, visto come potenziale punto di contatto tra il tema della conservazione e quello della protezione dell'ambiente.

Gli obiettivi principali includono lo sviluppo di strategie passive per il contenimento dei consumi, la realizzazione di strumenti di diagnosi e monitoraggio per la verifica delle soluzioni proposte e la definizione di un processo metodologico per l'integrazione di valori culturali ed energetici negli interventi sul costruito storico, da integrare nel contesto normativo comunitario. Otto casi studio di natura eterogenea sono presi in considerazione per testare e dimostrare l'applicabilità in diversi contesti urbani che caratterizzano il territorio europeo.

La metodologia è basata sull'Environmental Impact Assessment (EIA), uno strumento introdotto con la Direttiva del Consiglio delle Comunità Europee nel 1985 con lo scopo di verificare l'impatto ambientale di alcune categorie di progetti, costituito da sei fasi: programmazione mediante l'analisi del quadro esigenziale, valutazione preliminare delle performance energetiche e dei valori culturali, proposta di interventi di miglioramento energetico, processo multidisciplinare di valutazione, progetto degli interventi, valutazione e monitoraggio dei risultati.

Per gli scopi di questa tesi, risulta di particolare interesse la rassegna di soluzioni per il miglioramento degli edifici storici, esposta nel deliverable "D3.6 - Technical guidance on energy efficient renovation of historic buildings" 55]. Nel documento, ogni tipologia di intervento (considerando sia azioni sull'involucro che sulle componenti impiantistiche) è classificata

in funzione di tre parametri qualitativi che possono assumere un valore compreso fra 0 e 5: Fattibilità in edifici storici, Costo e Miglioramento dell'efficienza energetica (Tab. 1).

EFFESUS [56]

Titolo: EFFESUS - Energy Efficiency for EU Historic Districts' Sustainability

Identificativo: 314678

Durata: 2012-2016

Sito web: www.fffesus.eu

Il progetto EFFESUS si occupa di investigare l'efficienza energetica di quartieri storici e di proporre soluzioni integrate per il suo miglioramento, valutate attraverso uno strumento di supporto alla decisione basato su un set di indicatori di impatto. Il fulcro del sistema risiede nell'idea di incrociare le informazioni sul patrimonio costruito esistente con le caratteristiche di possibili strategie di intervento, identificando i livelli di compatibilità e le opportunità di efficientamento derivanti.

Lo studio parte dallo sviluppo di una piattaforma, costituita da un modello informativo urbano, sulla quale possa avvenire lo scambio di informazioni necessario a supportare la fase decisoria. I requisiti individuati (possibilità di navigazione tridimensionale, definizione a più scale di rappresentazione, inclusione di informazioni di tipo geometrico e semantico, interoperabilità con altri formati e con strumenti per l'analisi dell'informazione) vengono soddisfatti grazie all'utilizzo del modello dati CityGML. I modelli tridimensionali che possono popolare la piattaforma sono caratterizzati da bassi livelli di definizione, coerentemente con la scala a cui si propongono di agire, e le associazioni tra le geometrie degli edifici e le informazioni tecniche avvengono mediante un sistema di categorizzazione che permette di individuare tipologie di costruzioni ricorrenti a cui collegare dati medi.

In parallelo, si sviluppa un catalogo di soluzioni tecniche per la riqualificazione energetica di edifici storici. Per ciascuna voce vengono indicate le caratteristiche termiche, le voci unitarie di costo e gli impatti previsti sul bene. I livelli di compatibilità fra gli edifici costituenti lo stock edilizio considerato e le misure di riqualificazione energetica sono stimati attraverso una matrice che pone in correlazione il possibile impatto delle soluzioni progettuali con il grado di interesse storico-architettonico dei beni coinvolti (Tab. 2). Il ranking delle soluzioni viene calcolato secondo il metodo AHP (analytic hierarchy process), con la possibilità da parte dell'utente di modificare il peso relativo dei criteri di valutazione fra: comfort termico, qualità dell'aria, risparmio energetico, costo, impatto dello scenario.

Nonostante la grande validità del progetto, la piattaforma non ha mai raggiunto un livello di maturità tale da essere resa disponibile al pubblico attraverso il web.

	USE IN HISTORIC BUILDINGS	COST	ENERGY EFFICIENCY
CONSERVATION			
Passive heating and cooling solutions	4	2	3
GENERATION			
Traditional Gas Boiler	4	0	2
Condensing Boiler	4	1	3
Wood Fired Biomass Boiler	1	3	2
Ground Heat Pump (closed circuit)	2	4	5
Ground Heat Pump (open circuit)	3	4	5
Heat Pumps (air condensed)	4	2	3
Heat Pumps (water condensed)	3	3	4
Heat Pumps (absorption)	3	3	3
Micro Co-generation (CHP)	2	4	4
VRF System	5	1	2
VENTILATION			
Mixed ventilation systems	4	1	3
All air systems	2	2	2
Natural ventilation	4	0	3
EMISSION			
Radiators	4	0	1
Radiant floor	2	1	5
Chilled Ceiling	3	2	5
Chilled beams	3	3	4
Fan coil	4	1	3
Constant air volume	2	2	2
Variable air volume (VAV)	2	3	3
floor supply system (FSS)	2	2	3
CONTROL			
Control systems	3	1	2
RENEWABLE ENERGY			
Solar Photovoltaic	3	2	3
Wind power	1	2	2
Hydropower	2	3	3
Semitransparent solar thermal panels	2	2	3
a-Si semitransparent PV Panel	3	2	3
a-Si semitransparent double-glazed isolating PV window	3	2	3
Solar Thermal Panels	2	2	3

Tab. 1. Valutazione dei possibili interventi di miglioramento energetico. Rielaborazione da [55].

Tab. 2. Tabella comparativa fra impatti trasformativi e valore dei beni coinvolti. Rielaborazione da [56].

		IMPACT LEVEL				
		0_No impact	1_No significant impact on heritage significance	2_Minor impact on heritage significance	3_Major impact on heritage significance	4_Outstanding impact on heritage significance
HERITAGE SIGNIFICANCE	0_Neutral or negative	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
	1_Minor significance	Acceptable	Acceptable	Likely to be acceptable	Likely to be acceptable	Potentially acceptable
	2_Major significance	Acceptable	Likely to be acceptable	Potentially acceptable	Potentially acceptable	Not acceptable
	3_Outstanding significance	Acceptable	Likely to be acceptable	Potentially acceptable	Not acceptable	Not acceptable
	4_Exceptionally outstanding significance	Likely to be acceptable	Potentially acceptable	Not acceptable	Not acceptable	Not acceptable

EFFESUS costituisce certamente uno dei principali riferimenti della presente ricerca, che ne ricalca alcuni assunti metodologici, pur giungendo allo sviluppo di soluzioni operative differenziate.

FASUDIR [57]

Titolo: FASUDIR – Friendly and Affordable Sustainable Urban District retrofitting

Identificativo: 609222

Durata: 2013-2016

Sito web: www.fasudir.eu

FASUDIR costituisce la continuazione del progetto EFFESUS, affrontando il tema della riqualificazione energetica alla scala urbana e focalizzando l'attenzione sulla definizione di nuovi modelli di business e di strumenti di supporto finanziario rivolti ai decisori politici e tecnici, per l'attuazione degli obiettivi comunitari fissati per il 2020 e 2050. L'azione principale ridefinisce lo strumento di supporto alla decisione già presentato, arricchendolo per aiutare nell'identificazione di scenari di riqualificazione che migliorino la sostenibilità dell'intero distretto.

La realizzazione parte dalla redazione di una lista di indicatori chiave di performance (KPI - Key Performance Indicator) per la valutazione delle soluzioni progettuali, che vengono separati per la scala urbana e quella edile e categorizzati in funzione dei tre pilastri della sostenibilità.

Lo strumento informatico è supportato da un visualizzatore tridimensionale basato su CityGML e PostgreSQL, pensato per

facilitare l'interazione di diversi portatori di interessi su un'unica piattaforma.

Il sistema è stato testato su tre casi studio collocati in Germania, Spagna e Ungheria e diversificati per quanto concerne il periodo di costruzione, lo stato di conservazione e il valore culturale associato.

RePublic_ZEB [58]

Titolo: RePublic_ZEB - Refurbishment of the Public building stock towards nZEB

Identificativo: IEE-13-886

Durata: 2014-2016

Sito web: www.republiczeb.org

Republic_ZEB (Fig. 12) nasce in risposta alle disposizioni normative comunitarie che enfatizzano il ruolo esemplare degli edifici pubblici, richiamando gli obiettivi energetici degli edifici a energia quasi zero. Il progetto si concentra sul caso degli edifici esistenti, con l'obiettivo di proporre soluzioni tecniche di riqualificazione energetica ottimali sotto il profilo dei costi.

Lo studio coinvolge 11 paesi e prende in considerazione edifici pubblici caratterizzati da varie destinazioni d'uso: residenze, edifici per l'istruzione, edifici sanitari, uffici amministrativi, edifici ricettivi, strutture per lo sport ed edifici commerciale.

L'attività di ricerca parte da una valutazione sullo stato di fatto atta a realizzare un quadro conoscitivo sul comportamento energetico dell'edificato pubblico nei paesi coinvolti. Le attività preliminari sull'analisi del patrimonio pubblico esistente risultano estremamente interessanti, in quanto aiutano a riempire un vuoto di conoscenza, proponendo analisi e statistiche che fino allo stato attuale si limitavano all'analisi di edifici residenziali.

A partire da queste, vengono delineate delle classi di edifici di riferimento, utili per realizzare simulazioni preliminari di interventi progettuali, volte a identificare scenari ottimali.

In parallelo, ciascuno stato partecipante stila una lista di misure di

Tipologia: Edificio a uffici

Paese: Italia

Anno di costruzione: 1960

Superficie condizionata: 1421 mq

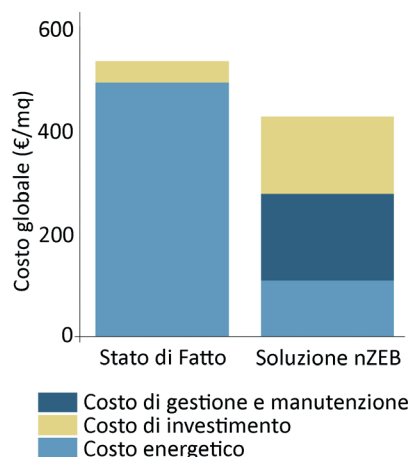
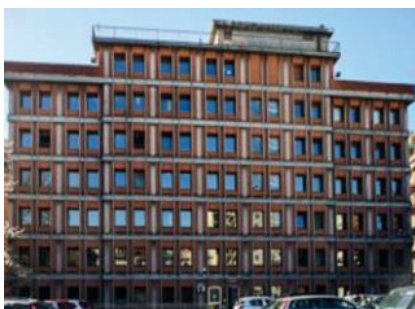


Fig. 12. Progetto RePublic_ZEB. Uno degli esempi applicativi di analisi energetica effettuata prima e dopo le misure di riqualificazione. Rielaborazione da [58].

riqualificazione energetica applicabili al proprio parco edilizio, di cui vengono indicati performance e costi unitari per tre possibili livelli di intervento. Una sintesi di tutte le misure considerate a livello nazionale costituisce parte del report finale, dove ciascuna misura è valutata in funzione del proprio impatto in termini di energia, ambiente, comfort, investimento, manutenzione e payback.

Dal punto di vista dello sviluppo teorico, le esperienze concrete sono sfruttate per il raggiungimento di una definizione comune del concetto di edificio nZEB da applicare al caso degli edifici pubblici su scala comunitaria.

BRITA in PuBs [59]

Titolo: BRITA in PuBs - Bringing Retrofit Innovation to Application in Public Buildings

Identificativo: 503135

Durata: 2004-2008

Sito web: www.brita-in-pubs.eu

Il progetto è finalizzato a far crescere la consapevolezza in relazione al consumo e alla gestione energetica degli edifici esistenti e alla valutazione di strategie innovative per la riqualificazione, di cui si vuole promuovere la diffusione nel mercato edilizio. L'oggetto principale su cui viene condotto lo studio è costituito da un set di 8 edifici pubblici eterogenei per distribuzione sul territorio e per destinazione d'uso. La scelta è legata alla volontà di coinvolgere classi di utenza altamente diversificate sotto il profilo delle età e delle condizioni sociali, nell'idea che gli edifici pubblici possano essere sfruttati come mezzi per migliorare la consapevolezza e la sensibilità della popolazione nei confronti delle tematiche del risparmio energetico.

A questo scopo, lo studio si articola in tre parti. Innanzitutto, sugli edifici selezionati vengono progettate, realizzate e monitorate soluzioni di riqualificazione energetica esemplari. Successivamente, un pacchetto di lavoro prevede attività di ricerca in ambito socioeconomico sugli strumenti economici e finanziari capaci di sostenere la rigenerazione dell'edificato pubblico. Infine, una fase di disseminazione include la formazione dei soggetti coinvolti nelle fasi decisorie e progettuali dei processi di riqualificazione energetica e la pubblicazione di linee guida dirette a diversi profili di utenza.

Per quanto riguarda la prima fase di lavoro, gli otto edifici campione sono stati analizzati allo stato di fatto, sulla base del quale è stato redatto un progetto di miglioramento delle prestazioni energetiche. L'obiettivo delle riqualificazioni energetiche, che hanno coinvolto sia gli involucri edilizi che i sistemi impiantistici, era una riduzione del 50% del fabbisogno di energia primaria e della percentuale di persone insoddisfatte del comfort interno. Tutti i progetti sono stati realizzati e monitorati

per un periodo di un anno. I risultati sono piuttosto eterogenei, ma raggiungono un fattore di riduzione medio superiore al 50%, associato a tempi di ritorno degli investimenti che si attestano sotto i due anni.

3. La riqualificazione energetica del costruito

Poiché è impossibile determinare uno scenario univoco indiscriminatamente attuabile e preferibile in tutti gli scenari che si possono presentare, risulta fondamentale considerare tutti gli strumenti esistenti nel bacino degli interventi edilizi ed ad operare sull'esistente attraverso valutazioni che agiscono "caso per caso" [60]. Tuttavia, noto il contesto nazionale e sovranazionale in relazione alle prestazioni effettive e a quelle attese in relazione al patrimonio costruito, la strategia più responsabile che è possibile intraprendere appare quella della riqualificazione energetica degli edifici esistenti. In riferimento a ciò, innanzitutto va sottolineato che, sebbene le nuove costruzioni raggiungano facilmente alti livelli di prestazione e garantiscano condizioni di comfort elevate, nell'ambito della riqualificazione (energetica e non) l'ipotesi della demolizione e ricostruzione risulta spesso inattuabile, in funzione di regimi vincolistici applicati su edifici o contesti urbani specifici. Tuttavia, anche dove sarebbe ammissibile pensare a una sostituzione integrale di fabbricati esistenti, è possibile dimostrare che le azioni di riqualificazione comportano una serie di benefici sotto il profilo ambientale, sociale ed economico.

In termini di sostenibilità del ciclo di vita, si può affermare che gli interventi di miglioramento delle prestazioni di strutture ed involucri esistenti risultano preferibili rispetto agli scenari di demolizione e ricostruzione [22], in funzione di una valutazione sull'energia incorporata dagli elementi tecnici che costituiscono gli edifici esistenti. Infatti, scomponendo gli organismi edilizi nelle loro componenti tecnologiche si può notare che la maggior parte dell'energia incorporata risiede negli elementi strutturali [61] (Fig. 13), ossia quelle parti che con maggiore probabilità verrebbero conservate nell'ambito di un processo di riqualificazione del fabbricato. Tale affermazione è avvalorata da diversi studi scientifici e trova ulteriore riscontro in analisi applicative, che individuano negli scenari di recupero degli edifici esistenti una minor quantità di energia incorporata rispetto a quelli alternativi di nuova costruzione, anche in considerazione della somma dei contributi di conduzione e manutenzione per cicli a medio-lungo termine [62].

Oltre all'istanza legata alla sostenibilità, vi sono poi altre ragioni per preferire una riqualificazione ad una sostituzione dell'esistente. In una serie di pubblicazioni sull'argomento [63, 64], la studiosa di politiche sociali Anne Power ha approfondito il tema degli impatti che i casi di riqualificazione e di demolizione provocano sulle comunità locali e individua alcune motivazioni per protendere per la prima. I ragionamenti, sebbene applicati al caso dell'edilizia residenziale, si ritengono estensibili a tutti i casi

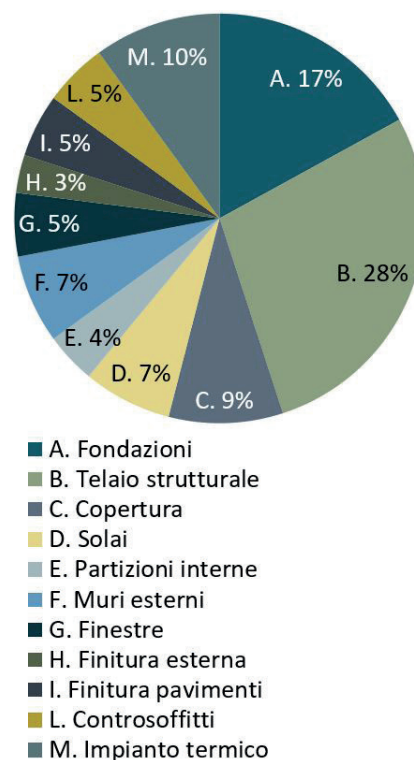


Fig. 13. Energia grigia mediamente incorporata nelle classi di elementi tecnici che compongono l'edificio, rielaborazione da [61].

di interventi sul costruito:

- Le operazioni di riqualificazione non mutano l'assetto dei contesti urbani, mantenendo l'equilibrio nei confronti delle infrastrutture e dei servizi;
- Il rinnovamento di un edificio all'interno di un quartiere è un segnale positivo per la comunità, in quanto comunica la presenza di un interesse all'investimento sul contesto locale, generando un circolo virtuoso;
- Aggiornare è più rapido che demolire e ricostruire e si attua attraverso lavorazioni più semplici. Per questi motivi, causa meno rischi e disagi agli abitanti delle zone interessate dagli interventi.

Infine, anche dal punto di vista economico appare generalmente vantaggioso intraprendere operazioni di riqualificazione, riutilizzando le risorse già presenti negli organismi esistenti. In scenari di trasformazione che non implicino alterazioni determinanti dello stato di fatto, infatti, questa possibilità comporta minori costi diretti. Vi è poi un'ulteriore riduzione dei costi determinata dalla contrazione della durata dei lavori e, di conseguenza, dall'accorciamento dei tempi degli strumenti finanziari associati [65]. Più nello specifico, uno studio effettuato su quattro edifici residenziali multi-familiari costruiti in Svezia in momenti diversi del XX sec., dimostra che i costi calcolati sul ciclo di vita di casi di demolizione e ricostruzione appaiono maggiori se confrontati con quelli di rinnovamenti energetici dimensionati per portare allo stesso risultato sotto il profilo dei consumi, anche considerando i maggiori guadagni che derivano dalla locazione o dalla vendita dei nuovi fabbricati [66] (Fig. 14).

In definitiva, la scelta di procedere al rinnovamento del panorama costruito esistente per mezzo di interventi di riqualificazione energetica è ampiamente auspicabile e comporta numerosi benefici [67]. Tuttavia, le operazioni di riqualificazione energetica sono solitamente caratterizzate da una notevole complessità in quanto, andando ad agire direttamente su manufatti che sono già parte integrante del patrimonio costruito, nella valutazione

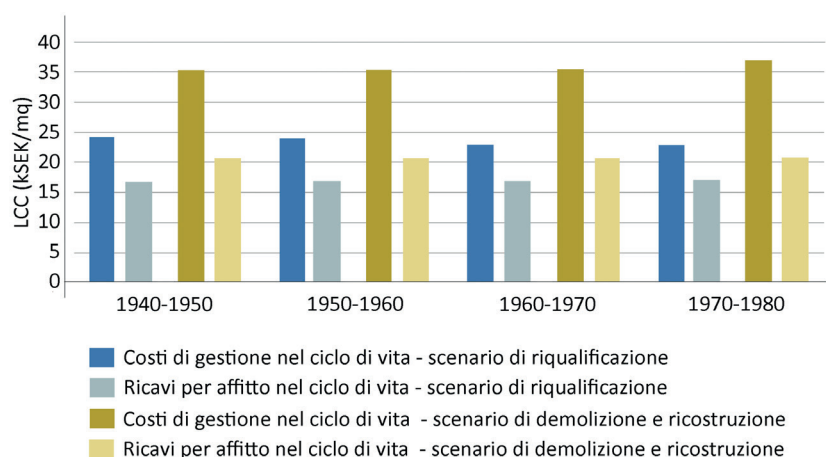


Fig. 14. Confronto fra costi del ciclo di vita corrispondenti a quattro scenari di riqualificazione e di ricostruzione di edifici residenziali svedesi appartenenti a diversi periodi del XX sec. [66].

degli scenari si intrecciano questioni afferenti a numerosi domini di conoscenza. Le scelte finali sulle strategie da adottare dipendono, infatti, da un insieme di fattori, che includono aspetti ambientali, tecnologici, sociali ed economici [68].

La riqualificazione degli edifici in un'ottica di sostenibilità è dunque un problema multidisciplinare, i cui fondamenti sono stati identificati, fra gli altri, da Sitar et al. [69], che ne individua i seguenti obiettivi:

- Miglioramento delle condizioni di vita in relazione alle esigenze presenti degli utenti di uno spazio e in previsione di quelle future;
- Riduzione del consumo di energia e delle spese per la gestione degli edifici;
- Utilizzo di materiali provenienti da filiere sostenibili e di fonti di energia di tipo rinnovabile;
- Fattibilità economica e finanziaria degli interventi.

Allo stesso modo, in particolare, per il caso degli edifici pubblici, le finalità degli interventi di rigenerazione vengono esplicitate da Mickaityte et al. [70], che enfatizza il ruolo sociale della riqualificazione dei beni pubblici:

- Risparmio energetico;
- Miglioramento delle condizioni di comfort;
- Realizzazione di ambienti di lavoro sani e sicuri;
- Estensione dell'aspettativa di vita dell'edificio;
- Convenienza economica;
- Protezione dell'ambiente.

Tali considerazioni fanno percepire come la riqualificazione energetica degli edifici sia una parte all'interno del più ampio scenario di sviluppo sostenibile, che risulta attualmente il modello di crescita maggiormente desiderabile nel contesto europeo. Per questo motivo, il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici va considerato nell'ambito di qualsiasi intervento sull'esistente, pur senza dimenticare che un effettivo programma di sviluppo non si può limitare all'obiettivo della riduzione dei consumi, ma deve essere relazionato a un sistema più complesso di ambiti disciplinari, che comprenda misure ambientali, economiche e sociali.

Negli ultimi decenni, numerose ricerche hanno trattato il tema della riqualificazione energetica degli edifici, proponendo studi che si sono occupati dell'individuazione di soluzioni di miglioramento delle performance per diverse tipologie di edifici, talvolta estendendo le valutazioni nell'ottica del ciclo di vita.

In generale, è possibile raggruppare le ricerche condotte in due categorie, differenziate in funzione della scala di indagine a cui operano. Da un lato si rilevano pubblicazioni per lo più di carattere applicativo che trattano del progetto e del monitoraggio di casi studio reali singoli o, più spesso, aggregati.

Lo scopo finale è quello di identificare buone pratiche di progetto [71, 72] o di evidenziare il rapporto fra le prestazioni correnti degli edifici esistenti, definite sulla base dei dati allo stato di fatto, quelle attese, calcolate in fase di progetto, e quelle effettive dopo gli interventi, che vengono invece misurate nella fase di conduzione degli edifici [73, 74].

Fra quelli consultati, l'esempio più interessante è rappresentato dal progetto europeo BRITA in PuBs, che ha studiato il funzionamento di 8 edifici pubblici eterogeneamente distribuiti sul territorio europeo, seguendo tutti gli stadi del processo di riqualificazione energetica, il cui obiettivo ambizioso era il dimezzamento del fabbisogno di energia primaria. I report pubblicati comprendono gli audit energetici in riferimento allo stato di fatto, le simulazioni effettuate sugli scenari di trasformazione e i risultati di una campagna di monitoraggio acquisiti nell'arco di un anno. La ricerca, svolta complessivamente fra il 2004 e il 2008, consente di misurare i possibili esiti di diverse tipologie di interventi di rigenerazione degli edifici esistenti e di comprenderne le dinamiche sia sotto il profilo energetico che sotto quello economico [75]. Nonostante la validità dello studio, va sottolineato che ad oggi lo si può considerare un riferimento solo in relazione alla metodologia utilizzata, in quanto i risultati, specialmente di tipo economico, non possono più essere ritenuti attuali a una distanza più che decennale.

In questa prima tipologia di studi, spesso vengono affiancati agli strumenti di analisi e simulazione energetica diverse metodologie di valutazione delle prestazioni che si basano sulla comparazione diretta dei parametri propri della fisica tecnica ambientale, sulla costruzione di indicatori sintetici di performance [76, 77] o sull'applicazione di funzioni matematiche quali analisi costi-benefici [78, 79] o valutazioni multicriteriali [80, 81]. L'implementazione di metodi matematici più elaborati consente, inoltre, la costruzione di sistemi di supporto alla decisione per la valutazione di scenari alternativi di progetto, di cui si avrà modo di parlare più avanti.

In opposizione, si trovano ricerche che indagano ad una scala diversa, con lo scopo di individuare soluzioni progettuali ripetibili da poter applicare in contesti territoriali uniformi a beni immobili simili. In questo caso, l'approccio è più teorico e volto all'identificazione di interventi strategici capaci di supportare la definizione di politiche di sviluppo. A questo scopo, le analisi strettamente energetiche si fanno meno dettagliate e non si arriva a studiare la progettazione di dettaglio degli interventi proposti. Tuttavia, un grande sforzo viene attuato al fine di identificare classi di edifici omogenei in relazione a un certo numero di parametri (fra cui il contesto territoriale, il periodo di costruzione e la destinazione d'uso) a cui poter applicare le medesime soluzioni tecniche di riqualificazione energetica.

Di tale gruppo fa certamente parte il progetto europeo TABULA, che si è occupato di categorizzare gli edifici residenziali ricorrenti nei paesi dell'Unione Europea, classificandoli per periodo di costruzione e tipologia edilizia. Una volta identificate le classi di costruzioni omogenee, lo studio ha fornito i dati sul consumo medio effettivo di ciascuna tipologia e ha modellizzato alcuni scenari di miglioramento energetico. Il database risultante è di immensa utilità e costituisce tutt'ora un riferimento certo per lo sviluppo di ricerche su tematiche affini.

Poiché queste tipologie di studi possono fare uso di grandi moli di dati la cui collocazione spaziale è sparsa in un contesto territoriale, spesso si riscontra l'utilizzo o lo sviluppo abbinato di tecnologie informatiche di tipo GIS, che fungono da basi di dati centrali sulle quali vengono eseguiti i calcoli e le simulazioni di scenari di intervento [82]. Inoltre, anche in questo caso, l'applicazione di metodi matematici a diversi gradi di complessità consente di confrontare in modo semi-automatizzato le alternative in relazione ad una pluralità di criteri.

Un esempio di successo in questo frangente è il progetto europeo EFFESUS, il quale, attraverso la sperimentazione su sette nuclei urbani distribuiti in Europa, ha messo a punto uno strumento informatico web-based per il supporto alla decisione nell'ambito della riqualificazione energetica dei centri cittadini, con particolare attenzione al caso degli agglomerati storici. Il sistema funziona sulla base della classificazione degli edifici appartenenti a un determinato contesto in classi omogenee, alle quali vengono applicate combinazioni di soluzioni di riqualificazione energetica ritenute ammissibili in relazione al sistema di classificazione. La base di dati sulla quale vengono eseguite le simulazioni è costituita da modelli GIS tridimensionali, che permettono la consultazione dei dati input e dei risultati delle analisi mediante un'interfaccia navigabile. Il ranking delle soluzioni può avvenire per mezzo dei metodi di valutazione multicriteriali AHP (Analytic hierarchy process) o SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) sulla base di un set di cinque criteri valutati in parte quantitativamente e in parte qualitativamente.

3.1. Gli interventi di miglioramento energetico

In un organismo edilizio, le operazioni di riqualificazione energetica possono essere ricondotte a due macrocategorie, a seconda che impattino sull'involucro edilizio o sul sistema impiantistico. Dal punto di vista della letteratura scientifica, i due gruppi di strategie sono stati spesso trattati separatamente, probabilmente in virtù del fatto che afferiscono ad ambiti diversi, il primo più legato alle discipline dell'architettura tecnica, e quindi di competenza dei progettisti edili, e il secondo maggiormente

spostato verso la sfera dell'ingegneria industriale, che si è occupata della progettazione degli impianti tecnologici. Tuttavia, in anni recenti, si è consolidato un processo volto a superare questa dualità, nella logica di promuovere una progettazione integrata che guardi alle prestazioni del sistema edificio-impianto, considerato nel suo insieme [83].

Tale indirizzo risulta di particolare importanza nel caso della riqualificazione energetica degli edifici esistenti, laddove uno sforzo congiunto capace di agire su entrambe le componenti dell'organismo edilizio è in grado di dare i migliori risultati in termini di ottimizzazione dei consumi in funzione dei costi [84].

Nel presente studio, volendo privilegiare una lettura tecnologica dell'edificio, le misure di riqualificazione energetica sono state classificate sulla base di una scomposizione strutturata degli organismi edilizi. In particolare, si è seguito nell'approfondimento lo schema riportato in Fig. 15.

Gli interventi considerati sono stati raccolti e armonizzati a partire da un insieme eterogeneo di fonti, tra cui:

- Testi di riferimento sul tema della riqualificazione energetica degli edifici;
- Approfondimenti tecnologici sui materiali e sugli interventi per la riqualificazione dell'esistente svolti mediante ricerche specifiche e pubblicati per mezzo di letteratura scientifica;
- Linee guida e raccomandazioni sul miglioramento energetico del panorama costruito diffuse da enti e agenzie attive a livello comunitario;
- Report di sintesi e relazioni finali di progetti di ricerca Europei

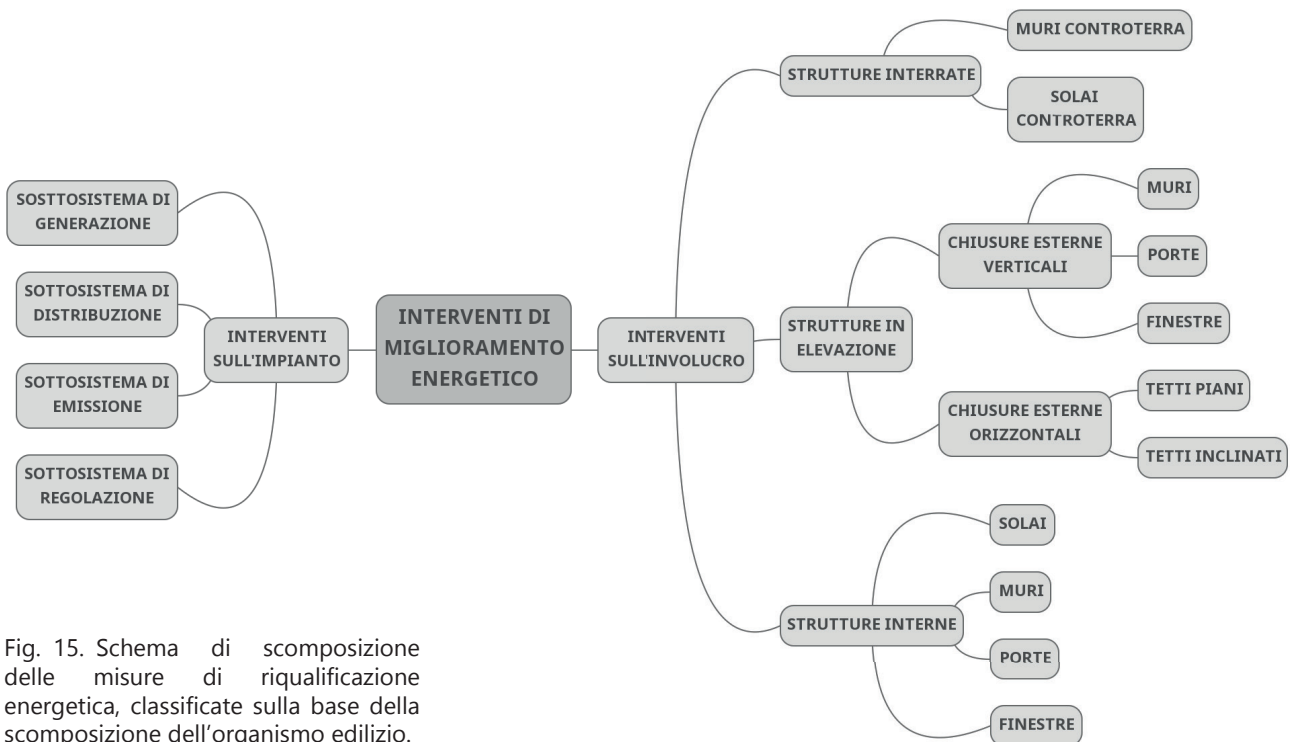


Fig. 15. Schema di scomposizione delle misure di riqualificazione energetica, classificate sulla base della scomposizione dell'organismo edilizio.

sulle ricerche svolte nell'ambito dell'incremento delle prestazioni energetiche dell'edificato.

3.1.1. Gli interventi sull'involucro

L'involucro termico è lo strato di separazione fra gli ambienti condizionati e quelli non condizionati. In particolare, per ambienti condizionati si intendono quelli le cui caratteristiche termoigrometriche sono governate da uno o più sistemi impiantistici, mentre sotto la dicitura di ambienti non condizionati si raccolgono tutti quegli spazi, interni o esterni, per i quali non esiste alcun mezzo di controllo delle condizioni ambientali. In questo senso, dunque, l'involucro termico è il luogo che viene attraversato dai flussi di calore pertinenti il volume considerato. Prima della definizione delle possibili strategie di riqualificazione energetica, risulta di fondamentale importanza individuare con chiarezza l'estensione e le caratteristiche dell'involucro termico. Tale componente, infatti, può non coincidere con l'involucro edilizio ed essere costituito anche da partizioni che separano ambienti interni mantenuti a condizioni termoigrometriche differenziate.

Nella stagione invernale, quando lo sforzo tecnologico è generalmente rivolto al riscaldamento dei locali, l'involucro edilizio è chiamato a limitare il più possibile i flussi termici uscenti, ovvero la fuoriuscita del calore che viene prodotto e distribuito all'interno dell'edificio. A questo scopo, occorre che gli elementi tecnici che lo costituiscono posseggano proprietà fisiche tali da ostacolare i flussi di calore, ossia che siano provvisti di strati o componenti termoisolanti. Questa capacità è misurata in prima battuta attraverso la trasmittanza termica (U [W/m^2K]), ossia quella grandezza fisica che quantifica la potenza termica scambiata per unità di superficie in presenza di una differenza di temperatura unitaria. Sebbene sia l'indice principale cui ci si riferisce per comprendere il comportamento di un componente edilizio in regime invernale, la trasmittanza termica è un parametro parziale, la cui lettura va sempre affiancata ad altre considerazioni, a maggior ragione nel caso di interventi sul costruito.

Come si è già avuto modo di evidenziare, nel contesto europeo buona parte del panorama costruito non presenta caratteristiche energetiche soddisfacenti e si distingue anzi per gli alti valori di trasmittanza associati alle componenti degli involucri edilizi [17]. Con l'obiettivo di riqualificare tali edifici, dunque, occorre innanzitutto adottare strategie per il miglioramento delle capacità isolanti degli involucri termici e quindi volte all'incremento delle trasmittanze degli elementi tecnici che li compongono.

In un'ottica rivolta il più possibile al recupero degli elementi tecnici esistenti, ciò significa incrementare le prestazioni dei componenti opachi aggiungendo strati costituiti da materiali con alte proprietà isolanti. Generalmente parlando, tali addizioni possono

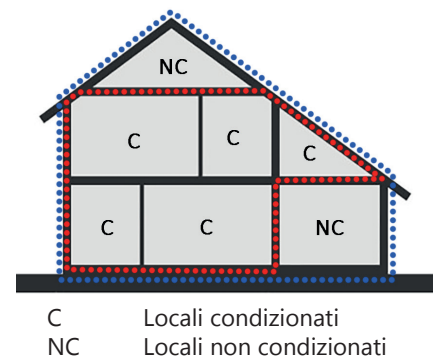


Fig. 16. Rappresentazione schematica del possibile disallineamento fra involucro edilizio (in blu) e involucro termico (in rosso).

operare in corrispondenza delle superfici di finitura interne o esterne di un componente (nel caso degli orizzontamenti, più propriamente, all'intradosso o all'estradosso) oppure, qualora siano presenti, sfruttando la presenza di intercapedini d'aria. Dal punto di vista del calcolo della trasmittanza, la prestazione dei pacchetti non cambia in funzione della posizione degli strati coibenti, tuttavia, implementando modelli più accurati è possibile notare che il comportamento globale si modifica, alterando le caratteristiche correlate all'inerzia termica delle strutture, come è possibile apprezzare in particolare se si osservano le grandezze che considerano l'andamento del tempo, come lo sfasamento termico (Φ [h]).

Allo stesso modo, il calcolo della trasmittanza non tiene conto dell'insieme di proprietà che caratterizzano i materiali coibenti utilizzati, ma solo della loro conducibilità termica (λ [W/mK]), posta in relazione allo spessore dello strato [m]. Tuttavia, allo stato attuale vi sono in commercio numerosissime tipologie di materiali isolanti, la cui classificazione passa primariamente in funzione dell'origine del materiale costituente, distinguendo fra isolanti naturali, sintetici e minerali. Oltre a queste classi, vi sono ulteriori possibilità, derivanti dallo sviluppo più recente di materiali innovativi, quali isolanti termoriflettenti, pannelli isolanti sottovuoto o materiali a cambiamento di fase [85]. A fronte di conducibilità termiche paragonabili, materiali di classi diverse possono restituire prestazioni molto eterogenee. Ciò è vero specialmente in relazione alla permeabilità al vapore, proprietà fondamentale per prevedere la compatibilità nel caso di applicazione di nuovi strati coibenti a strutture preesistenti. Un'altra considerazione importante sulla scelta dei materiali isolanti va, poi, fatta in funzione della sostenibilità, con particolare attenzione al tema del ciclo di vita.

Tenendo conto di ciò, fra i componenti opachi, le strutture verticali possono essere isolate mediante la costruzione di contropareti interne coibentate costruite a secco, l'applicazione di cappotti termici esterni, la realizzazione di strati di finitura micro-isolanti o l'insufflaggio di materiale isolante sciolto nello spessore di un'intercapedine d'aria, se presente. Nell'ipotesi di poter intervenire indifferentemente su qualsiasi superficie degli elementi tecnici coinvolti, ciascuna soluzione comporta sia vantaggi che problematiche. In generale, si può affermare che le lavorazioni rivolte verso l'interno sono di più semplice realizzazione, ma provocano una riduzione degli spazi abitabili e tendono a migliorare il comportamento dell'edificio solo a livello locale non concorrendo, ad esempio, alla soluzione dei ponti termici lineari. Al contrario, le strategie che prevedono la modifica degli esterni sono più complete, ma comportano alterazioni determinanti dei prospetti degli edifici coinvolti. In modo del tutto simile, le prestazioni energetiche delle chiusure orizzontali possono essere migliorate con azioni che prevedono

la coibentazione all'intradosso, attraverso il fissaggio di pannelli in materiale termoisolante, oppure all'estradosso, come la disposizione di un materiale coibente sotto lo strato di finitura oppure, nel caso di tetti piani, la realizzazione di massetti prodotti con miscele alleggerite che comprendono materiali isolanti sciolti. Nelle operazioni all'esterno delle strutture di copertura particolare attenzione va posta all'impermeabilizzazione degli stati isolanti e ai loro requisiti di resistenza meccanica, qualora sia necessario garantire l'accesso pedonale agli spazi superiori.

Per quanto riguarda gli elementi vetrati, generalmente si tratta delle parti meno prestanti di un involucro edilizio, associati a valori di trasmittanza molto elevati. Su questo fronte, l'avanzamento tecnologico ha apportato importanti miglioramenti, arrivando alla definizione di infissi con buone proprietà termiche, sebbene le trasmittanze rimangano di un ordine di grandezza inferiori rispetto a quelle dei componenti opachi. Tuttavia, va considerato che, nel bilancio invernale, le superfici vetrate non costituiscono solo un elemento disperdente, ma comportano anche guadagni energetici determinati dai carichi solari incidenti. Per la riqualificazione degli elementi vetrati, le strategie più diffuse prevedono la sostituzione integrale delle componenti finestrate, di parti di esse, o l'aggiunta di elementi per il miglioramento delle performance dei sistemi esistenti. Esempi di intervento sono la sostituzione della lastra vetrata con un sistema vetrocamera o l'apposizione sui vetri esistenti di pellicole trasparenti isolanti o basso-emissive. Nel caso degli infissi, gli interventi più invasivi risultano senza dubbio i più efficaci. Tuttavia, poiché la scelta da adottare può dipendere in modo determinante da valutazioni che hanno a che vedere con il valore storico degli elementi, e quindi con esigenze legate alla loro conservazione, ci si trova frequentemente ad escludere le strategie più performanti, in favore di interventi che comportano una minore alterazione dei componenti tecnologici originali.

In Tab. 4 si riporta l'elenco degli interventi di riqualificazione energetica che sono stati presi in considerazione nel presente studio, in coerenza con la scomposizione dell'organismo edilizio già presentata. A seguire, le schede dettagliate in cui si riporta un'analisi inerente ciascuna soluzione.

Tab. 3. Nelle pagine successive, elenco delle strategie di riqualificazione elementari considerate, suddivise per classi di elementi tecnici.

1		STRUTTURE INTERRATE
1.1	MURI CONTROTERRA	
Int.1	Isolamento interno mediante controparete coibentata	
Int.3	Isolamento dell'intercapedine per insufflaggio di materiale coibente	
1.2	SOLAI CONTROTERRA	
Int.9	Isolamento all'estradosso mediante pannelli di materiale coibente	
Int.10	Isolamento mediante realizzazione di massetto termico	
2		STRUTTURE IN ELEVAZIONE
2.1	CHIUSURE ESTERNE VERTICALI	
2.1.1	MURI ESTERNI	
Int.1	Isolamento interno mediante controparete coibentata	
Int.2	Isolamento esterno a cappotto	
Int.3	Isolamento dell'intercapedine per insufflaggio di materiale coibente	
Int.4	Applicazione di intonaco termico all'esterno delle pareti perimetrali	
2.1.2	PORTE ESTERNE	
Int.5	Sostituzione degli infissi con modelli più performanti	
2.1.3	FINESTRE ESTERNE	
Int.6	Applicazione di pellicole per l'incremento delle performance del vetro	
Int.7	Sostituzione della componente vetrata con sistema più performante	
Int.8	Sostituzione degli infissi con modelli più performanti	
2.2	CHIUSURE ESTERNE ORIZZONTALI	
2.2.1	TETTI PIANI	
Int.9	Isolamento all'estradosso mediante pannelli di materiale coibente	
Int.10	Isolamento mediante realizzazione di massetto termico	
Int.11	Isolamento all'intradosso mediante pannelli di materiale coibente	
2.2.2	TETTI INCLINATI	
Int.12	Isolamento all'estradosso mediante pannelli di materiale coibente	
Int.13	Isolamento all'intradosso mediante pannelli di materiale coibente	
3		STRUTTURE INTERNE
3.1	SOLAI INTERPIANO	
Int.9	Isolamento all'estradosso mediante pannelli di materiale coibente	
Int.10	Isolamento mediante realizzazione di massetto termico	
Int.11	Isolamento all'intradosso mediante pannelli di materiale coibente	
3.2	MURI INTERNI	
Int.1	Isolamento mediante controparete coibentata	
Int.3	Isolamento dell'intercapedine per insufflaggio di materiale coibente	
3.3	PORTE INTERNE	
Int.5	Sostituzione degli infissi con modelli più performanti	
3.4	FINESTRE INTERNE	
Int.6	Applicazione di pellicole per l'incremento delle performance del vetro	
Int.7	Sostituzione della componente vetrata con sistema più performante	
Int.8	Sostituzione degli infissi con modelli più performanti	

Tab. 4. Interventi di riqualificazione dell'involucro considerati nel presente studio.

ISOLAMENTO INTERNO MEDIANTE CONTROPARETE COIBENTATA

Descrizione

Si tratta di un intervento realizzato sul lato interno di una parete in corrispondenza dell'ambiente condizionato che si vuole isolare. Viene attuato preferibilmente a secco, attraverso la realizzazione di una controparete in cartongesso o gessofibra costruita in adiacenza al muro, la cui intercapedine viene sfruttata per l'introduzione di uno strato di materiale coibente, generalmente confezionato in pannelli rigidi o semi-rigidi per praticità di assemblaggio.

L'isolamento delle murature verso l'interno è applicabile nel caso in cui sia compatibile con le caratteristiche estetiche e tecnologiche delle finiture esistenti, sulle quali si pone in continuità. Tuttavia, la costruzione a secco comporta un basso livello di impatto, anche grazie alla reversibilità delle operazioni.

Per un risultato soddisfacente, occorre verificare la compatibilità dei materiali installati con il comportamento igrometrico dell'involucro, al fine di evitare il rischio di formazione di muffe e condense.

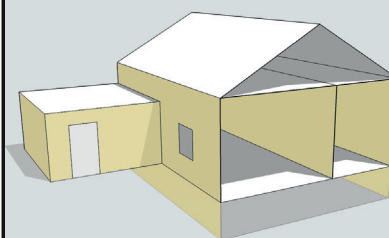
Vantaggi

- L'intervento non altera i prospetti esterni dei fabbricati;
- La realizzazione a secco costituisce una soluzione reversibile, che non apporta modifiche permanenti;
- Tempi e costi di realizzazione sono modesti;
- Migliora il comportamento di ponti termici presenti fra parete e serramento;
- La realizzazione di nuove contropareti può essere sfruttata per l'installazione di componenti impiantistiche;
- L'intervento può essere attuato in modo indipendente in ciascun locale o in modo dilazionato nel tempo.

Svantaggi

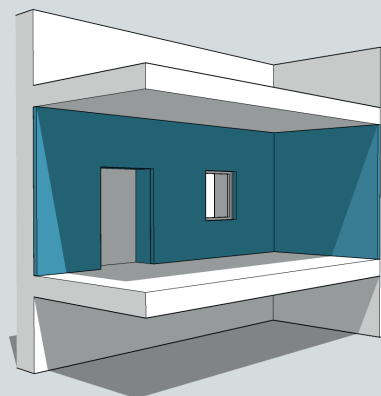
- In funzione dello spessore dello strato isolante installato, si riducono la superficie e il volume utile interno;
- Il rivestimento interno non garantisce la continuità dell'isolamento, in particolare in corrispondenza dei ponti termici fra strutture verticali ed orizzontali;
- L'intervento non permette di sfruttare la massa termica delle pareti, smorzando l'effetto dello sfasamento termico;
- Può risultare di difficile realizzazione in corrispondenza di applicazioni sulle pareti (quali terminali impiantistici).

Int.1

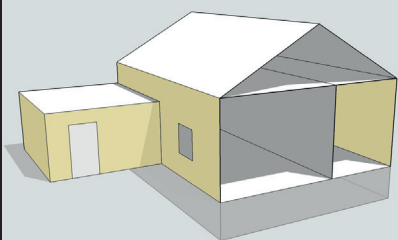


Classi di elementi tecnici

- 1.1 Muri contro terra
- 2.1.1 Muri esterni
- 3.2 Muri interni

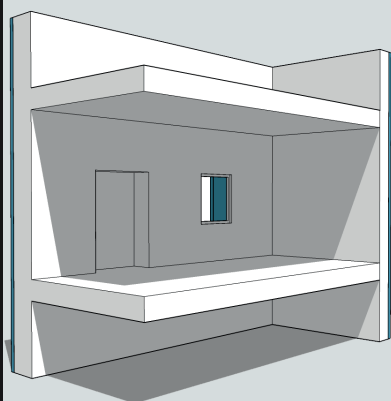


Int.2



Classi di elementi tecnici

2.1.1 Muri esterni



ISOLAMENTO ESTERNO A CAPPOTTO

Descrizione

L'isolamento a cappotto è un tipo di intervento estremamente diffuso per via della sua grande efficacia. Mediante la realizzazione di uno strato coibente continuo e uniforme che avvolge l'involucro edilizio esistente, infatti, si raggiunge un soddisfacente grado di miglioramento delle prestazioni energetiche, abbattendo le trasmittanze delle chiusure esterne verticali e risolvendo eventuali ponti termici. La messa in opera prevede solitamente il fissaggio meccanico di pannelli in materiale isolante direttamente sulle superfici esterne e la successiva ricostituzione della finitura attraverso rasatura armata e intonacatura.

L'alterazione irreversibile delle facciate esterne che si va a realizzare rende l'intervento di difficile applicazione a edifici storici o contesti vincolati.

La scelta dei materiali coibenti da applicare va sottoposta alla verifica del comportamento igrometrico del nuovo pacchetto di parete, specialmente in relazione alla permeabilità al vapore.

Vantaggi

- Si crea uno strato isolante continuo e uniforme che foderà le strutture esterne di chiusura e risolve eventuali ponti termici;
- L'intervento fornisce un'opportunità di riqualificazione dei prospetti;
- Trattandosi di una tecnologia consolidata, le caratteristiche di durabilità e gli effetti nel tempo sono noti;
- Il posizionamento sul lato esterno delle murature consente di sfruttare l'inerzia termica delle componenti massive

Svantaggi

- L'alterazione irreversibile dei prospetti lo rende inapplicabile in molti contesti;
- L'intervento richiede un cantiere complesso, che coinvolge tutto l'esterno dell'edificio e si sviluppa anche in altezza, generando la necessità dell'installazione di ponteggi;
- La realizzazione può diventare complessa in relazione a morfologie particolari, caratterizzate da numerosi oggetti e applicazioni sulle facciate;
- In funzione del tipo di materiali scelti, può venirsi a creare uno strato fragile verso l'esterno.

ISOLAMENTO DELL'INTERCAPEDINE PER INSUFFLAGGIO DI MATERIALE COIBENTE

Descrizione

Questa tipologia di intervento sfrutta la presenza di un'intercapedine non ventilata presente all'interno delle pareti perimetrali, condizione che si rileva frequente nell'edificio italiano costruito nel periodo 1960-1990. Il riempimento della camera d'aria avviene mediante insufflaggio di materiale isolante in forma sciolta o in schiuma, che può avvenire sia dall'interno che dall'esterno, attraverso fori appositamente predisposti.

L'isolamento delle intercapedini non altera nessuna superficie di finitura e si realizza in tempi brevi e condizioni di cantiere semplici. Tuttavia, la coibentazione che si viene a creare non è di tipo omogeneo, anche a causa della scarsa controllabilità dell'intervento. Per questo motivo, il riempimento delle intercapedini con materiale isolante non aiuta a correggere i ponti termici presenti e, anzi, ne può determinare di nuovi, aumentando il rischio locale di formazione di muffe e condense.

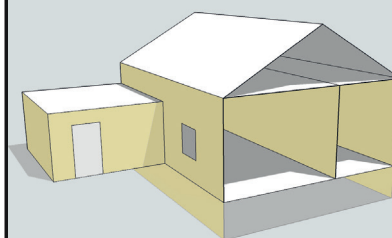
Vantaggi

- Non si genera alterazione dei prospetti interni ed esterni, né incremento dei volumi degli elementi tecnici presenti;
- La realizzazione è rapida e semplice, quindi associata a bassi costi;
- L'intervento può avvenire sia dall'interno che dall'esterno, in relazione al contesto operativo.

Svantaggi

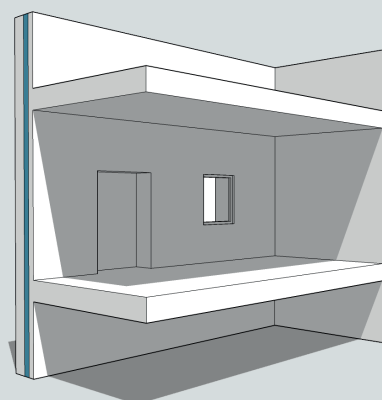
- La strategia è applicabile solo nel caso in cui le pareti perimetrali siano di tipo a cassa vuota;
- La scarsa controllabilità genera esiti poco certi che possono essere misurati solo a posteriori;
- L'irreversibilità dell'intervento lo rende poco adatto a edifici di pregio;
- I materiali sfusi a bassa densità possono subire nel tempo il fenomeno del costipamento, ammassandosi verso il basso e lasciando scoperte le parti più alte dei muri.

Int.3

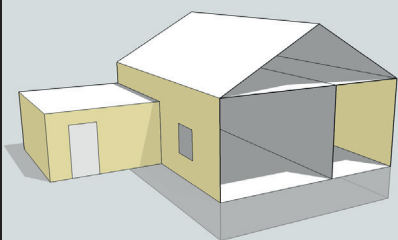


Classi di elementi tecnici

- 2.1.2 Muri contro terra
- 3.3 Muri esterni
- 3.2 Muri interni

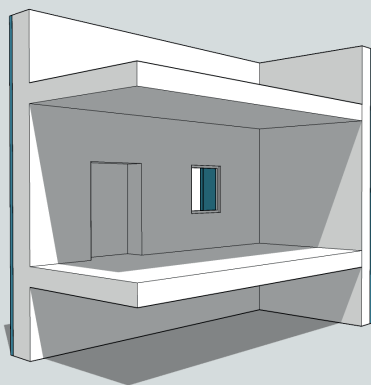


Int.4



Classi di elementi tecnici

2.1.1 Muri esterni



APPLICAZIONE DI INTONACO TERMICO ALL'ESTERNO DELLE PARETI PERIMETRALI

Descrizione

Gli intonaci termici sono prodotti premiscelati che incorporano ai normali componenti di un intonaco parti di materiale isolante. Queste possono essere di varia natura, come microsfere di polistirolo, perlite espansa o materiali innovativi quali granuli in aerogel, mentre il materiale di base dell'intonaco può essere indifferentemente costituito da calce o cemento, in relazione alla tipologia di intervento che si va a realizzare.

L'applicazione non differisce da quella dell'intonaco ordinario, con il quale si possono realizzare strati più o meno spessi di finitura. Ciò garantisce il rispetto delle forme originali delle pareti preesistenti e si rileva applicabile anche per alcuni casi di edifici storici o vincolati.

Nonostante l'ampia applicabilità, gli interventi con termintonaco non sono solitamente associabili a miglioranti importanti del comportamento energetico degli edifici in quanto, i sottili spessori in gioco e la minore efficacia dei materiali non genera mutamenti sostanziali.

Vantaggi

- La grande possibilità di composizione dei prodotti premiscelati rende l'intervento applicabile a numerose classi di edifici;
- La disposizione di uno strato sottile genera una minima alterazione dei prospetti esistenti;
- Il posizionamento all'esterno delle pareti perimetrali consente un isolamento continuo che migliora le condizioni dei ponti termici;
- La sostituzione della finitura esterna comporta una riqualificazione dei prospetti esterni.

Svantaggi

- Lo spessore sottile che è possibile mettere in opera, insieme alla minore efficacia dei materiali isolanti che vengono impiegati in miscela e non puri, conduce a miglioramenti marginali della trasmittanza globale delle pareti;
- In relazione alla sua efficacia, l'intervento si dimostra costoso se non inserito nel contesto di una sostituzione della finitura già programmata.

SOSTITUZIONE DEGLI INFISSI CON MODELLI PIÙ PERFORMANTI

Descrizione

Le porte che dividono gli spazi condizionati da quelli non condizionati sono chiamate a rispettare requisiti energetici al pari degli altri elementi tecnici. Tuttavia, per quanto riguarda questa classe, non si riscontra la diffusione di interventi di riqualificazione degli elementi esistenti, ma solo la possibilità della loro sostituzione. Le proprietà termiche delle porte dipendono principalmente dal tipo di materiale che è stato utilizzato per la realizzazione dell'anta e del telaio. Tuttavia, all'interno del medesimo gruppo non esistono grandi variazioni nelle prestazioni. Al contrario, un effetto apprezzabile della sostituzione delle porte esistenti ha a che fare con la migliore tenuta all'aria, associata alla presenza di sistemi di guarnizioni più efficaci.

Nel caso di edifici storici e vincolati è altamente probabile che le porte siano parte integrante del patrimonio e, quindi, non possano essere modificate.

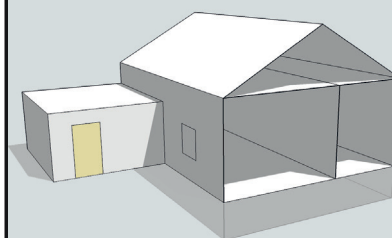
Vantaggi

- Oltre che essere caratterizzate da migliori prestazioni energetiche, nuove porte comportano un incremento globale delle prestazioni, garantendo tra le altre cose una maggiore sicurezza e durabilità nel tempo.

Svantaggi

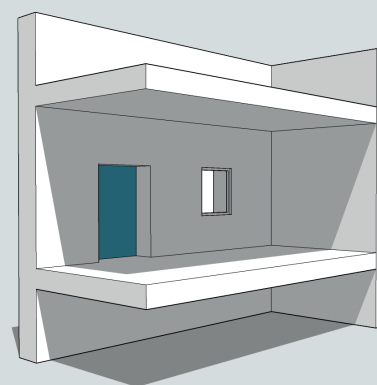
- L'intervento non è attuabile nel caso in cui le porte costituiscano parte del patrimonio in edifici storici e/o protetti da vincoli;
- Le porte costituiscono una piccola parte dell'involucro termico di un edificio, perciò una loro sostituzione non genera un miglioramento determinante delle prestazioni.

Int.5

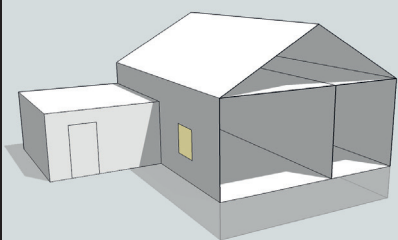


Classi di elementi tecnici

- 2.1.2 Poste esterne
- 3.3 Porte interne



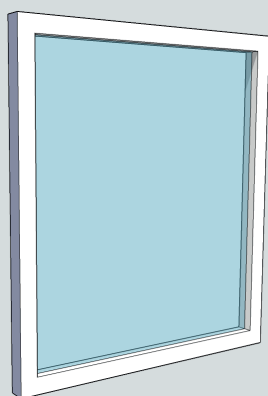
Int.6



Classi di elementi tecnici

2.1.3 Finestre esterne

3.4 Finestre interne



APPLICAZIONE DI PELLICOLE PER L'INCREMENTO DELLE PERFORMANCE DEL VETRO

Descrizione

Di recente, sono state sviluppate diverse tipologie di pellicole trasparenti, ma capaci di incrementare le prestazioni delle superfici vetrate. Le principali da prendere in considerazione per migliorare il comportamento in regime invernale sono le pellicole basso emissive e le pellicole isolanti. Nel primo caso si tratta di fogli che incorporano un sottilissimo strato metallico, capace di ridurre il valore di emissività (ϵ) delle lastre vetrate e, quindi, di riflettere parte del calore uscente verso l'interno. La seconda classe, invece, è costituita da pellicole isolanti che applicano la tecnologia Thinsulate™ per realizzare migliori prestazioni in termini di emissività (ϵ) e trasmittanza (U_w), incorporando nelle pellicole particelle minuscole di materiale isolante (poliestere multi-sputtered).

Tali interventi sono reversibili e non generano alterazioni percettive nell'aspetto degli infissi esistenti. Per questo motivo, pur non permettendo il raggiungimento delle prestazioni di nuove finestre, sono da preferirsi nel caso di edifici storici o vincolati.

Vantaggi

- L'intervento permette di mantenere inalterati l'infisso e la superficie vetrata delle finestre esistenti, costituendo una buona soluzione per il miglioramento delle prestazioni di infissi in contesti vincolati;
- Le tecnologie disponibili permettono di agire sia sull'emissività (ϵ) che sulla trasmittanza (U_w), massimizzando l'efficacia dell'intervento.

Svantaggi

- Il trattamento migliora le caratteristiche energetiche delle superfici vetrate, ma lascia inalterate quelle dell'infisso che comunque concorre a determinare il comportamento globale del componente;
- Il sistema di fissaggio per incollaggio delle pellicole non garantisce una durabilità nel tempo delle misure applicate;
- Le tipologie più preformanti sono associate ad costi di fornitura del materiale e risultano, quindi, giustificabili solo in casi particolari.

SOSTITUZIONE DELLA COMPONENTE VETRATA CON SISTEMA PIÙ PERFORMANTE

Descrizione

La modifica delle componenti vetrate con l'inserimento di nuovi sistemi ad alte prestazioni costituisce un ottimo punto di compromesso fra la conservazione e la sostituzione delle finestre esistenti. La lavorazione consiste nello smontaggio dell'infisso, l'asportazione della lastra vetrata, la modifica del serramento apribile e, infine, l'installazione del nuovo componente vetrato, generalmente costituito da un sistema vetrocamera.

L'intervento non è estremamente invasivo, in quanto permette il mantenimento dell'infisso originale, tuttavia si tratta di un'operazione irreversibile, che fa perdere il vetro originale e modifica il telaio mobile. Per questo motivo, la sua applicabilità va valutata di caso in caso.

Inoltre, il nuovo sistema vetrato occupa più spazio ed è più pesante dell'originale, il che significa che le caratteristiche prestazionali del vecchio telaio, e quindi la sua attitudine a potare il nuovo vetro, vanno valutate attentamente prima di procedere alla sua alterazione.

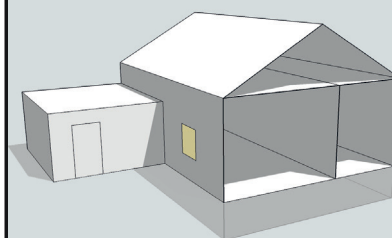
Vantaggi

- Mantenimento del telaio fisso e del telaio mobile preesistente;
- L'opportunità di installare diversi tipi di vetrocamera consente di migliorare le prestazioni delle superfici vetrate per quanto riguarda la trasmittanza (U_w), l'emissività (ϵ) e il fattore solare (g);
- L'alloggiamento di nuove guarnizioni comporta una migliore tenuta all'aria dei serramenti.

Svantaggi

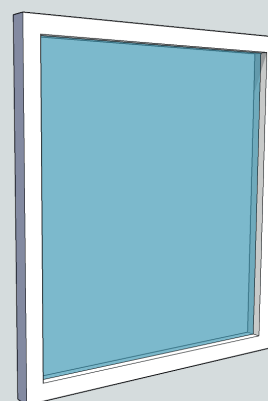
- Il trattamento migliora le caratteristiche energetiche delle superfici vetrate, ma lascia inalterate quelle dell'infisso che comunque concorre a determinare il comportamento globale del componente;
- Il costo dell'intervento è generalmente superiore se confrontato con la sostituzione dei serramenti in toto;
- Non tutti gli infissi sono adatti ad alloggiare sistemi vetrocamera, in relazione alle loro caratteristiche meccaniche e dimensionali.

Int.7

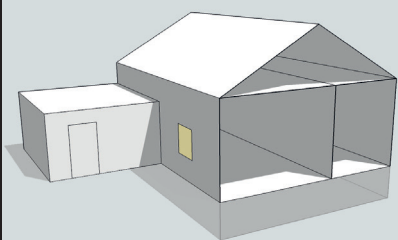


Classi di elementi tecnici

- 2.1.3 Finestre esterne
- 3.4 Finestre interne



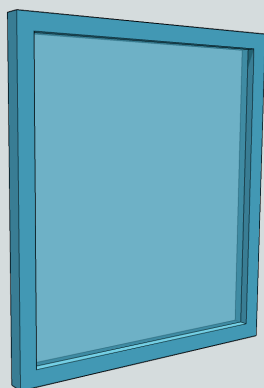
Int.8



Classi di elementi tecnici

2.1.3 Finestre esterne

3.4 Finestre interne



SOSTITUZIONE DEGLI INFISSI CON MODELLI PIÙ PERFORMANTI

Descrizione

La sostituzione integrale degli infissi esistenti è la misura energeticamente più efficace, in quanto va a migliorare le caratteristiche del sistema vetro-telaio nel suo complesso. Operativamente, si tratta di smontare e smaltire le finestre preesistenti e di alloggiarne di nuove, eventualmente adattando le caratteristiche dei fori.

Per ottenere la migliore prestazione nella stagione invernale, le componenti vetrate devono essere in grado di ottimizzare l'isolamento termico e la captazione del calore incidente per radiazione solare. Tuttavia, esistono numerosi altri requisiti affinché il comportamento degli elementi tecnici rimanga efficiente anche per la stagione estiva.

In relazione al telaio, invece, esso può essere scelto in relazione a considerazioni che sono principalmente di carattere estetico/formale e sulla durabilità, in quanto le nuove soluzioni garantiscono alte prestazioni energetiche senza variazioni determinanti in funzione del materiale costituente.

Vantaggi

- La sostituzione integrale dei componenti garantisce le migliori prestazioni energetiche, in relazione all'isolamento termico, alla captazione solare e alla tenuta all'aria;
- La possibilità di calibrare in modo combinato le caratteristiche di vetri e telai permette di generare soluzioni formali e tecnologiche adatte ad ogni contesto;
- Le nuove finestre sono associate anche ad un incremento del livello di sicurezza degli infissi.

Svantaggi

- Nell'ambito di edifici storici e/o vincolati, la sostituzione integrale dei serramenti può rivelarsi non ammissibile;
- La possibile necessità di eseguire opere murarie per l'alloggiamento delle nuove finestre può generare un'alterazione con perdita di materiale delle pareti perimetrali;
- Negli edifici esistenti, la scarsa tenuta delle finestre concorre a determinare un buon grado di ventilazione degli ambienti, la cui entità va verificata in funzione delle nuove installazioni.

ISOLAMENTO ALL'ESTRADOSSO MEDIANTE PANNELLI DI MATERIALE COIBENTE

Descrizione

L'isolamento all'estradosso degli orizzontamenti piani può essere eseguito con caratteristiche analoghe per migliorare le prestazioni di solai controterra, interpiano e di copertura. Tuttavia, esistono requisiti specifici per ciascuna di queste categorie, in relazione all'impermeabilizzazione dei pannelli isolanti e alla finitura superficiale da mettere in opera sopra i materiali coibenti. Qualora i solai siano calpestabili occorre, ad esempio, prevedere una nuova pavimentazione, da alloggiarsi sopra un massetto di allettamento. Nel caso di stratigrafie controterra o di copertura, invece, sarà necessario porre attenzione alla protezione degli strati isolanti, mettendo in opera membrane impermeabilizzanti ed eventualmente barriere al vapore per scongiurare il rischio di formazione di muffe e condense.

In ogni caso, l'intervento può essere eseguito sia con tecnologie umide che a secco, determinando nel secondo caso un vantaggio in relazione alla reversibilità della soluzione.

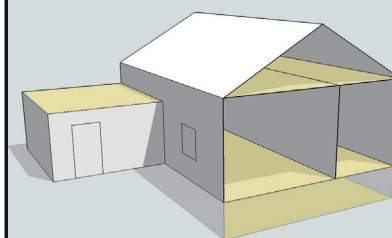
Vantaggi

- L'intervento è di facile realizzazione e può essere attuato in maniera selettiva e scaglionata nel tempo;
- L'utilizzo di tecnologie a secco (fissaggi meccanici, massetti in pannelli o in materiale sciolto, pavimenti flottanti ecc.) permette di progettare interventi reversibili;
- La realizzazione di un nuovo pacchetto di pavimentazione dà l'opportunità di integrare componenti impiantistiche o di migliorare la fruizione degli spazi, ad esempio attraverso l'adozione di soluzioni inclusive di abbattimento delle barriere architettoniche.

Svantaggi

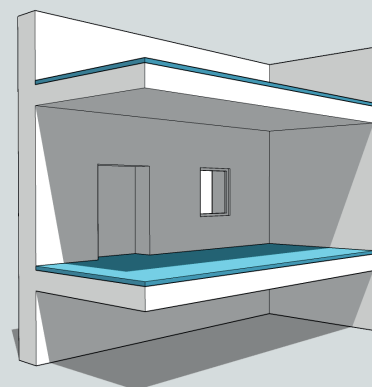
- Le pavimentazioni esistenti subiscono un'alterazione, poiché vengono coperte dallo strato isolante e dalla nuova finitura;
- Si ha una riduzione del volume interno e, in particolare, dell'altezza utile, di cui va verificata la rispondenza ai requisiti minimi in relazione alla funzione del locale;
- Anche se applicato all'interno dell'edificio, si tratta comunque di un intervento discontinuo che non corregge la presenza di ponti termici lineari.

Int.9

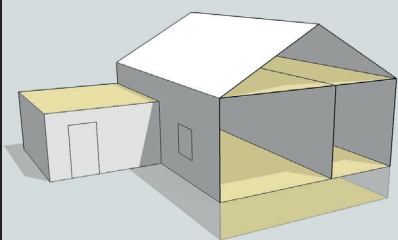


Classi di elementi tecnici

- 1.2 Pavimenti controterra
- 2.2.1 Tetti piani
- 3.1 Solai interpiano

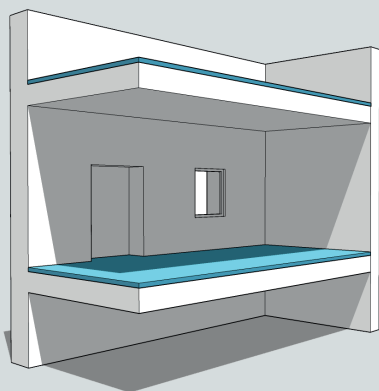


Int.10



Classi di elementi tecnici

- 1.2 Pavimenti controterra
- 2.2.1 Tetti piani
- 3.1 Solai interpiano



ISOLAMENTO MEDIANTE REALIZZAZIONE DI MASSETTO TERMICO

Descrizione

L'isolamento dei solai mediante l'applicazione di massetti termici è un intervento che, come il precedente (Int.9), può applicarsi a pavimenti controterra, tetti piani e solai interpiano. Il prodotto di base è un premiscelato a base di leganti idraulici, additivato con parti di materiale isolante, che possono essere costituite da polistirolo, sughero, argilla o altri elementi in forma sciolta. Nei confronti dell'installazione di pannelli coibenti, le prestazioni energetiche sono inferiori, ciononostante l'intervento risulta meno delicato in relazione alla resistenza all'acqua e alla resistenza meccanica e, nel complesso, più durevole, specialmente in relazione all'applicazione all'esterno o in locali umidi.

La soluzione può essere realizzata sopra alla pavimentazione esistente o in sostituzione delle stessa, in ogni caso, trattandosi di un intervento a umido, può essere attuata solo nel caso in cui la finitura di pavimento precedente sia stata giudicata sacrificabile.

Vantaggi

- Si tratta di materiali a basso peso specifico, adatti all'impiego nell'ambito dell'intervento sul costruito;
- Lo strato di sottofondo può essere ulteriormente additivato, ad esempio mediante fibre rinforzanti, per soddisfare altre classi di requisiti;
- La realizzazione di un nuovo pacchetto di pavimentazione dà l'opportunità di integrare componenti impiantistiche o di migliorare la fruizione degli spazi, ad esempio attraverso l'adozione di soluzioni inclusive di abbattimento delle barriere architettoniche.

Svantaggi

- Trattandosi di un intervento a umido, costituisce una soluzione non reversibile, la cui applicazione compromette definitivamente le pavimentazioni preesistenti;
- Le caratteristiche energetiche dell'aggregato restano inferiori a quelle dei pannelli isolanti utilizzati nel caso precedente (Int.9);
- Nel complesso, la misura si rileva efficace solo in combinazione con altre strategie per il miglioramento delle prestazioni energetiche.

ISOLAMENTO ALL'INTRADOSSO MEDIANTE PANNELLI DI MATERIALE COIBENTE

Descrizione

L'isolamento all'intradosso dei solai è una soluzione progettuale a secco, che consiste nel fissaggio meccanico di pannelli in materiale isolante in corrispondenza dei soffitti dei locali. Lo strato coibente può essere applicato in continuità alle superfici di finitura esistenti o come parte di un controsoffitto ribassato, generando in questo caso un'intercapedine che può essere sfruttata per l'integrazione di componenti impiantistiche.

L'applicabilità di questa misura è soggetta a una valutazione sul valore delle superfici su cui va ad insistere, che vengono inevitabilmente celate dal nuovo sistema, anche se possono essere conservate sotto i nuovi elementi.

L'intervento comporta una contrazione dell'altezza utile interna, che deve rimanere tale da rispettare i vincoli dettati dalle normative pertinenti.

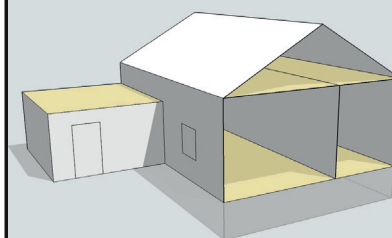
Vantaggi

- L'applicazione nell'ambito di un controsoffitto permette l'integrazione di componenti impiantistiche;
- La realizzazione a secco comporta interventi di tipo reversibile, che non alterano in modo definitivo gli elementi tecnici su cui si attestano;
- L'isolamento all'intradosso dei solai può essere realizzato in modo indipendente in diversi locali, a seconda delle destinazioni d'uso e dei requisiti specifici di ciascuno spazio.

Svantaggi

- Per vincoli di tipo geometrico, risulta poco applicabile nel caso di soffitti voltati;
- Trattandosi di un intervento a carattere discontinuo, che si interrompe in corrispondenza delle pareti, non viene migliorato il comportamento dei ponti termici lineari;
- Rispetto all'isolamento a pavimento (Int.9), comporta costi maggiori associati a una procedura di fissaggio più complessa.

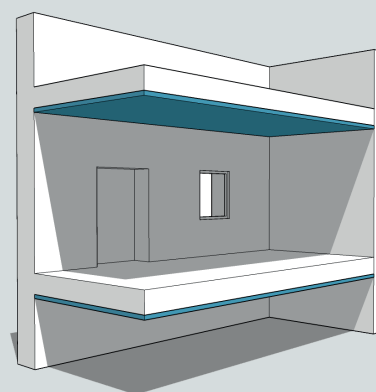
Int.11



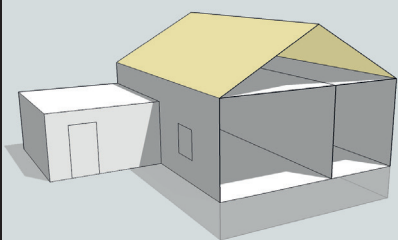
Classi di elementi tecnici

2.2.1 Tetti piani

3.1 Solai interpiano

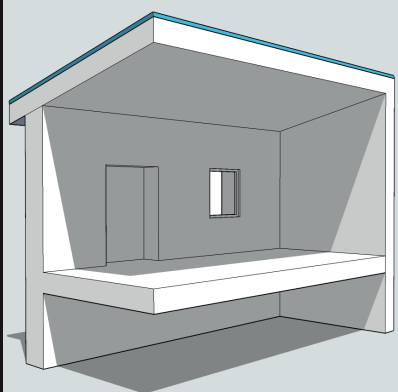


Int.12



Classi di elementi tecnici

2.2.2 Tetti inclinati



ISOLAMENTO ALL'ESTRADOSSO MEDIANTE PANNELLI DI MATERIALE COIBENTE

Descrizione

L'isolamento all'estradosso delle coperture inclinate può avvenire attraverso la messa in opera di un sistema non ventilato o ventilato. In entrambi i casi l'intervento richiede l'asportazione del manto di copertura e la stesura di pannelli di materiale isolante sull'intera area del tetto. Successivamente, si può procedere al posizionamento del nuovo manto di copertura (o alla ricollocazione di quello preesistente) oppure alla realizzazione di uno strato di ventilazione, per mezzo di morali in legno sopra i quali tornerà ad essere posizionato lo stato di finitura. In questo secondo caso, il vantaggio principale si riscontra nella stagione estiva quando, la presenza dell'intercapedine d'aria aiuta a dissipare il calore incidente sulla copertura. Tuttavia, anche nel corso della stagione invernale, questa soluzione scongiura il rischio di formazione di condensa.

Entrambe le soluzioni richiedono un rifacimento completo della copertura di cui, sebbene in misura diversa in funzione degli spessori coinvolti, alterano la geometria.

Vantaggi

- Si realizza uno strato isolante continuo, che risolve la presenza di ponti termici lineari;
- L'intervento dà modo di riqualificare e mettere in sicurezza il manto di copertura di edifici esistenti;
- L'utilizzo di un isolante sul lato esterno permette di sfruttare l'inerzia termica degli strati massivi sottostanti;
- La coibentazione del pacchetto di copertura limita l'estensione dei cicli termici a cui sono sottoposti eventuali elementi lignei della struttura, migliorandone così la durabilità.

Svantaggi

- L'intervento risulta costoso, perché deve coinvolgere l'intera superficie del tetto e complesso, in quanto comporta la gestione di un cantiere in quota;
- Nel caso in cui l'edificio sia caratterizzato da locali sottotetto non riscaldati, l'intervento di isolamento della copertura risulta poco efficace;
- La modifica della stratigrafia del tetto genera un'alterazione, seppur lieve, dei prospetti dell'edificio.

ISOLAMENTO ALL'INTRADOSSO MEDIANTE PANNELLI DI MATERIALE COIBENTE

Descrizione

Il posizionamento di uno strato coibente all'intradosso della copertura avviene secondo modalità analoghe a quanto visto per i tetti piani (Int.11). Tuttavia, nel caso di tetti a falde, la varietà delle strutture portanti che si possono trovare può generare vincoli di intervento di diverso genere e, di conseguenza, effetti piuttosto diversificati. In riferimento a ciò, si pensi alla differenza che sussiste fra l'intradosso di un tetto a falde realizzato con un solaio in laterocemento e quello di una copertura in legno retta da capriate.

Tuttavia, nel caso in cui si voglia isolare il sottotetto, e nell'impossibilità di agire all'estradosso della copertura, la soluzione presente risulta l'unica praticabile.

Mediante questo intervento non è possibile realizzare una barriera termica continua e omogenea, pertanto non si possono considerare risolte le criticità locali quali i ponti termici lineari. In compenso, rispetto all'alternativa (Int.12), l'isolamento all'intradosso risulta generalmente più economico.

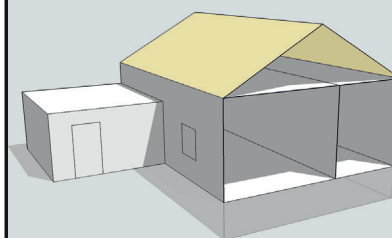
Vantaggi

- La realizzazione a secco permette di generare scenari trasformativi reversibili;
- L'intervento risulta più semplice ed economico se confrontato con l'isolamento all'estradosso (Int.12);
- La lavorazione sul lato interno evita ogni alterazione dei prospetti esterni dell'edificio;
- L'applicazione nell'ambito di un controsoffitto permette l'integrazione di componenti impiantistiche.

Svantaggi

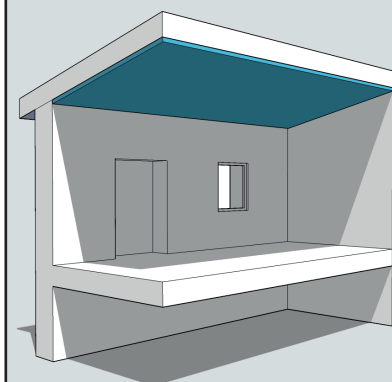
- La complessità geometrica delle strutture di copertura può rendere l'intervento di difficile attuazione e di scarsa efficacia;
- Il posizionamento del materiale isolante all'intradosso non garantisce la continuità dello stato isolante e quindi la correzione dei ponti termici lineari;
- L'incremento degli spessori verso l'interno comporta una riduzione delle altezze libere, la cui ammissibilità va valutata in funzione delle destinazioni d'uso dei locali.

Int.13



Classi di elementi tecnici

2.2.2 Tetti inclinati



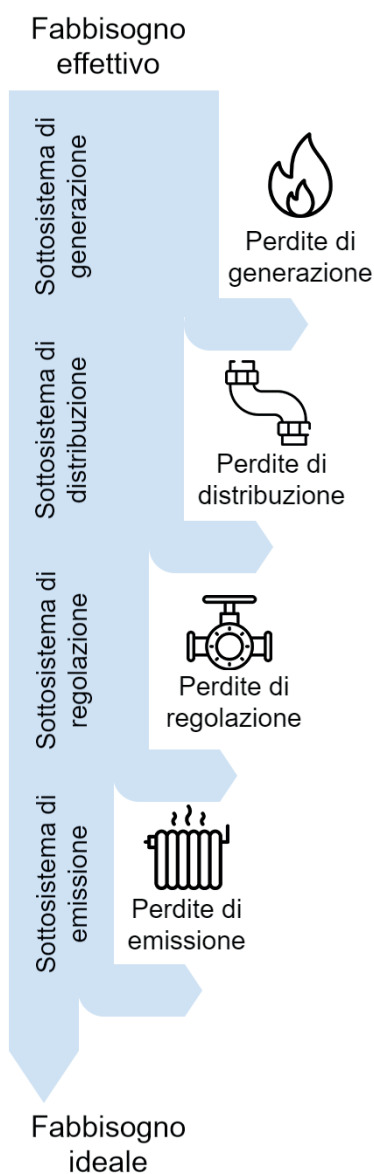


Fig. 17. Fabbisogno effettivo e ideale per il riscaldamento e perdite dei sottosistemi impiantistici.

3.1.2. Gli interventi sull'impianto

Il sistema impiantistico di un edificio è l'insieme dei dispositivi volti al riscaldamento e al raffrescamento degli ambienti, al condizionamento dell'aria, alla produzione di acqua calda sanitaria, all'illuminazione e alla movimentazione di cose e persone. Nel presente studio, la trattazione si limita ad approfondire il tema del riscaldamento, affrontando il problema della limitazione del fabbisogno energetico per il condizionamento invernale.

Per una migliore gestione, l'impianto di riscaldamento viene convenzionalmente suddiviso secondo uno schema che lo organizza in quattro sottosistemi principali, secondo quanto esplicitato dalla norma tecnica UNI TS 11300-2:2014 [86]:

- Sottosistema di generazione: insieme dei componenti che si occupano della produzione dell'energia;
- Sottosistema di distribuzione: insieme delle reti che trasportano l'energia dal generatore ai terminali di emissione;
- Sottosistema di emissione: insieme dei terminali impiantistici che erogano l'energia agli ambienti da condizionare;
- Sottosistema di regolazione: insieme dei dispositivi per il controllo e la regolazione del funzionamento dell'impianto.

L'efficienza di un sistema impiantistico viene valutata sulla base del suo rendimento globale, calcolato come produttoria dei rendimenti parziali dei sottosistemi costituenti. La conoscenza del rendimento globale di un sistema impiantistico permette di passare dal fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$), calcolato in considerazione delle caratteristiche dell'involucro edilizio, al fabbisogno effettivo (Q_h), che tiene conto delle perdite che avvengono in corrispondenza di ciascun sottosistema (Fig. 17). Nel contesto di analisi allo stato preliminare, i rendimenti, e quindi le perdite corrispondenti, possono essere determinati sulla base di un sistema di tabelle pubblicate nella norma tecnica UNI TS 11300-2:2014 [86].

Nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici, la finalità degli interventi che agiscono sulle componenti impiantistiche è quella di incrementare il valore di rendimento di uno o più dei sottosistemi. Tuttavia, muovendosi in un ambito di valutazioni preliminari e nell'ottica di promuovere operazioni che limitino il più possibile il carico trasformativo sugli edifici esistenti, si ritiene opportuno in questa sede approfondire le modifiche ai sottosistemi di generazione e di regolazione (Tab. 5), i cui aggiornamenti escludono alterazioni determinanti delle componenti edilizie. In relazione al sottosistema di distribuzione, per ottenere un innalzamento dei rendimenti occorre, infatti, modificare pesantemente la rete impiantistica, determinando un forte impatto sugli elementi tecnici dell'involucro, in cui solitamente si trova annegata. Per quanto riguarda il sottosistema

4	SOTTOSISTEMA DI GENERAZIONE	DISPOSTIVI
	Int.14 Sostituzione del generatore di calore con un modello più performante	Caldaie ad alto rendimento, a condensazione
5	SOTTOSISTEMA DI REGOLAZIONE	
	Int.15 Installazione di un sistema di regolazione di zona	Termostati di zona, Valvole a tre vie
	Int.16 Installazione di un sistema di regolazione per singolo ambiente	Valvole termostatiche

di emissione, invece, la normativa contempla miglioramenti delle condizioni di rendimento solo nel caso di modifica della tipologia di terminale e non dell'aggiornamento nel contesto della stessa classe. Ad esempio, la sostituzione di vecchi radiatori con nuovi modelli non comporta un incremento di efficienza, cosa che invece si verifica nei casi di passaggio da un impianto a radiatori ad uno con pannelli radianti a pavimento. Questo tipo di intervento, però, non può essere pensato al di fuori di uno scenario di trasformazione che coinvolga tutte le componenti del sistema impiantistico oltre che pesanti implicazioni sul sistema tecnologico dell'edificio.

Al contrario, va considerato che vi sono situazioni in cui modifiche dell'involucro incidono sulle efficienze dei sottosistemi impiantistici. Ne è un esempio il caso dell'isolamento delle pareti perimetrali, che implica anche un miglioramento dell'efficienza del sottosistema di emissione, ponendo i terminali impiantistici in una migliore condizione di funzionamento.

Le modifiche al sottosistema di generazione si possono ricondurre al caso della sostituzione del generatore esistente con un modello più performante. Attraverso il D.P.R. 660/1996 [87], la legge italiana definisce i valori minimi di rendimento in funzione della potenza nominale per diverse tipologie di generatori a combustione, individuando così tre categorie ad efficienza crescente:

- Caldaie standard: per un buon funzionamento, devono lavorare con temperature dei fumi, e quindi di ritorno dell'acqua elevate, così da evitare la produzione di condensa, che le potrebbe danneggiare;
- Caldaie a bassa temperature: possono operare con basse temperature di ritorno (35-40°) in modo continuativo, producendo eventualmente condensa, senza che ne venga compromesso il funzionamento. L'incremento del rendimento è dovuto all'utilizzo di acqua a basse temperature, che permette di ottimizzare gli scambi termici minimizzando le perdite;
- Caldaie a condensazione: a determinate condizioni di funzionamento il vapore acqueo contenuto nei fumi viene fatto condensare per usufruire del calore latente che si libera nel passaggio di fase. La maggiore efficienza, che può arrivare a superare il 100%, è legata allo sfruttamento di questa quota di calore che nelle altre tipologie di caldaia viene dispersa.

Tab. 5. Interventi di riqualificazione dell'impianto considerati nel presente studio.

Nella scelta della sostituzione di un generatore esistente, il suo meccanismo di funzionamento va considerato in relazione all'intero impianto di riscaldamento. L'adozione di dispositivi con alti livelli di rendimento è sempre raccomandata, tuttavia, i più diffusi sottosistemi di emissione lavorano ancora ad alte temperature e non consentono di sfruttare le potenzialità delle caldaie a bassa temperatura o a condensazione, per le quali i picchi di rendimento sono associati a basse temperature di esercizio. A prescindere dalla tipologia del generatore, è comunque possibile scegliere fra modelli che possiedono diversi livelli di efficienza. In questa direzione, il D.P.R. 660/1996 [87] presenta un'ulteriore classificazione dei generatori, che attribuisce un numero variabile di stelle che va da 1 a 4 in funzione dell'efficienza al 100% e al 30% della potenza nominale (Pn), come riportato in Tab. 6.

Per quanto concerne, invece, le modifiche ai sottosistemi di regolazione, si tratta di interventi la cui realizzazione è in generale poco impattante, ma che possono generare incrementi del rendimento anche considerevoli. La norma tecnica UNI TS 11300-2/2014 [86] suddivide i tipi di regolazione in tre classi, che possono essere utilizzate in combinazione:

- Regolazione climatica: realizzata mediante sonda climatica che regola la temperatura di mandata sulla base delle condizioni esterne rilevate. E' il sistema di regolazione più basilare, la cui presenza in un impianto di riscaldamento è data per scontata;
- Regolazione di zona: realizzata mediante valvole a tre vie, permette la regolazione della portata di fluido vettore nei terminali, sulla base di termostati di zona;
- Regolazione per singolo ambiente: realizzata mediante valvole termostatiche installate su ciascun corpo scaldante, permette di nuovo la regolazione della portata di fluido vettore nei terminali, sulla base delle esigenze del singolo locale.

Oltre a questa classificazione, lo standard ne riporta una seconda, che si muove sulla base delle caratteristiche della regolazione stessa, in funzione della sua sensibilità e quindi del tempo di risposta alla variazione dei requisiti. Con questa logica, rendimenti crescenti sono individuati per regolazioni on-off, proporzionale con banda di 2°, proporzionale con banda di 1°, proporzionale con banda di 0.5° e proporzionale-integrativo (PI) o proporzionale-integrativo-derivato (PID).

MARCATURA	RENDIMENTO AL 100% DI Pn	RENDIMENTO AL 30% di Pn
*	$\geq 84 + 2 \log Pn$	$\geq 80 + 3 \log Pn$
**	$\geq 87 + 2 \log Pn$	$\geq 83 + 3 \log Pn$
***	$\geq 90 + 2 \log Pn$	$\geq 86 + 3 \log Pn$
****	$\geq 93 + 2 \log Pn$	$\geq 89 + 3 \log Pn$

Tab. 6. Certificazione delle caldaie in funzione del rendimento. Rielaborazione da [87].

Operativamente, nell'ambito della riqualificazione di un impianto di riscaldamento esistente, è possibile optare per la realizzazione di sistemi di regolazione di zona o per singolo ambiente, anche in considerazione delle caratteristiche del sistema impiantistico allo stato di fatto. In generale, in un impianto centralizzato a montanti risulta più semplice installare un sistema di regolazione per singolo ambiente, che si realizza mediante l'applicazione di valvole termostatiche ai terminali impiantistici, mentre nel caso di impianti a zone è più agevole mettere in opera un sistema di regolazione di zona, attuato attraverso il montaggio di valvole a tre vie sui collettori. A questa considerazione occorre aggiungere che, nel caso di impianti a servizio di più unità immobiliari, l'installazione di valvole termostatiche sui terminali di riscaldamento è già obbligatorio per legge a partire dal 2017, [87] con la finalità del risparmio e della contabilizzazione del calore.

Da un'analisi della letteratura, si evince che il tema della riqualificazione degli impianti tecnologici è stato trattato dalla comunità accademica in proporzione inferiore rispetto a quello del miglioramento delle prestazioni degli involucri. Al contrario, è possibile riscontrare un numero consistente di pubblicazioni provenienti dall'ambito tecnico-produttivo, che forniscono indicazioni operative per il miglioramento dell'efficienza dei sistemi impiantistici esistenti, pur non muovendosi all'interno di un quadro disciplinare scientifico rigoroso. Come eccezione, un importante lavoro è sintetizzato nel testo "Riqualificazione impiantistica degli edifici esistenti" [89], parte di una collana redatta a conclusione di un progetto di ricerca PRIN. L'esperienza effettuata è partita da una ricognizione sulle caratteristiche degli impianti termici più diffusi negli edifici residenziali sul territorio italiano per poi applicare diversi scenari di riqualificazione impiantistica a due classi di edifici tipo ripresentativi delle residenze mono e multifamiliari. La ricerca ha permesso di evidenziare gli effetti sul piano energetico ed economico, suddividendo i casi studio in tre ambiti omogenei a copertura del territorio nazionale.

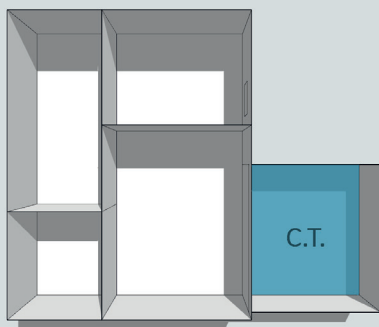
Di seguito sono presenti le schede di dettaglio sugli interventi ai sottosistemi impiantistici che sono stati approfonditi.

Int.14



Classi di elementi tecnici

4 Sottosistema di generazione



SOSTITUZIONE DEL GENERATORE DI CALORE CON UN MODELLO PIÙ PERFORMANTE

Descrizione

La sostituzione del generatore di calore è un intervento costoso, ma di grande efficacia. Le caldaie e i bruciatori sono, infatti, componenti pensati per una sostituzione periodica, con un ciclo di vita che si attesta intorno ai 20 anni, e i generatori di nuova generazione comportano sempre importanti miglioramenti in termini di rendimento nei confronti dei modelli precedenti.

Per quanto riguarda l'impatto, si tratta di una misura estremamente localizzata, che, previa verifica di adeguatezza dei locali tecnici preesistenti, può non alterare, se non in maniera puntuale, l'organismo edilizio su cui si interviene.

Qualora l'operazione di sostituzione avvenga in concomitanza con interventi di riqualificazione dell'involucro, occorre abbinare una nuova stima dei fabbisogni energetici dell'edificio e della relativa potenza di picco richiesta al generatore, per considerare l'opportunità di scegliere macchine con potenze nominali inferiori rispetto a quelle precedentemente installate.

Vantaggi

- La scelta di un nuovo generatore di calore comporta un miglioramento del rendimento, ma anche un incremento della sicurezza dell'impianto e una riduzione del carico inquinante;
- Si tratta di un intervento localizzato, che non genera alterazioni all'involucro edilizio (ad esclusione dell'eventuale necessità di adeguamento del locale tecnico o della canna fumaria preesistente).

Svantaggi

- Nel caso di caldaie a basse temperature o a condensazione, non è detto che il sistema impiantistico preesistente nel suo complesso sia in grado di sfruttarle al meglio, il rendimento di generazione va quindi valutato anche in funzione del sottosistema di emissione;
- L'intervento comporta un investimento iniziale considerevole.

INSTALLAZIONE DI UN SISTEMA DI REGOLAZIONE DI ZONA

Descrizione

In un impianto a radiatori, la regolazione di zona permette un controllo della temperatura di insiemi di ambienti, sulla base della regolazione della portata di fluido vettore. L'introduzione di un sistema di regolazione di zona è particolarmente indicato nel caso di impianti termici a distribuzione orizzontale, per l'adattamento dei quali è sufficiente installare una valvola a tre vie per ciascun collettore e un termostato in corrispondenza di ciascuna zona. L'efficienza del sottosistema dipende dall'accuratezza del regolatore che, a partire dalla lettura del termostato, può agire sulla valvola di zona con modalità on/off o modulante (P, PI o PID). Se si assume, poi, la compresenza di una regolazione di tipo climatico, il rendimento del sottosistema cresce ancora di qualche punto percentuale.

Poiché la normativa vigente impone la presenza di valvole termostatiche su ciascun radiatore, per edifici composti da più di un'unità immobiliare, la regolazione di zona va comunque integrata con quella per singolo ambiente.

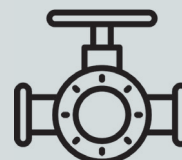
Vantaggi

- Nel caso di impianti a distribuzione orizzontale, si tratta di un intervento localizzato che determina piccole alterazioni dell'involucro edilizio;
- In presenza di regolazione di tipo climatico può portare a ottimi rendimenti di regolazione.

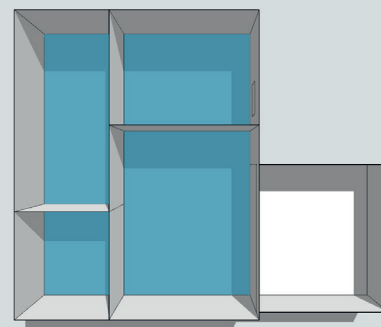
Svantaggi

- Poiché la normativa attuale impone la presenza di valvole termostatiche sui singoli radiatori, per edifici composti da più di un'unità immobiliare, la regolazione di zona costituisce una prestazione sotto la soglia di ammissibilità;
- La regolazione di zona genera un comfort ambientale soddisfacente solo quando i locali che compongono le zone sono uniformi almeno per esposizione e destinazione d'uso.

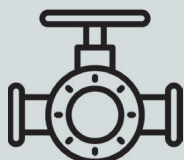
Int.15



Classi di elementi tecnici
5 Sottosistema di regolazione

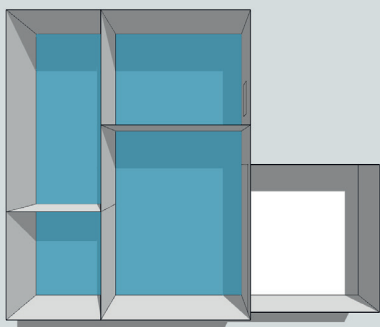


Int.16



Classi di elementi tecnici

5 Sottosistema di regolazione



INSTALLAZIONE DI UN SISTEMA DI REGOLAZIONE PER SINGOLO AMBIENTE

Descrizione

La regolazione per singolo ambiente è il sistema più accurato che si può realizzare e, di conseguenza, il più efficiente dal punto di vista del rendimento. Questa tipologia di intervento si rileva particolarmente conveniente nel caso di impianti a radiatori con distribuzione verticale, per l'adeguamento dei quali è necessario installare su ciascun terminale impiantistico una valvola termostatica, che, di fatto, agisce da termostato a punto fisso. Oltre a ciò, sono poi necessari piccoli adeguamenti del sottosistema di distribuzione, che va dotato di regolatori di pressione in corrispondenza di ogni colonna montante e di una pompa a velocità variabile all'uscita del generatore.

Poiché la normativa vigente ha reso obbligatoria l'installazione di valvole termostatiche per edifici composti da più di un'unità immobiliare, questo intervento costituisce la norma per tali tipologie edilizie.

Il rendimento del sottosistema si determina in funzione del tipo di regolatore, che può agire a efficienza crescente con modalità on-off oppure modulante (P, PI o PID).

Vantaggi

- La regolazione per singolo ambiente garantisce il livello più alto di comfort ambientale;
- Si tratta di un intervento poco costoso ed invasivo, che si realizza facilmente nel caso di impianti preesistenti a distribuzione verticale;
- Negli edifici costituiti da più unità immobiliari, l'intervento soddisfa la messa a norma dell'impianto per quanto riguarda la contabilizzazione del calore.

Svantaggi

- Per mantenere un buon funzionamento dell'impianto, occorre eseguire in parallelo alcuni interventi di adeguamento sul sottosistema di distribuzione;
- Andrà considerata la riduzione della portata circolante nell'intero sottosistema di distribuzione;
- I terminali impiantistici dotati di valvole termostatiche possono presentare distribuzioni non uniformi di temperatura sulla superficie.

3.2. Il caso degli edifici storici

Come si è già accennato nella parte iniziale del presente capitolo, gli edifici storici costituiscono il caso limite di applicabilità delle normative sul comportamento energetico degli edifici. A partire dalle prime direttive europee, le disposizioni hanno ammesso che gli stati membri possano decidere di non definire o non applicare limiti prestazionali per i beni architettonici sottoposti a vincolo, qualora il rispetto degli stessi implichi alterazioni inaccettabili. Tuttavia, la Legge n. 90/2013 [49] esplicita che tale esclusione è applicabile solo nel caso in cui le trasformazioni in oggetto siano effettivamente motivo di perdita di valore secondo il giudizio delle autorità competenti. Nel contempo, a livello comunitario, la Direttiva 2018/844 [21] ha recentemente aggiornato il quadro di riferimento, incoraggiando “la ricerca e la sperimentazione di nuove soluzioni in grado di migliorare la prestazione energetica di edifici e di siti storici, garantendo allo stesso tempo la protezione e la conservazione del patrimonio culturale”.

La lettura congiunta dei testi normativi permette di comprendere che, nella gerarchia delle esigenze da prendere in considerazione nel caso di interventi su beni storici, la protezione di tutto quanto contribuisce a generare il sistema di valori di cui l'edificio in oggetto si fa portatore occupa una posizione di massima rilevanza, che non può essere sottomessa a nessun altro obiettivo. Nonostante ciò, è incentivata l'adozione di soluzioni di efficientamento energetico il cui impatto trasformativo sul bene risulti entro uno spazio tollerabile.

A tale proposito, è interessante soffermarsi sul concetto di miglioramento delle prestazioni, definito in opposizione a quello di adeguamento. Il tema è stato introdotto, e risulta ad oggi completamente integrato, nel campo del restauro strutturale con ottimi risultati e, in considerazione del livello attuale di maturità tecnologica, si ritiene possa essere replicato per l'ambito energetico [90]. In questo senso, le misure di efficientamento possono diventare strumenti per promuovere la protezione degli edifici storici, inserendo il loro processo di sviluppo in un circolo governato dalla sostenibilità intesa nella sua accezione più completa [70].

Dal punto di vista ambientale, l'efficientamento di un edificio esistente riduce l'impronta ecologica del territorio che lo ospita, diminuendo la quantità di risorse necessarie per il suo sostentamento e le relative emissioni di carbonio. Sotto il profilo sociale, la riqualificazione assicura migliori condizioni di comfort e di sicurezza e, allo stesso tempo, il mantenimento in uso di strutture che fanno parte del patrimonio di una comunità costituisce un'importante fattore culturale. Infine, per quanto concerne la sostenibilità economica, un abbassamento dei costi di gestione, legato a una riduzione dei consumi, può rivelarsi

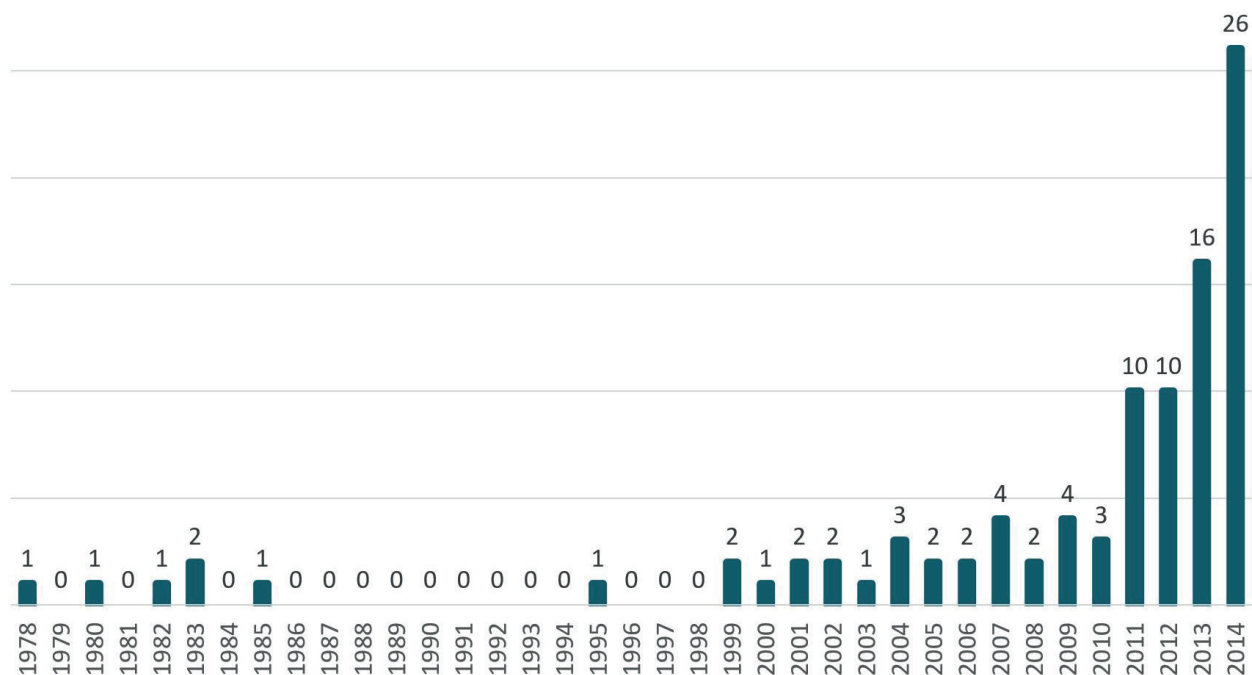


Fig. 18. Numero di pubblicazioni scientifiche annuali nel periodo 1978-2014 sul tema dell'efficienza energetica degli edifici storici. Rielaborazione da [91].

un fattore determinante per il mantenimento in opera dei beni architettonici e, quindi, per la loro conservazione [6].

In letteratura, le trattazioni sull'efficienza energetica degli edifici storici cominciano a diffondersi alla fine degli anni '70, e, da quel momento, si assiste a un continuo aumento delle pubblicazioni scientifiche sul tema [91]. In generale, le ricerche focalizzano l'attenzione su uno o più casi studio specifici, che costituiscono best practice da cui si cerca di estrapolare metodologie di indagine o flussi di lavoro ripetibili, la cui effettiva applicazione su vasta scala risulta, però, sempre difficile.

Di particolare interesse rispetto ai fini della presente ricerca, risultano alcuni studi che affrontano il tema dei metodi di valutazione per la verifica dei risultati di strategie di retrofit [92], consentendo di comprendere il valore dei riscontri provenienti da misure sul campo, test di laboratorio o simulazioni computerizzate. In tale occasione emergono i rischi derivanti dall'applicazione di modelli energetici a edifici storici, in quanto a causa di una maggiore complessità che può non essere colta dai codici di calcolo, i risultati possono rivelarsi meno affidabili che nel caso dell'applicazione a costruzioni recenti [93]. Tuttavia, se riconoscere i consumi effettivi di un edificio storico richiede l'impiego di modelli di calcolo sofisticati, anche codici semplificati possono essere utilizzati per valutazioni di tipo comparativo e per il supporto alla decisione nelle fasi preliminari di progettazione.

In relazione alla scelta delle misure per il miglioramento delle prestazioni del patrimonio costruito, diversi progetti di ricerca di livello comunitario hanno affrontato il tema del supporto

alla decisione, implementando metodi di analisi multicriteriale. Al contrario, le ricerche accademiche hanno intrapreso un'altra direzione, proponendo processi sequenziali in cui una lista estesa di possibili azioni trasformatrice viene progressivamente ristretta sulla base di criteri di conservazione [94, 95, 96].

3.2.1. Le linee guida per la riqualificazione degli edifici storici

A fronte di un vuoto metodologico e normativo sul tema dello sviluppo di interventi volti al miglioramento energetico dei beni vincolati [97], alcuni enti competenti sia in materia di conservazione del patrimonio culturale che di comportamento energetico degli edifici si sono mossi per definire delle guide di riferimento.

A livello internazionale sono stati diffusi diversi documenti indirizzati a molteplici soggetti coinvolti a vario titolo nei processi edilizi. Ne sono esempi le "Energy Guideline for Historical Buildings" [98] dell'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), strutturate come una norma tecnica, o la serie di opuscoli estremamente comunicativa "Energy Efficiency and Historic Buildings" [99] pubblicati dall' Historic Buildings and Monuments Commission for England.

Di seguito si propone una breve rassegna delle linee guida che hanno effetto diretto sul contesto europeo e italiano.

Manuale UNESCO

Nel 2013 l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) ha pubblicato un documento dal titolo "Energy Efficiency and Energy Management in Cultural Heritage - Case Studies Guidebook" [100], contenente i risultati di una conferenza sulla gestione energetica applicata ai beni culturali tenutasi a Dubrovnik (Croazia) due anni prima. Il report non presenta una proposta a livello metodologico, ma riguarda principalmente una rassegna di casi studio suddivisi per area tematica in funzione delle classi di intervento su involucro e impianto.

La parte di maggiore interesse risulta quella dedicata al caso dei centri storici e dei piani di gestione energetica a livello urbano. Il caso applicativo, riferito alla città di Spalato, viene sfruttato per definire una metodologia riutilizzabile fondata su tre cluster di criteri (compatibilità, efficienza energetica e fattibilità) e atta a guidare un processo di progettazione capace di bilanciare le esigenze legate alla protezione del bene con quelle delle sue classi di utenza contemporanee.

Guida AiCARR

La guida AiCARR [101] (Associazione italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione) si divide in due parti, rivolte a diverse classi di professionisti. La prima, indirizzata ai

tecnici delle Soprintendenze, contiene i principi generali sul tema dell'efficientamento energetico, al fine di costituire una base di conoscenza condivisa fra i soggetti coinvolti. La seconda è invece dedicata ai progettisti e tratta contenuti più tecnici sugli audit energetici e sulle soluzioni per il miglioramento delle prestazioni dell'esistente.

Di particolare interesse risulta la proposta per una procedura di miglioramento dell'efficienza energetica (Fig. 19) che si compone di:

- Quattro azioni preliminari conoscitive (Diagnosi energetica, Analisi dell'involucro, Analisi dell'impianto e Modellazione energetica);
- Una prima valutazione della prestazione energetica, misurata mediante l'indice $E_{p,gl}$ ($\text{kWh/m}^2\text{a}$ o $\text{kWh/m}^3\text{a}$), che rappresenta il consumo unitario di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione ed eventuale ventilazione
- L'individuazione di possibili strategie per il miglioramento delle prestazioni del sistema edificio
- Un ricalcolo dell'indice di prestazione energetica $E_{p',gl}$ a seguito degli interventi individuati alla fase precedente;
- Una comparazione dei due indici calcolati, che porta al progetto di intervento nel caso in cui $E_{p',gl} < E_{p,gl}$, o a un approfondimento della fase di diagnosi con conseguente proposta di nuove strategie di miglioramento nel caso contrario.

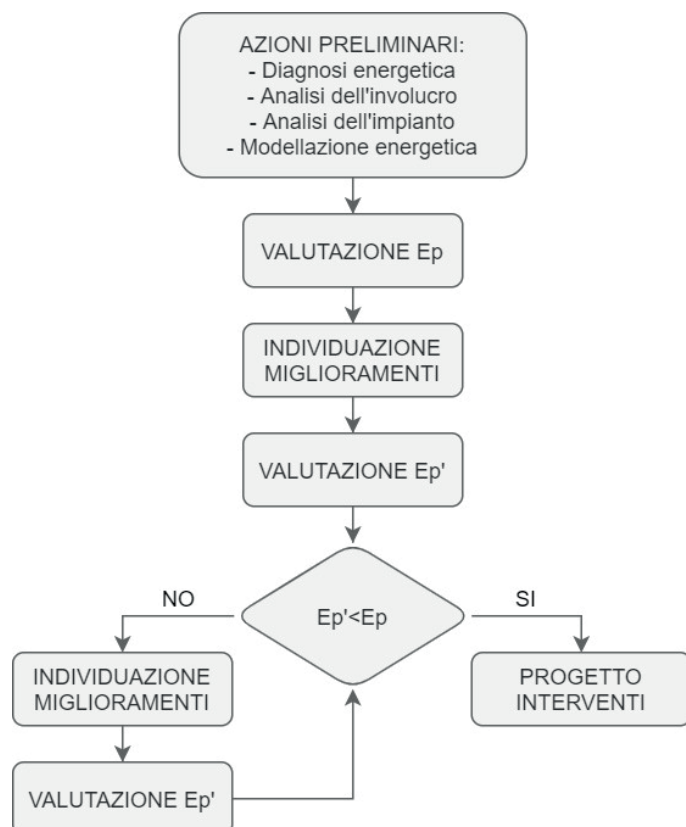


Fig. 19. Diagramma di flusso della procedura per il miglioramento dell'efficienza energetica negli edifici storici. Rielaborazione da [101].

Sebbene la selezione di possibili interventi di miglioramento energetico sia esplicitata come una fase fondamentale del processo, non vengono fornite indicazioni sui criteri che possono guidare nella scelta. Tale mancanza suggerisce quello che risulta essere l'approccio più ricorrente nell'ambito degli interventi sugli edifici storici, ossia il riconoscimento dell'unicità di ciascun caso e quindi la necessità di una valutazione ad hoc basata sulla conoscenza e sull'esperienza più che l'identificazione di strumenti analitici per la decisione.

Nell'approccio dell'AiCARR, poi, l'analisi economica viene disaccoppiata e trattata separatamente sulla base di tre elementi: il risparmio effettivo di energia primaria, la riduzione delle emissioni di anidride carbonica e la redditività dell'intervento, calcolata in termini di Valore Attuale Netto (VAN) e considerata accettabile quando $VAN > 0$.

Linee di indirizzo MiBACT

Le "Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale. Architettura, centri e nuclei storici ed urbani" [102] del Ministero per i beni e le attività culturali e per il turismo (MiBACT) sono state composte da un gruppo di lavoro multidisciplinare appositamente costituito nel 2013 e comprendente membri del Ministero e docenti universitari.

In relazione al metodo, le premesse esplicitate dal Prof. Carbonara, richiamano i caratteri del moderno restauro, esplicitando la centralità della dialettica conservazione-sviluppo e ammettendo "lecite modificazioni" del bene nell'idea che il mantenimento in uso di un manufatto storico sia la migliore alternativa per garantirne la trasmissione nel corso del tempo. In un clima di generale fiducia nei confronti delle tecnologie emergenti, l'unica fonte di preoccupazione riguarda il tema dell'integrazione impiantistica, sulla quale gli studi teorici appaiono in ritardo e le sperimentazioni pratiche non hanno ancora assunto un carattere sistematico. In questo ambito, un riferimento per il corretto sviluppo può essere tratto dal campo del consolidamento strutturale, dove si distingue tra "adeguamento" e "miglioramento", secondo quanto già discusso in precedenza. I criteri operativi cui ci si riferisce devono comunque essere i medesimi del restauro (compatibilità, reversibilità, minimo intervento, distinguibilità, rispetto dell'autenticità), che risultano principi fondamentali utili a guidare qualsiasi intervento sull'esistente.

Il documento si divide in quattro parti fondamentali: oggetto delle linee di indirizzo, conoscenza dei contesti, valutazione dell'efficienza energetica per il patrimonio culturale e miglioramento dell'efficienza energetica per il patrimonio culturale. In questo modo, la stessa struttura organizzativa si fa portatrice dei contenuti concettuali, che invitano i soggetti coinvolti nelle decisioni sul patrimonio architettonico a seguire

un processo che vede susseguirsi conoscenza, valutazione e azione di miglioramento.

La fase di conoscenza deve partire dall'analisi dei caratteri tecnico-costruttivi dei manufatti oggetto di intervento, composta da un rilievo geometrico e materico a cui viene associata la lettura critica dell'evoluzione storica dell'edificio. A queste seguono la valutazione della qualità ambientale (comfort termico, visivo, acustico e qualità dell'aria) e l'analisi del sistema impiantistico allo stato di fatto.

La valutazione dell'efficienza energetica si compone di una diagnosi energetica e di una valutazione delle prestazioni complessive, da calcolarsi sia nelle condizioni esistenti che dopo l'ipotetica attuazione di interventi di efficientamento, in riferimento alle peculiarità che definiscono l'edificio storico. In questa sezione, il documento propone l'attuazione della procedura per il miglioramento dell'efficienza energetica già presentata dall'AiCARR [101].

Lo studio e la presentazione di scenari progettuali per il miglioramento delle performance deve rispecchiare un procedimento multidisciplinare integrato e prendere in considerazione azioni sull'involucro e sull'impianto e le opportunità derivanti dall'integrazione di fonti energetiche di tipo rinnovabile. Per assicurare l'effettiva funzionalità, tutte le proposte di intervento devono essere corredate di un'analisi economica e di un piano di manutenzione.

In allegato al documento vengono riportate numerose schede tecniche sui materiali per l'efficientamento energetico, sui possibili interventi di miglioramento dell'involucro edilizio e su una serie di buone pratiche. Di particolare interesse per i temi di questa tesi risultano le schede di sintesi sugli interventi (Tab. 7) che riportano: unità tecnologica coinvolta, indice di compatibilità/reversibilità/invasività, schema tecnologico di attuazione e riferimenti normativi, oltre a una discussione su principi di funzionamento, applicabilità, vantaggi/svantaggi/rischi e sinergie/interazioni.

Unità tecnologica	Intervento	C	R	I
Chiusure orizzontali superiori	Isolamento all'estradosso non ventilato	B	M	M
	Isolamento all'estradosso ventilato	B	M	M
	Isolamento all'intradosso	B	M	M
	Realizzazione di un camino di ventilazione	M	M	M
Chiusure verticali opache	Isolamento esterno	B	M	M
	Intonaco termoisolante esterno	B	M	M
	Isolamento interno	B	M	M
Chiusure verticali trasparenti	Sostituzione dei serramenti con modelli ad alta prestazione energetica	B	M	A
	Sostituzione dei vetri su telaio esistente	M	M	M
	Messa in opera, sul lato interno, di un secondo serramento	M	A	A
	Inserimento, sul lato interno, di una seconda lastra di vetro	M	A	B
	Isolamento e tenuta all'aria del telaio	A	A	B
	Applicazione al vetro di pellicole speciali isolanti e captanti	A	A	B
	Meccanizzazione del serramento esistente o del nuovo serramento	M	A	B
	Applicazione al vetro di pellicole a controllo solare	A	A	B
	Installazione di schermi interni	M	A	B
	Installazione di schermi esterni	B	M	A
	Applicazione di una mensola di luce	B	M	A
Realizzazione di una serra solare	M	M	M	
Chiusure orizzontali inferiori	Isolamento all'estradosso del solaio in corrispondenza di locali non riscaldati	B	M	M
	Isolamento all'intradosso del solaio sul terreno	B	M	M

C = Compatibilità
R = Reversibilità
I = Invasività

B = Bassa
M = Media
A = Alta

Tab. 7. Sintesi delle schede di intervento proposte nelle Linee di Indirizzo del MiBACT. Rielaborazione da [102].

4. Presentazione del caso studio

Il presente lavoro di ricerca si propone di assumere il punto di vista del gestore pubblico di patrimoni immobiliari, cercando di fornire gli strumenti per una più efficace amministrazione delle informazioni tecniche sugli edifici e per lo sfruttamento dei quadri conoscitivi esistenti, al fine di supportare le fasi di decision-making associate ai processi edilizi.

A questo scopo, per la definizione dei requisiti, la sperimentazione delle analisi e la validazione dei risultati, ci si è riferiti al caso studio del patrimonio costruito dell'Università di Pavia, che risulta di primario interesse in relazione alla sua vastità, varietà e specialmente per quanto concerne il valore storico-culturale e sociale degli edifici che comprende.

Per la bibliografia di riferimento, si rimanda ai testi di Pietro Vaccari e di Luisa Erba sulla storia dell'Università di Pavia [103, 104, 105, 106].

4.1. L'Università di Pavia

Nonostante risultasse già abitata in precedenza, Pavia è una città di fondazione romana, la cui importanza si è rinnovata nel corso dei secoli, anche grazie al suo posizionamento favorevole, a contatto con il Fiume Ticino e lungo la Via Francigena, che l'hanno resa punto di riferimento per traffici sia commerciali che culturali.

La città trova nel medioevo il suo periodo di massimo splendore, dapprima sul finire del IX secolo, con la dominazione dei Franchi di Carlo Magno e successivamente sotto il controllo dei Visconti nel '300. Proprio in questi due momenti della storia, si origina l'Università cittadina, inizialmente sotto la forma di scuola di diritto, filosofia, arti liberali e medicina, istituita dall'Imperatore Lotario nell'852 e poi con la fondazione dell'Università di Pavia, avvenuta per mano di Galeazzo II Visconti nel 1361. In principio, agli studi non era stato destinato un edificio proprio, e le lezioni si tenevano tra residenze private, conventi e palazzi comunali. Tuttavia, alla fine del '400 Ludovico il Moro decide di trasferire gli insegnamenti in una casa di Azzone Visconti, collocata al centro della città vicino all'Ospedale San Matteo. Si tratta del primo nucleo della sede che verrà poi ampliata, occupando anche i locali delle strutture adiacenti (come l'ex Monastero del Leano, l'ex ospedale San Matteo, ecc.), fino a raggiungere la configurazione dell'attuale Palazzo Centrale (Fig. 22), grazie soprattutto allo slancio fornito nel corso del '700 da parte di Maria Teresa d'Austria.



Fig. 20. Cortile delle Statue del Palazzo Centrale. Fonte: Archivio fotografico di Ateneo.



Fig. 21. Cortile delle Magnolie del Palazzo Centrale. Fonte: Archivio fotografico di Ateneo.

Fig. 22. Vista aerea del complesso monumentale di Palazzo Centrale, inserito nel tessuto urbano della città di Pavia.



Oltre alla sua sede principale, nei secoli l'Università di Pavia ha acquisito numerosi edifici del centro storico della città, riconvertendoli a funzioni collegate con le attività dell'Ateneo e promuovendo in questo modo operazioni di riqualificazione, nelle quali è possibile individuare spesso la mano di grandi protagonisti della storia dell'architettura lombarda, quali Leopoldo Pollack (1751–1806) ed Emilio Carlo Aschieri (1894–1968.).

Fra le sedi storiche attualmente in uso situate all'interno del centro della città, si citano:

- l'Orto Botanico: ex Canonica Lateranense di S. Epitaffio, assegnato dall'Università dal 1772 per alloggiarvi l'Orto Botanico dell'Università;
- Palazzo Vistarino: dimora storica della famiglia Bellisomi-Vistarino, costruita nel XVIII sec., restaurata a partire dal 2007 e ora sede di una foresteria universitaria e della Fondazione Alma Mater Ticinensis;
- Palazzo Botta: ex residenza signorile della famiglia Botta Adorno, edificata nel XVIII sec. e acquisita dall'Ateneo nel 1885 per alloggiarvi gli Istituti Biologici, è attualmente in fase di ristrutturazione con la destinazione a Polo Museale di Ateneo;
- Palazzo San Felice: ex Monastero Benedettino, fondato prima dell'anno 1000 e sviluppato fino al XX sec., recentemente acquisito dall'Ateneo e riconvertito per ospitare il Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali;
- Palazzo del Maino: ex Palazzo Bottigella, di matrice settecentesca, attualmente occupato dagli uffici amministrativi dell'Università;
- Palazzo San Tommaso: ex Monastero Benedettino, le cui prime tracce risalgono a X sec., modificato pesantemente nel corso

dei secoli, ceduto all'Ateneo negli anni '80, oggi sede di diversi Dipartimenti umanistici.

In aggiunta, in funzione della sua organizzazione del tutto particolare nel contesto italiano, il patrimonio architettonico dell'Università di Pavia non si limita alle proprie sedi istituzionali, includendo anche complessi monumentali di pregio, che ospitano collegi, il cui accesso è riservato agli studenti dell'Ateneo. Nella città sono presenti 17 collegi (tra strutture pubbliche e private), che, insieme agli edifici con destinazione d'uso universitaria, connotano fortemente l'aspetto e l'atmosfera di Pavia.

In tempi più recenti, lo sviluppo della città con la creazione di realtà urbane oltre i confini del centro storico, ha fornito l'occasione anche all'Ateneo per estendersi, costruendo edifici capaci di rispondere alle esigenze della didattica e della ricerca del XX secolo. Nelle prime periferie si trovano, dunque, altri edifici di pertinenza dell'Università, la cui edificazione è riconducibile a due importanti fasi di sviluppo della città. Negli anni '30, al di là dell'infrastruttura ferroviaria, vengono realizzati gli istituti scientifici su via Taramelli e Forlanini (Fig. 23), in prossimità del Policlinico San Matteo, inaugurato nel 1932. Infine, a partire dai primi anni '80 prende forma il polo didattico al Cravino, che dà attuazione, sebbene in modo parziale e frammentario, il piano di sviluppo disegnato dall'architetto Giancarlo De Carlo (Fig. 24).



Fig. 23. Vista del prospetto principale del Dipartimento di Fisica, su via Ugo Bassi.

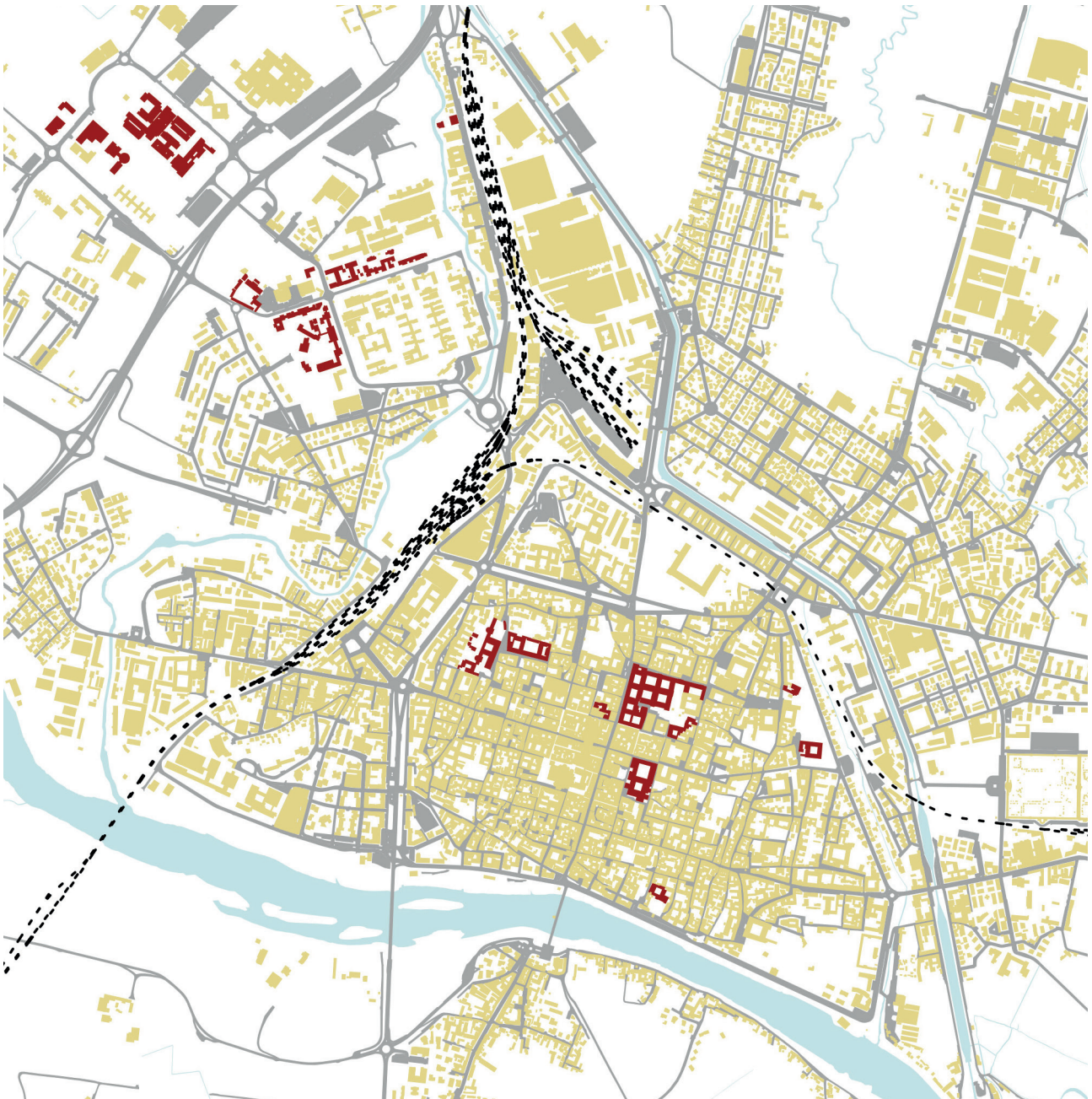


Fig. 24. Vista dell'edificio denominato "La Nave", nel polo didattico al Cravino. Fonte: Lombardia Beni Culturali.

Nel complesso, l'Università possiede e gestisce circa 230'000 m² di superficie costruita, suddivisi in tre ambiti facilmente riconoscibili (Fig. 25) [107]:

- 77'000 m² riconducibili a edifici storici, collocati all'interno del centro della città, che ospitano prevalentemente i Dipartimenti umanistici, le sedi amministrative e gli spazi di rappresentanza;
- 60'000 m² di strutture edificate fino al 1940, nella prima periferia della città intorno al Policlinico San Matteo, che alloggiavano i Dipartimenti medici e scientifici;
- 85'000 m² di superficie costruita nella nuova area di espansione al Cravino, a partire dal 1983, per ospitare i Dipartimenti tecnici e scientifici.

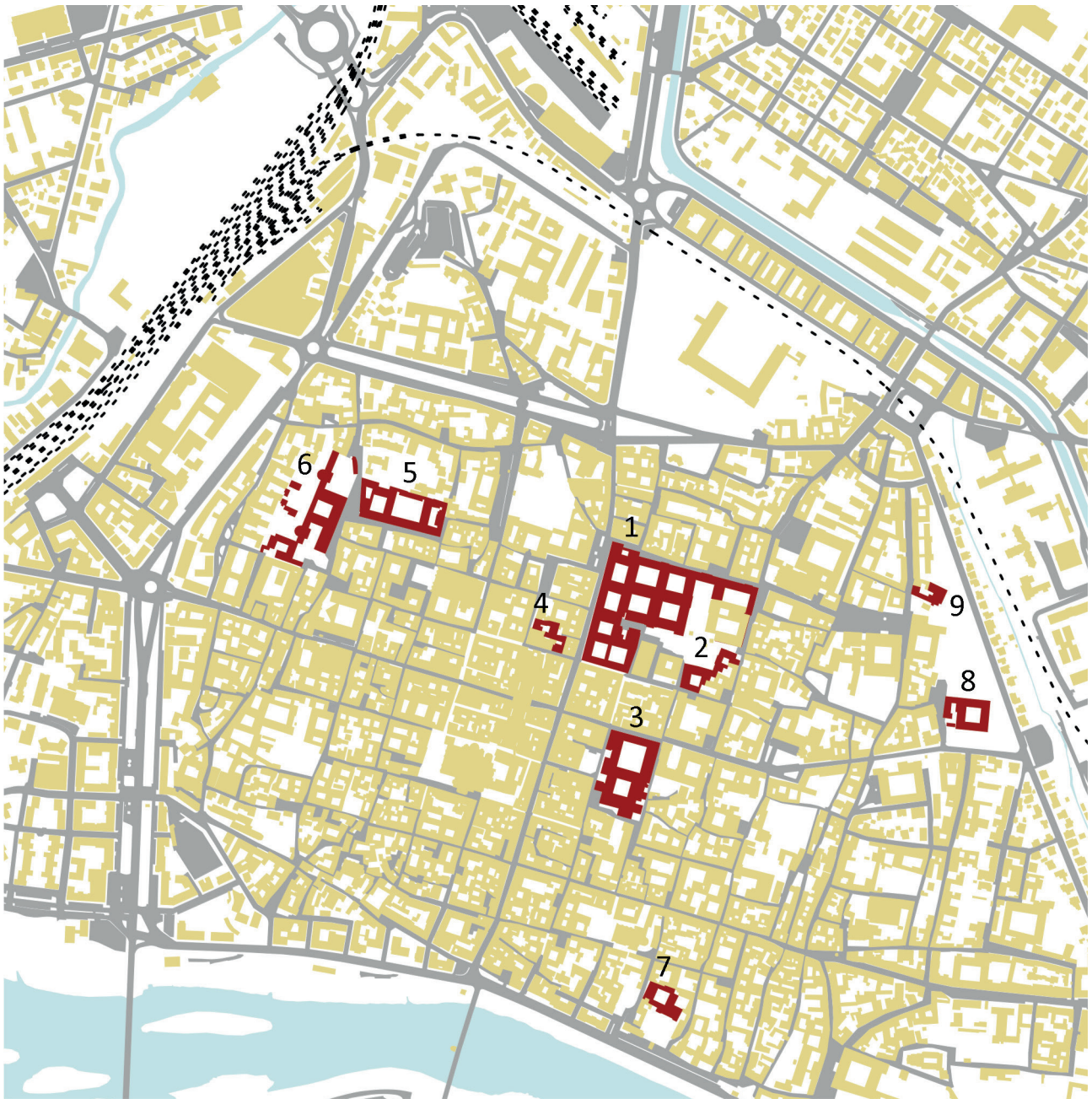
Fig. 25. La città di Pavia, con evidenziati in rosso gli edifici dell'Università. Scala 1:20000.



Volendosi confrontare anche con il tema dell'intervento sugli edifici storici, la presente ricerca utilizza come caso studio il primo di questi tre raggruppamenti, occupandosi a diverse scale di indagine del centro storico della città di Pavia, dei nove edifici dell'Università siti al suo interno e attualmente in uso e, in particolare, di due di essi allo scopo di eseguire analisi più approfondite. La natura degli edifici coinvolti e il loro rapporto con la città storica e con la comunità che la abita li rende un soggetto di studio estremamente interessante, che consente di mettere in luce il panorama di complessità che caratterizza la gestione energetica del costruito e i relativi scenari di riqualificazione.

Fig. 26. Il centro storico di Pavia, con evidenziati in rosso gli edifici dell'Università. Scala 1:10000.

1. Palazzo Centrale
2. Palazzo del Maino
3. Palazzo S. Tommaso
4. Area ex. INPS
5. Palazzo S. Felice
6. Palazzo Botta
7. Palazzo Vistarino
8. Orto Botanico
9. Ex area Ponzio



PARTE 1

UN DATABASE SPAZIALE PER LA GESTIONE DELL'INFORMAZIONE TECNICA SUI PATRIMONI EDILIZI

1. Il ruolo dell'informazione tecnica nel processo edilizio

La costruzione è una delle attività più antiche che l'uomo abbia intrapreso e, conseguentemente, il settore produttivo edile si fonda su riferimenti e regole che pongono le loro basi in un passato ormai lontano. Le certezze dell'industria delle costruzioni si sono basate a lungo sulla regola dell'arte, su una manualistica solida ma statica e sulla capacità di trasmissione delle conoscenze condivise fra generazioni di operatori nel settore. A partire dal secolo scorso, però, le importanti innovazioni apportate nel mondo di materiali e la nascita e la diffusione delle tecnologie informatiche hanno portato a un rapido invecchiamento dei processi consolidati nell'ambito dell'industria delle costruzioni. La crescita esponenziale delle possibilità legate alla progettazione e il derivante incremento di complessità nella sua attuazione richiedono oggi un adeguamento degli strumenti e dei processi dell'industria AEC (Architecture Engineering and Construction), il cui ritardo è in parte legato alla pesante recessione del mercato edile a cui stiamo assistendo.

Il focus del problema si può individuare nel fatto che le nuove complessità hanno messo in crisi il sistema di convenzioni che sussisteva fra gli attori del processo edilizio, accordi tutt'altro che semplici la cui buona riuscita dovrebbe essere supportata da sistemi di comunicazioni unitari, capaci di superare i difetti dell'espressione spontanea, carica di lacune, incomprensioni e ridondanze. Nell'ambito di un processo produttivo, infatti, la comunicazione, e quindi le informazioni che essa veicola, deve essere ben strutturata così da risultare unica e non ridondante, certa e condivisa fra tutti gli attori coinvolti [108].

L'obiettivo è di difficile realizzazione, ma di primaria importanza per promuovere un nuovo sviluppo del settore delle costruzioni e il primo passo è quello di spostare il significato di progetto da atto creativo a processo di coordinamento incentrato sulla comunicazione efficace dell'informazione tecnica [109].

Come afferma Kalay [110], la progettazione architettonica è un processo incentrato sull'informazione, che, procede analizzando le caratteristiche di uno stato dei luoghi e proponendo nuove soluzioni migliorative rispetto a quelle esistenti. A questo scopo, occorre innanzitutto raccogliere e organizzare un set di informazioni di input, che possono provenire da molteplici fonti, e, successivamente, produrne di nuove, definite al fine di rappresentare e simulare gli effetti previsti dal progetto e valutarne gli impatti.

Tutto ciò è volto al raggiungimento di un'effettiva progettazione integrata, ossia di uno scenario di lavoro in cui la naturale

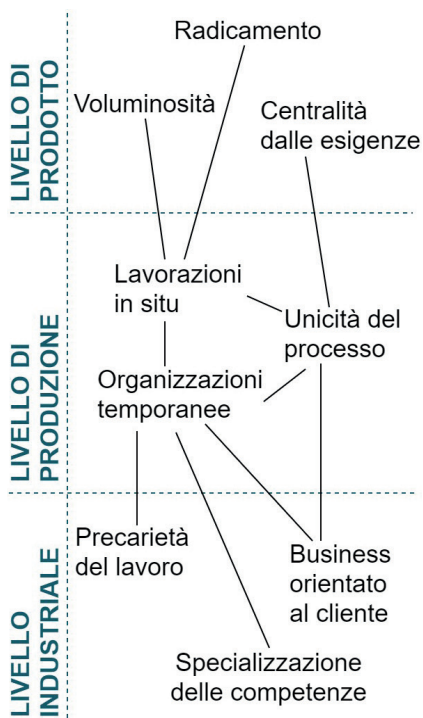


Fig. 27. Le peculiarità dell'industria delle costruzioni e le loro relazioni. Rielaborazione da [112].

multidisciplinarietà del processo edilizio viene considerata e valorizzata per tutto il ciclo di vita dell'edificio e, in particolare, a partire dalle primissime fasi della progettazione. Si tratta di un approccio metodologico volto al raggiungimento della massima qualità attraverso l'identificazione di una sintesi di tutte le istanze tematiche che insistono sul progetto, che procede mediante la definizione dell'organismo edilizio concepito come un unico oggetto, sebbene composto da innumerevoli componenti che funzionano in sinergia [111]. Nella realizzazione di tale obiettivo, le figure professionali coinvolte sono chiamate a cooperare in un processo decisionale iterativo guidato da una logica orientata alle prestazioni.

In questo frangente, il confronto con quanto è avvenuto negli altri settori produttivi fa apparire lampante il ritardo che caratterizza lo sviluppo tecnologico dell'industria delle costruzioni. Tuttavia, nonostante esistano ampi margini di miglioramento, un paragone diretto non è appropriato in quanto, nonostante l'impatto che le rivoluzioni industriali e digitali hanno avuto sul modo di costruire e assemblare i beni immobili, è innegabile la natura particolare del processo edilizio, che è caratterizzato dalla produzione di oggetti unici, altamente influenzati dalle condizioni al contorno e la cui fase di costruzione si fonda su aggregazioni temporanee di soggetti economici e si protrae nel tempo in modo significativo. In questa direzione, al fine di comprendere le peculiarità del settore delle costruzioni, un'analisi di particolare rilievo è stata svolta da Vrijhoef & Koskela [112], che studiano separatamente i fattori correlati al tipo di prodotto (voluminosità, radicamento e centralità delle esigenze), al tipo di industria (precarietà del lavoro, specializzazione delle competenze e logica di business incentrata sul cliente) e al tipo di produzione (lavorazioni in situ, organizzazioni temporanee, processo unico) (Fig. 27). Secondo gli autori, le caratteristiche sopra elencate provocano un appesantimento del settore delle costruzioni e risultano talmente radicate nel processo edilizio da essere quasi impossibili da risolvere. Tuttavia, una migliore organizzazione dei processi in un'ottica di integrazione delle fasi di lavoro e dei soggetti coinvolti, a fianco all'impiego di nuove tecnologie e sistemi costruttivi, possono portare a una sensibile riduzione degli effetti negativi sul bilancio complessivo.

1.1. L'approccio tecnologico all'edificio

Il settore AEC si differenzia dagli altri ambiti industriali per il fatto di trattare pezzi unici, la cui produzione richiede la partecipazione di una pluralità di figure professionali e l'impiego di molteplici strumenti. Questa considerazione introduce l'esigenza di dotarsi efficaci sistemi di coordinamento, la cui attuazione passa per la definizione di linguaggi comuni e privi di ambiguità [113].

Le caratteristiche morfologiche, funzionali e costruttive degli elementi tecnici sono, infatti, centrali per il raggiungimento di una conoscenza critica degli organismi edilizi, inoltre, esse costituiscono anche un vocabolario per codificare gli elementi architettonici e le loro relazioni [114].

Il tema della scomposizione del sistema edilizio, e quindi della costruzione di una struttura ordinata e organica che ne definisca la relazione fra le parti, nasce all'inizio del '900 con la didattica degli elementi costruttivi e la stesura dei primi manuali tecnici e si sviluppa a partire dagli anni '30, quando la diffusione di nuove tecnologie attiva la necessità di disporre di descrizioni funzionali degli elementi dell'organismo edilizio [115].

In questa direzione, "A Master List of the properties of building materials and products" pubblicato dal CIB (Conseil International du Bâtiment) nel 1964 [116] è il precursore dei codici per la classificazione degli elementi tecnici che seguiranno. Pur non trattandosi di un vero sistema di classificazione, infatti, il documento si occupa di definire un set di indicatori prestazionali condiviso, per la strutturazione dell'informazione tecnica legata al processo edilizio [117], fornendo una prima normalizzazione delle descrizioni di materiali e prodotti.

Da questo primo spunto comincia lo sviluppo di una serie di sistemi di classificazione, ovvero schemi concettuali capaci di rappresentare le entità coinvolte in un dominio di conoscenza raggruppandole in contenitori omogenei secondo criteri espliciti e descrivendo le relazioni che intercorrono fra di essi.

In base alla struttura delle classificazioni, esse si suddividono fra la tipologia gerarchica e quella a faccette [118]. Il primo gruppo si fonda sulla suddivisione di categorie generali in sottoclassi che si fanno progressivamente più specifiche, procedendo attraverso un diagramma ad albero. La rappresentazione della realtà viene ampiamente semplificata, portando il vantaggio di una immediata comprensibilità, ma implicando anche un eccessivo appiattimento nel caso di classificazioni di domini complessi.

Sono sistemi di classificazione gerarchici UniFormat e MasterFormat, due schemi sviluppati negli USA rispettivamente dall'AIA (American Institute of Architects) e dal CSI (Construction Specifications Institute).

Nel contesto italiano, il sistema di classificazione standard più diffuso è di tipo gerarchico ed è stato definito con la norma UNI 8290-1:1981 [119]. Lo standard si occupa della classificazione del sistema tecnologico dell'edificio e, sebbene faccia riferimento esplicito alla tipologia residenziale, la sua applicazione è stata estesa a tutti i campi del settore delle costruzioni.

Il testo va letto all'interno di un sistema di norme più ampio (Tab. 8), che fa riferimento all'approccio esigenziale-prestazionale alla progettazione: una teoria che si applica all'ambito edile dagli anni '60 [120] e che definisce un processo di riconoscimento delle esigenze dell'utenza, da esprimersi

CODICE	NOME
UNI 8289:1981	Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione. (in vigore)
UNI 8290-1:1981 + A122:1983	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia. (in vigore)
UNI 8290-2:1983	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti. (in vigore)
UNI 8290-3:1987	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti. (in vigore)
UNI 7867-1:1978	Edilizia. Terminologia per requisiti e prestazioni. Nozioni di requisito e di prestazione (sostituita da UNI 10838:1999)
UNI 10838:1999	Edilizia - Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia. (in vigore)

Tab. 8. Norme tecniche UNI sul tema della gestione del processo edilizio.

attraverso requisiti progettuali che possono essere posti in confronto con le prestazioni degli elementi tecnici, al fine di raggiungere determinati livelli di qualità.

La classificazione si fonda su una scomposizione dell'organismo edilizio in tre livelli che identificano "classi di unità tecnologiche", "unità tecnologiche" e "classi di elementi tecnici". Un quarto livello di approfondimento, sebbene non definito, è previsto per consentire un'ulteriore espansione. La logica che sottende lo schema di classificazione segue quella delle opere compiute, con lo scopo principale di agevolare la computazione delle quantità e la stima dei costi.

La scomposizione a faccette (o multidimensionale [121]), invece, parte dall'individuazione di proprietà invariabili delle entità, che possono essere utilizzate come categorie di classificazione. In questo modo, è possibile riconoscere più chiavi di lettura della realtà che si sta analizzando e, quindi, definire gli stessi oggetti sotto diversi punti di vista. Tali tipologie di sistemi sono solitamente organizzate in tabelle, ciascuna delle quali costituisce a sua volta uno schema classificatorio. Risulta esplicativa la considerazione che, in alcuni casi, un sistema gerarchico costituisce una faccetta di un sistema multidimensionale, come accade per UniFormat e MasterFormat, che vengono incorporati nello standard OmniClass, di cui costituiscono due tabelle.

Nel caso della classificazione del sistema edilizio, l'impiego di un sistema a faccette offre l'opportunità di riflettere la natura multidisciplinare del settore e di identificare univocamente elementi individuandoli da diverse prospettive.

Sono sistemi di classificazione a faccette UniClass e OmniClass, il primo emesso dalla NBS (National Building Specification) inglese e il secondo dal CSI americano.

Al fine della presente ricerca, in considerazione degli strumenti utilizzati e degli obiettivi specifici, l'ampio lavoro di revisione presente in letteratura [122, 123, 124], ha consentito di individuare OmniClass come il sistema preferibile da implementare per la classificazione dell'organismo edilizio.

OmniClass risulta allo stato attuale il più completo e operabile fra i sistemi di classificazione, in quanto:

- Prende in considerazione tutti gli elementi che partecipano al ciclo di vita dell'edificio ed è quindi adatto alla trattazione di problemi fondati sull'LCA (Life Cycle Assessment);
- È compatibile con altri sistemi di classificazione e modelli dati per la gestione del processo edilizio, in quanto basato sullo standard ISO 12006-2;
- È uno schema espandibile e in continuo aggiornamento che si adatta allo sviluppo del settore delle costruzioni;
- Risulta di facile comprensione per gli utenti grazie alla disposizione di un'ottima interfaccia, pur utilizzando codici esclusivamente numerici che lo rendono facilmente gestibile da parte di strumenti informatici.

In particolare, delle 16 tabelle che compongono lo standard (Tab. 9) ne verranno utilizzate 3: la Tabella 21 per l'individuazione degli elementi dell'organismo edilizio, la Tabella 41 per la descrizione dei materiali e la Tabella 49 per il riconoscimento delle proprietà di entrambi.

Come ulteriore sviluppo, il tema della costruzione di strutture dati ampiamente condivisibili fra soggetti e macchine coinvolti nel processo edilizio diventa centrale negli ultimi decenni, quando la diffusione di soluzioni informatiche prima per il disegno assistito da computer (CAD) e poi per la modellazione informativa (BIM) accendono il dialogo sull'interoperabilità [125]. Nell'ambito della definizione di strumenti di coordinamento per il settore delle costruzioni, un passo oltre i sistemi di classificazione viene fatto da BuildingSMART, l'evoluzione della International Alliance for Interoperability (IAI), che ha teorizzato un insieme di standard per la gestione dei processi edilizi basati sulla modellazione informativa interoperabile. Nel dettaglio, il sistema è composto da diversi standard il cui stato è in continua evoluzione [126, 127], tra cui:

- IFC (Industry Foundation Classes) ISO 16739: un modello dati gerarchico e semantico per la condivisione dei dati nell'industria delle costruzioni e la classificazione degli elementi dell'organismo edilizio. IFC si concretizza in un formato file aperto che è diventato il riferimento per l'open BIM;
- IDM (Information Delivery Manual) ISO 29481: un manuale volto a definire un flusso di lavoro condiviso fra gli attori operanti nel settore AEC e a descrivere le caratteristiche che devono avere i software che lo supportano. La finalità di questo standard è assicurare che ciascun soggetto coinvolto nel processo disponga delle informazioni necessarie per svolgere la sua funzione;
- bSSD (buildingSmart Data Dictionary): una libreria aperta e collaborativa l'individuazione univoca a dei termini legati al processo edilizio e al ciclo di vita dell'edificio, progettata in relazione alle entità individuate dal modello IFC;
- BCF (BIM Collaboration Format): un sistema di comunicazione basato sullo scambio di informazioni in formato XML (eXtensible

TAB	NOME
11	Entities by function
12	Entities by form
13	Spaces by function
14	Spaces by form
21	Elements
22	Work results
23	Products
31	Phases
32	Services
33	Disciplines
34	Organizational roles
35	Tools
36	Information
41	Materials
49	Properties

Tab. 9. Elenco delle tabelle che compongono lo standard di classificazione OmniClass..

Markup Language), capace di referenziare le informazioni alle entità e alle viste dei modelli;

- MVD (Model View Definition): una serie di sottoschemi di IFC, definiti dagli utenti e validati da buildingSMART, pensati per la definizione e il trasferimento di modelli tematici.

1.2. Le opportunità dell'ICT

L'avvento delle tecnologie informatiche ha modificato in modo radicale i modi di lavorare e di produrre a livello mondiale. Tuttavia, mentre alcune tipologie di industria, che nascevano e si sviluppavano negli stessi anni della rivoluzione digitale, hanno accolto e incorporato fin dalla loro origine le soluzioni ICT (Information and Communications Technology), altri settori più tradizionali hanno faticato a modificare le proprie routine. E' questo il caso del settore AEC, che si è dimostrato particolarmente reticente all'accoglienza delle tecnologie informatiche nei propri processi ed ha cominciato ad adottare solo di recente soluzioni tecnologiche che includono l'uso massiccio delle ICT [128].

Così come in tutti gli altri settori dell'industria, l'introduzione delle tecnologie informatiche nel mondo delle costruzioni può essere attuata in due modi sostanziali. Nel primo caso, soluzioni computer-based vengono affiancate e sostituite agli strumenti tradizionali del processo edilizio, senza modificare i consueti flussi di lavoro. Un esempio in questa direzione si può certamente riscontrare nell'adozione di software CAD (Computer Aided Design), che vengono utilizzati in alternativa agli strumenti tradizionali del disegno per preparare rappresentazioni grafiche bidimensionali. In questo scenario, si verificano vantaggi marginali che hanno principalmente a che fare con la velocità di produzione degli elaborati. Nel secondo caso, invece, si assiste a un ripensamento dei processi produttivi in funzione della messa a disposizione delle nuove tecnologie. Questa possibilità mette in gioco una catena di azioni e reazioni molto più ampia, che deve svilupparsi in modo coordinato fra i soggetti coinvolti nel processo edilizio e con il supporto degli enti preposti a legiferare su di esso, in modo da creare un nuovo contesto in cui l'adozione delle soluzioni informatiche costituisce uno dei mezzi per raggiungere la definizione di flussi di lavoro globalmente più intelligenti.

L'attenzione della presente ricerca si focalizza sul secondo dei due orizzonti, che mira a una rivoluzione tecnologica capace di influenzare il modo di processare e trasmettere le informazioni. Questo tipo di trasformazione ha il potere di modificare l'attuale processo strettamente gerarchico in un network di operazioni equipollenti, di mutare le modalità di accesso alle informazioni e i processi decisionali da un modello sequenziale ad uno

interlacciato e di ottenere così una globale riduzione dei costi di produzione senza che vi siano compromessi in relazione alla qualità [110].

Tale teoria è stata introdotta già nel 1998, in un rapporto sull'industria delle costruzioni commissionato dal governo britannico [129], che vede nell'applicazione delle tecnologie informatiche all'edilizia uno dei possibili motori per il ripensamento dell'intero processo, prendendo come riferimento gli esempi virtuosi riscontrabili in altri settori industriali.

In generale, i vantaggi che si possono trarre da un'innovazione tecnologica che include l'utilizzo di soluzioni ICT si distribuiscono su tutte le fasi del processo edilizio e includono [130, 131, 132, 133, 134]:

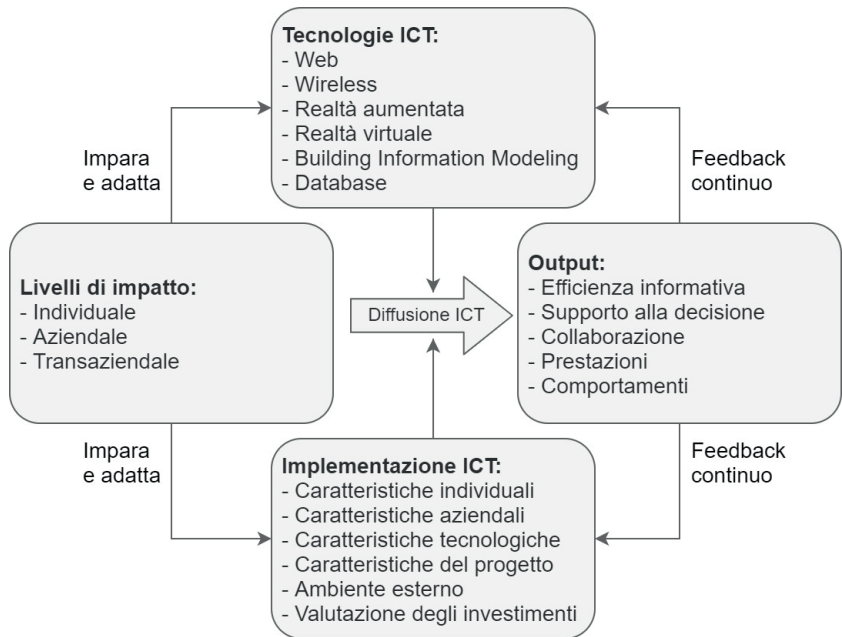
- Migliore comunicazione a tutti gli stadi del processo e con riferimento a tutti gli attori coinvolti (considerando sia figure professionali che gli utenti finali);
- Maggiore accuratezza e affidabilità in relazione ai dati di input/output;
- Raggiungimento di un maggior grado di integrazione in un'ottica di gestione multidisciplinare;
- Anticipazione delle problematiche verso le fasi preliminari del processo, con conseguente migliore possibilità di riposta;
- Riduzione dei costi di progettazione, costruzione e conduzione a parità di qualità;
- Contrazione dei tempi legati al raggiungimento degli obiettivi;
- Incremento del controllo e della trasparenza nei processi.

Tuttavia, ricerche compiute all'inizio del nuovo millennio sulla base dell'analisi di un numero elevato di progetti reali, condotti con diversi gradi di informatizzazione, dimostrano che i benefici che l'industria delle costruzioni può trarre dall'implementazione dei sistemi informatici, siano essi correlati a una maggiore qualità o a un minor costo, non dipendono direttamente dall'adozione delle nuove tecnologie, bensì dal loro sfruttamento nell'ambito di un rinnovamento dei processi correlati [135].

Dal punto di vista della ricerca scientifica, il tema dell'implementazione degli strumenti ICT nel mondo delle costruzioni ha ricevuto molte attenzioni negli ultimi decenni. Un'estensiva review pubblicata nel 2014 [136], che prende in considerazione 145 studi emessi fra il 1998 e il 2012, dimostra un interesse crescente, in particolare in relazione agli impatti sui sistemi di comunicazione e di trasmissione delle informazioni tecniche. Gli autori individuano inoltre uno schema per la rappresentazione del contesto, adattato da quello proposto da Dewett e Jones [137] per modellizzare il ruolo delle tecnologie informatiche nelle organizzazioni. Il diagramma (Fig. 28) mette in relazione tutte le questioni salienti che riguardano la diffusione e l'impiego dei sistemi ICT, dai tre livelli di impatto in relazione

all'adozione (individuale, interna all'organizzazione e trasversale a più organizzazioni), passando per la rosa di possibili tecnologie che possono essere implementate e per le caratteristiche di tutti i fattori coinvolti nei processi, fino ad arrivare alle classi di possibili risultati sulle organizzazioni.

Fig. 28. Schema del contesto di applicazione delle ICT al settore AEC. Rielaborazione da [136].



2. Analisi dei requisiti

Si è già evidenziato come la gestione degli asset immobiliari, e in particolare la definizione di strategie per un loro sviluppo sostenibile, siano tematiche fortemente multidisciplinari nelle quali si intrecciano le esigenze e i punti di vista di una pluralità di portatori di interesse. Al fine di realizzare un modello di esercizio efficace, è necessario adottare approcci integrati che consentano di non perdere di vista gli obiettivi coordinati nel perseguimento degli interessi di tutte le classi di utenza coinvolte [138]. La gestione di un sistema tanto eterogeneo, la cui area di influenza si estende dal livello territoriale a quello dell'edificio, richiede la definizione di archivi accessibili a diversi livelli e l'implementazione di strumenti multiscalari all'interno dei quali problemi comuni possano trovare soluzioni condivise.

In aggiunta, con l'incremento della complessità legata alla gestione dei beni immobili, sta crescendo anche il volume di informazioni da trattare, rendendo il tema della modellazione e dell'archiviazione dei dati centrale per il successo dei processi [139]. Allo stesso tempo, la diffusione di tecniche di rilievo digitale e i miglioramenti fatti nel campo dell'elaborazione dati per la costruzione di modelli tridimensionali hanno fornito gli strumenti per definire modelli informativi la cui utilità va oltre la visualizzazione e la navigazione dei contenuti [140]. Grazie alle tecnologie informatiche recentemente acquisite, è possibile definire archivi digitali in cui l'informazione viene specificata anche a livello semantico in modo esplicito e condiviso, cosicché le informazioni possano essere universalmente comprese e correttamente interpretate [141].

Nel seguito si discutono i requisiti che un sistema informativo per la gestione energetica degli asset immobiliari dovrebbe soddisfare. Per praticità di comunicazione, gli elementi rinvenuti sono stati aggregati in quattro classi che possono parzialmente sovrapporsi nel caso in cui un singolo requisito sia visto da più prospettive, secondo quanto illustrato in Fig. 29. In Tab. 10 si riportano, invece, i criteri individuati in studi recenti che affrontano problematiche assimilabili a quelle qui presentate.

2.1. Classe 1: Replicabile/Standardizzato/Aperto/Interoperabile

Affinché gli strumenti in fase di definizione siano replicabili oltre i casi studio qui presentati e mantengano la loro efficacia a prescindere dal contesto territoriale e nazionale in cui vengono applicati, è indispensabile che essi siano definiti a partire da informazioni facilmente reperibili, che si basino su codici, piattaforme e metodologie standard e che, per quanto possibile, impieghino risorse di tipo aperto.

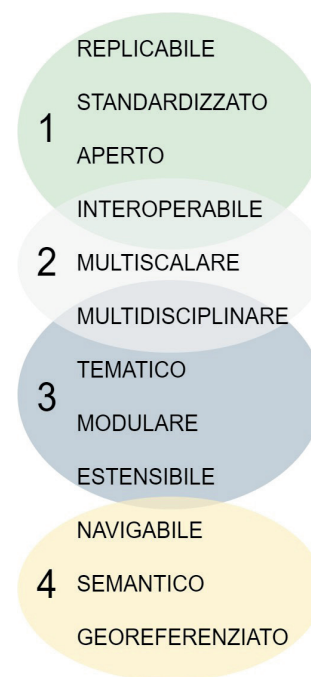


Fig. 29. Le quattro classi di requisiti individuate per la definizione di sistemi informativi utili per la gestione energetica di asset immobiliari.

	Egusquiza et al., 2014 [7]	Costamagna and Spanò, 2012 [114]	Wust et al., 2004 [143]
Ambito di applicazione	Centri storici	Patrimonio architettonico	Patrimonio archeologico e architettonico
Multi-utente	x		
Multi-rappresentazione		x	x
Semantico	x	x	x
Interoperabile	x		
Standard	x	x	
Aperto	x	x	
Multi-scalare	x	x	x
Navigabile in 3D	x	x	x
Modulare	x	x	
Multidisciplinare		x	

Tab. 10. Criteri selezionati da tre ricerche sulla realizzazione di sistemi informativi di gestione del costruito.

La necessità di dotarsi di linguaggi comuni per la gestione e la comunicazione dei dati spaziali è stata esplicitata in sede di Commissione Europea con la Direttiva INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe) 2007/2/EC [142], che intende fissare un'infrastruttura condivisa per supportare le politiche ambientali, superando i limiti che sono spesso determinati da confini regionali o nazionali. In tale occasione è stato definito anche un modello dati, compatibile con le strutture definite dal pacchetto di norme tecniche ISO 19100 (Geographic Information Standards), che specificano metodi strumenti e servizi per la gestione dei dati geografici.

L'impiego di formati standard nel contesto di sistemi informativi spaziali offre, infatti, importanti vantaggi, permettendo di capitalizzare al meglio le informazioni raccolte grazie a una maggiore adattabilità a contesti geografici differenziati e alla riduzione del rischio dato dalla possibile ambiguità delle comunicazioni. Inoltre, sul piano temporale, l'uso degli standard è riconosciuto come fondamentale per assicurare impatti a lungo termine degli strumenti proposti [7]

Come punto di partenza, i dati di input per la realizzazione dei modelli dovrebbero provenire da sorgenti pubblicamente disponibili nel contesto europeo, e, infatti, il problema della scarsa accessibilità alle informazioni è attualmente riconosciuto dalla comunità scientifica come una delle limitazioni più stringenti per lo sviluppo di modelli urbani. Solo una disseminazione di dati in formato aperto e gratuito può permettere a parti terze di realizzare strumenti e servizi da utilizzarsi nell'interesse comune per comprendere al meglio le dinamiche complesse di problemi in ambito energetico [144].

Nel caso presente, occorrerà quindi individuare su scala

comunitaria e nazionale banche dati pubbliche che contengano informazioni sulle caratteristiche geometrico-spaziali e sulle proprietà energetiche del patrimonio costruito.

Ciò che si applica per i dati di input vale per tutte le fasi di realizzazione, gestione e utilizzo degli strumenti informatici che si vogliono definire, pertanto anche i modelli dati e i linguaggi utilizzati dovranno essere il più possibile di tipo aperto e standardizzato. Al fine di sviluppare processi basati su modelli dati standard, è utile riferirsi alle organizzazioni internazionali che trattano di interoperabilità e di standardizzazione dell'informazione nel settore AEC, focalizzando l'attenzione sulle soluzioni aperte ed estensibili.

In ambito GIS (Geographic Information System), l'Open Geospatial Consortium (OGC) è la principale risorsa di modelli per la codifica delle informazioni spaziali. Gli standard definiti da OGC sono estremamente completi e versatili in quanto, essendo basati sul linguaggio di markup XML, consentono di implementare estensioni personalizzate a seconda delle necessità specifiche [114].

Alla scala dell'edificio, BuildingSMART è l'organizzazione che si occupa dei protocolli per l'open BIM (Building Information Modeling). Come si è già visto il suo modello di coordinamento punta alla standardizzazione di modelli dati, termini e processi.

Infine, per quanto riguarda le metodologie e i processi di calcolo, occorre che tutti i riferimenti siano referenziati a standard condivisi a livello internazionale, ossia definiti dal CEN (European Committee for Standardization) ed eventualmente recepiti da normative tecniche nazionali emesse dall'UNI (Ente nazionale italiano di unificazione).

Ciò assume massima rilevanza quando viene applicato agli strumenti di decision-making, qualora si voglia pensare a modelli esportabili e confrontabili prescindendo dai contesti di applicazione. Sebbene, infatti, molte ricerche procedano alla definizione di strumenti propri per la valutazione di alternative di progetto [145], si ritiene che metodi codificati e standardizzati possano avere maggiore successo in termini di divulgazione.

2.2. Classe 2: Interoperabile/Multiscalare/Multidisciplinare

L'ambiente costruito è caratterizzato da un continuum spaziale che va dal contesto geografico/territoriale al dettaglio costruttivo e che, di conseguenza, intercetta tematiche anche molto diversificate tra loro. Pensare a una gestione integrata dei patrimoni edilizi esistenti non può, quindi, prescindere da una visione multipla della realtà, capace di immagazzinare e restituire informazioni differenziate ma coerenti a qualsiasi livello

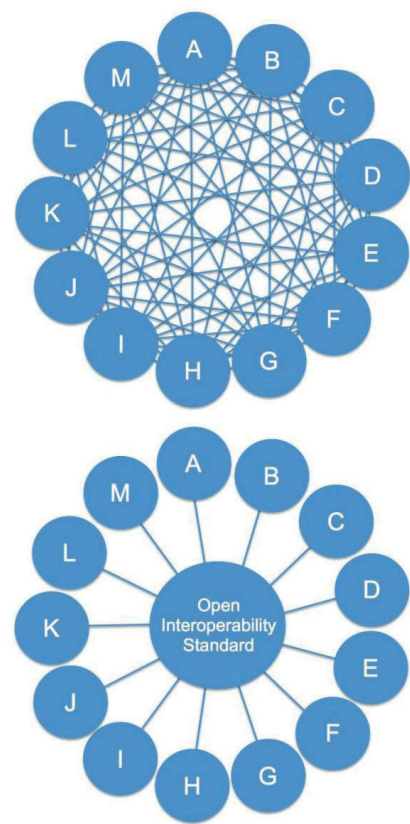


Fig. 30. Rappresentazione schematica della differenza fra l'approccio di scambio delle informazioni con traduttori diretti e quello con standard aperti per l'interoperabilità [146].

di indagine.

A questo scopo, un database multi-scalare consente la rappresentazione del medesimo fenomeno a diversi gradi di precisione, accuratezza e risoluzione, [147], operando mediante la separazione di entità geometriche e record informativi in livelli di dettaglio basati sul loro valore semantico [114].

Generalmente, la ragione per progettare una rappresentazione multiscalare ha a che fare con l'efficienza della visualizzazione: dettagli che non sarebbero apprezzabili a scale territoriali non vengono caricati quando si è a grande distanza dagli oggetti, ma appaiono progressivamente avvicinandosi. Tuttavia, per gli scopi di questo lavoro, si applica principalmente una motivazione diversa, relativa all'efficienza delle analisi. Riportando un esempio citato Kholbe in un articolo sull'opportunità di generare modelli urbani polivalenti [148], l'operazione di conteggio degli edifici presenti in una città può essere effettuata con maggiore profitto se si considera ciascuno di essi un'entità, in confronto al caso in cui ogni costruzione è registrata come un'aggregazione di una moltitudine di oggetti da ricondurre alla singola voce dell'edificio ad ogni iterazione di calcolo.

La disposizione di modelli multiscalarari permette, inoltre, di superare alcuni problemi di gestione riscontrabili nei sistemi di FM (Facility Management) e CM (Construction Management) attualmente disponibili, poiché il coordinamento di modelli generali e specifici in un'unica piattaforma riduce l'onere di calcolo a carico dei componenti hardware e garantisce la coerenza dell'informazione [149].

Grazie a questa opportunità, si può pensare che in un contesto territoriale vasto, informazioni a basso livello di dettaglio coprano l'intera area, mentre approfondimenti siano disponibili solo per alcune zone o edifici selezionati. In questa evenienza, una procedura chiamata a eseguire determinate analisi potrà operare utilizzando i dati più generici ed integrando quelli più specifici dove sono disponibili.

Allo stesso modo, gli strumenti di indagine possono essere progettati per funzionare in modo differenziato quando attivati su livelli di dettaglio diversi. Si pensi al caso delle analisi energetiche, che possono essere svolte in modo progressivamente più approfondito quando si arricchisce il set di informazioni che descrive un edificio.

In ambito energetico, infatti, il tema della multiscalarità assume un significato ancora più centrale. Negli ultimi 20 anni un numero crescente di studi ha cercato di comprendere quale sia la scala di azione più efficace per la pianificazione di politiche volte al risparmio energetico. Il risultato, come riportato da [150], è che la complessa relazione che intercorre fra le trasformazioni nell'uso del suolo, i cambiamenti climatici e i fabbisogni energetici può essere compresa solo se guardata trasversalmente, con

un approccio che conduce dal livello globale a quello locale (Fig. 31). Con questa finalità, a supporto delle fasi decisorie del processo edilizio, i sistemi informativi multiscalarari consentono di effettuare una connessione fra il livello urbano/territoriale, a cui vengono prese le decisioni strategiche, e quello edile, dove si determinano le scelte operative [7], garantendo la migliore prospettiva possibile sui problemi e sulle opportunità di sviluppo.

In questo contesto, la creazione di database spaziali capaci di descrivere l'ambiente costruito a tutte le scale, facendo uso congiunto di strumenti di modellazione informativa quali GIS e BIM, può costituire un valido strumento per il conseguimento di processi di decision-making più consapevoli ed efficaci.

L'importanza dell'integrazione fra BIM e GIS è già stata ampiamente riconosciuta come un'opportunità per raggiungere la definizione di flussi di lavoro multiscalarari nel contesto dei processi edilizi [151]. Nonostante i due sistemi siano stati progettati per finalità differenti, il GIS per la gestione di grandi moli di dati in relazione all'ambiente naturale e costruito e il BIM per la rappresentazione dettagliata di nuovi edifici, è possibile riscontrare diversi punti di contatto fra i due. Inoltre, proprio per l'attitudine a rappresentare la realtà a diverse scale, essi possono essere riconosciuti come strumenti complementari [152], adatti a supportare un flusso di lavoro multiscalarare in un contesto di interoperabilità, dove è essenziale muoversi dal generale al particolare e viceversa senza perdere il controllo e la coerenza delle informazioni (Fig. 31).

Tuttavia, al momento si rileva una mancanza di strumenti capaci di collezionare ed armonizzare informazioni sull'ambiente costruito provenienti da diverse sorgenti, principalmente a causa di un problema persistente di mancanza di interoperabilità fra GIS e BIM [151]. In particolare, strumenti che permettono lo scambio delle informazioni tra le piattaforme sono disponibili, ma non è ancora stata codificato un processo efficace di interoperabilità basata sulla semantica [154]. L'integrazione di BIM e GIS in un ambiente comune, che si colloca un passo avanti rispetto alla possibilità di importare ed esportare dati in piattaforme proprietarie, offrirebbe l'opportunità di sfruttare i punti di forza di entrambi i sistemi informativi [155], consentendo una vasta gamma di applicazioni.

2.3. Classe 3: Multidisciplinare/Tematico/Modulare/Estensibile

Nella definizione di un sistema informativo volto alla conoscenza e al miglioramento delle prestazioni di insiemi di edifici appartenenti all'ambiente costruito, il tema della capitalizzazione dell'informazione assume un ruolo centrale. L'intero processo è intrinsecamente pensato per aggregare e

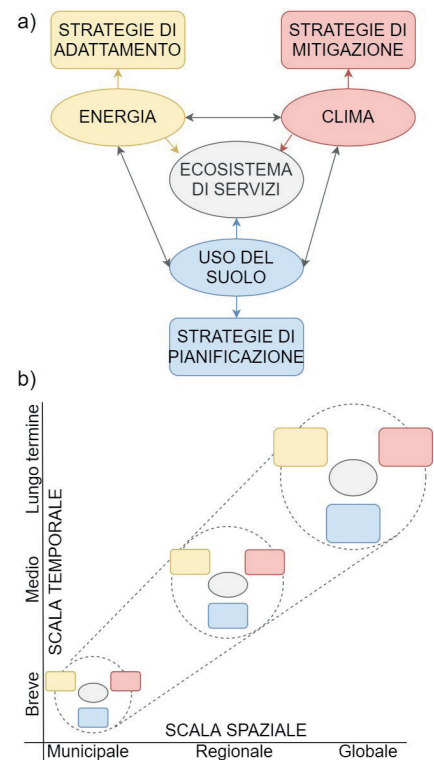
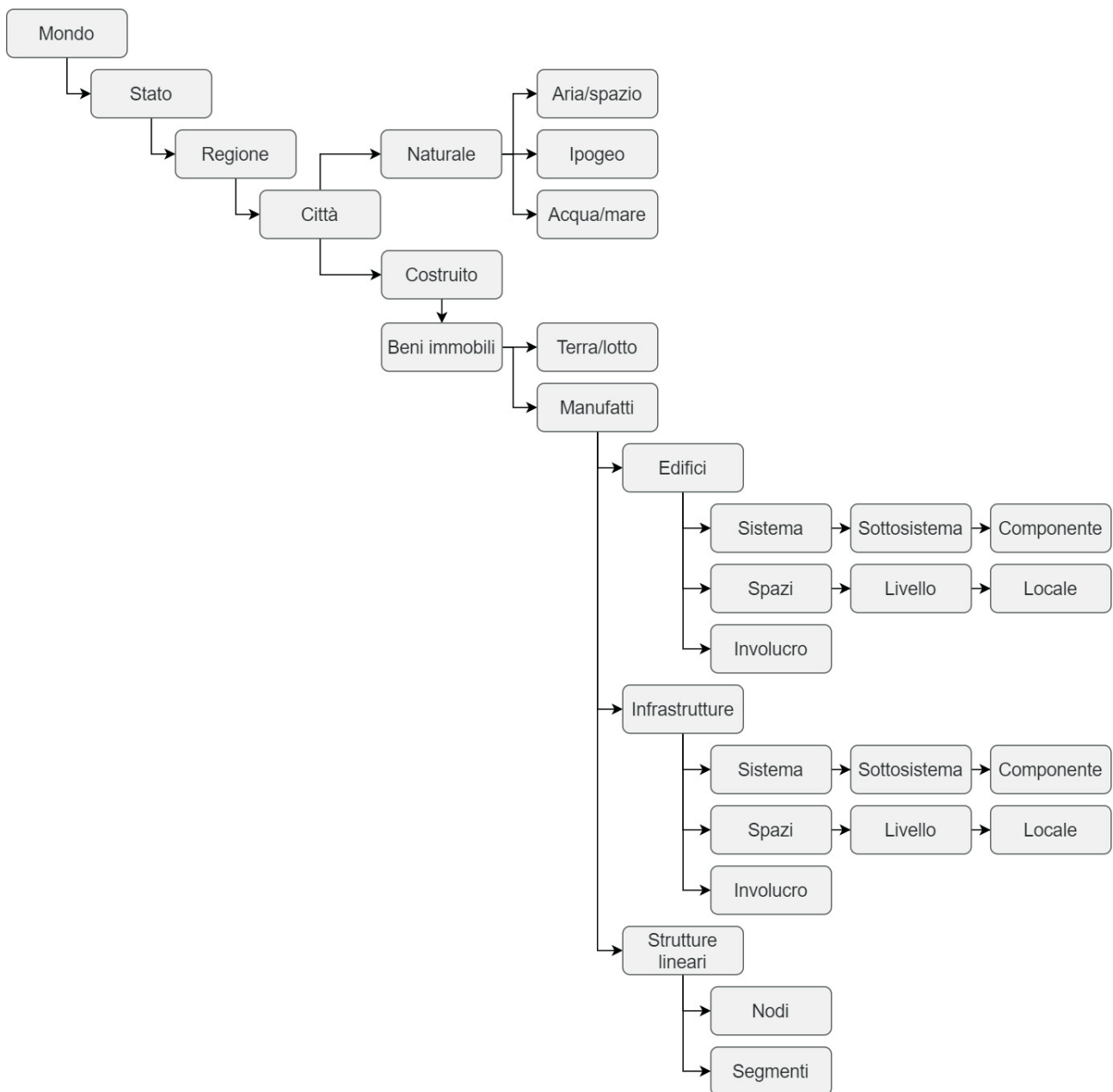


Fig. 31. La complessità del sistema tripartito energia/clima/uso del suolo (a) applicato a diverse scale spaziali e temporali (b). Rielaborazione da [150].

armonizzare dati tematici che sono spesso già stati acquisiti da parte degli enti gestori, ma che non risultano adeguatamente sfruttati a causa di una grande eterogeneità nei formati e nei supporti di archiviazione. Al fine di usufruire effettivamente di tutte le potenzialità dei dati raccolti, qualsiasi sia il dominio di conoscenza cui si riferiscono, si propone di porli in relazione con una base informativa multidisciplinare, fondata su un modello urbano tridimensionale, che raccolga le informazioni di base sulle entità coinvolte.

Un database spaziale che rappresenta l'ambiente costruito integrando informazioni geografiche, architettoniche e urbanistiche può, in questo senso, fungere da base per

Fig. 32. Schema delle relazioni gerarchiche per la descrizione dell'ambiente naturale e costruito. Rielaborazione da [153].



analisi tematiche differenziate. Nella gestione di problemi multidisciplinari, infatti, un sistema modulare si rende necessario al fine di condurre analisi integrate e di leggere i risultati derivanti da diverse prospettive [156].

In considerazione di ciò, si può progettare uno strumento modulare e flessibile che estenda la sua funzionalità oltre all'ambito primario per il quale è stato concepito.

Se la struttura qui definita si propone di svolgere delle analisi finalizzate al miglioramento energetico interrogando sistema informativo che rappresenta le caratteristiche dell'ambiente costruito, infatti, in un momento successivo altri soggetti potrebbero riprendere la medesima cellula base e costruire nuovi moduli tematici capaci di investigare la realtà dal punto di vista, ad esempio, della sicurezza sismica, della prevenzione incendi, dell'abbattimento delle barriere architettoniche o della gestione del rischio. La scelta di un approccio integrato garantisce, perciò, infinite possibilità di aggiornamento, adattamento ed estensione degli strumenti proposti, ponendosi come requisito fondamentale nella prospettiva di riutilizzare la base di dati nell'ambito di altri progetti di ricerca e di pratiche professionali presenti e future.

In questo senso, la dotazione di un modulo base non affetto da influenze tematiche consente di capitalizzare le informazioni esistenti, permettendo di risparmiare tempo nelle fasi di raccolta e organizzazione dei dati e di ridurre il rischio di errore connesso alla riscrittura delle stesse informazioni.

Come dimostrano le esperienze consolidate svolte alla scala dell'edificio da ricerche che hanno trattato il tema del coordinamento multidisciplinare nell'ambito della progettazione

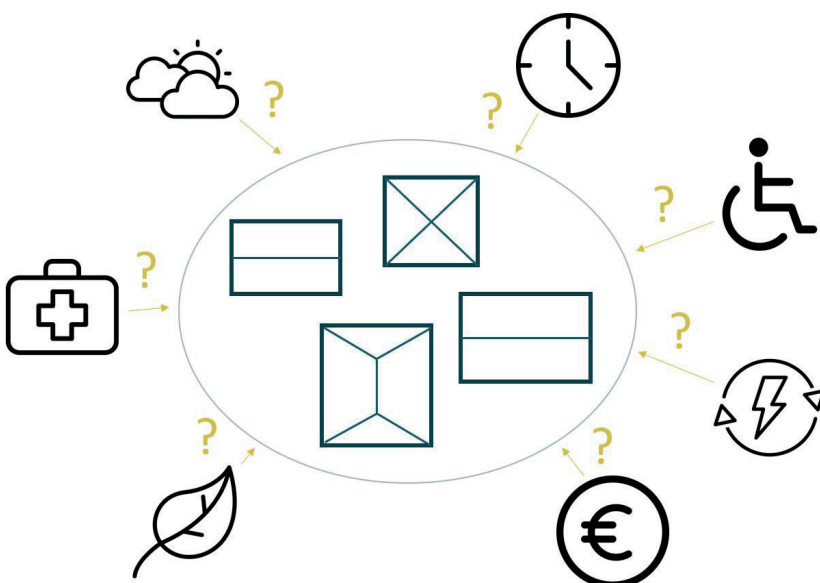


Fig. 33. La definizione di un database spaziale centrale non influenzato da tematismi consente la progettazione di moduli disciplinari che si interfacciano con l'unità centrale.

tecnica [157], la conoscenza condivisa è un mezzo assai più efficace della comunicazione. Nel settore AEC, infatti, la collaborazione assume un ruolo del tutto particolare, in considerazione di tre elementi:

- Coinvolge soggetti che rappresentando diverse professionalità, hanno diversi bagagli culturali e possono farsi portatori di diversi obiettivi;
- E' costituita da organizzazioni differenti che uniscono le forze per realizzare un progetto, e i cui obiettivi a lungo termine possono differire da quelli specifici della commessa;
- Si può estendere per un periodo di tempo molto prolungato, coinvolgendo nuovi soggetti che non erano inclusi al momento iniziale pur mantenendo l'influenza di quelli che non partecipano più.

Risulta chiaro, quindi, come il quadro di riferimento complesso che si delinea nel caso di scenari collaborativi all'interno di processi edilizi si rilevi spesso fonte di incomprensione delle informazioni che vengono comunicate [158]. In questo senso, la disposizione di uno spazio condiviso in cui i dati sono strutturati secondo modelli codificati standard, permette di ridurre i rischi derivanti da possibili fraintendimenti, incentivando la collaborazione di soggetti diversi e beneficiando dell'integrazione fra le discipline.

In questa direzione, è utile individuare modelli dati flessibili che consentano la scomposizione tematica delle informazioni e l'aggiunta di moduli disciplinari. Come si è già sottolineato è necessario che la strutturazione dei dati sia codificata a livello internazionale, così da generare modelli che possano essere esportati e condivisi al di fuori di contesti territoriali omogenei. Tuttavia, occorre anche garantire la possibilità di definire nuovi oggetti e attributi capaci di relazionarsi con le strutture standard, allo scopo di descrivere nuovi domini della conoscenza, senza perdere la leggibilità universale dello schema.

2.4. Classe 4: Navigabile/Semantico/Georeferenziato

Per essere efficace e il più possibile inclusivo nei confronti delle classi di utenza coinvolte, è necessario che il sistema informativo si presenti sotto forma di un modello tridimensionale orientato agli oggetti. Studi cognitivi dimostrano, infatti, che la percezione umana dello spazio è condizionata dall'esperienza quotidiana di relazione con l'ambiente che ci circonda e che essa è dominata dagli stimoli visuali e dalle interazioni del nostro corpo con gli oggetti presenti nello spazio. In questo senso, l'essere umano è estremamente bravo a processare immagini e simulazioni tridimensionali, che richiamano il contesto in cui è immerso. [159]

Dal punto di vista degli utenti, la visualizzazione di ambienti tridimensionali può essere utile per un miglior orientamento nella navigazione e per il recepimento di informazioni sulla città comunicate dalle amministrazioni [160]. Nel primo caso, la navigazione può beneficiare dell'evidenza di punti di riferimento ben individuabili, motivo per cui l'impiego di modelli tridimensionali è stato riconosciuto come un approccio più intuitivo. Tuttavia, uno studio sull'effettivo utilizzo di diversi tipi di mappe [161] dimostra che nella pratica gli strumenti di visualizzazione tridimensionali sono attivati dagli utenti solo in casi specifici. Per quanto riguarda, invece, l'uso da parte delle amministrazioni allo scopo di comunicare con i cittadini, negli ultimi anni si sta assistendo ad un incremento dei casi di studio con le finalità di: presentare scenari di sviluppo e relativi impatti [160], sviluppare servizi nell'ambito delle smart-cities [162] e stimolare la consapevolezza su temi ambientali, quali il consumo energetico degli edifici [163].

In relazione agli utenti specializzati che ricoprono un ruolo attivo nei processi edilizi, invece, una ricerca condotta nel 2015 [164] si è occupata di comparare l'efficacia di modelli 2D e 3D nell'ambito della pianificazione urbana. Un questionario sottoposto a personale tecnico addetto sia alla pianificazione strategica che a quella di dettaglio ha evidenziato come la visualizzazione tridimensionale costituisca un valido strumento per supportare la progettazione su vasta scala, in particolare agevolando la creazione di un'immagine mentale degli scenari progettuali e del loro effetto sul contesto. L'opportunità di implementare modelli tridimensionali nei processi edilizi dimostra la maggiore efficacia quando applicata alle prime fasi di progetto, quando gli impatti volumetrici sono più rilevanti delle scelte di dettaglio. Tuttavia, la loro utilità marginale appare meglio giustificata per effettuare analisi complesse, rispetto al caso di quelle più semplici, per cui le rappresentazioni bidimensionali sembrano sufficienti.

Muovendo un passo avanti, nell'idea di generare un modello finalizzato ad organizzare la conoscenza e a supportare processi decisionali, si rileva indispensabile adottare modelli semantici. I modelli tridimensionali in ambito urbano e edile assumono, infatti, massima rilevanza quando si occupano di rappresentare non solo le entità geometriche e le informazioni ad esse correlate, ma anche i significati e le relazioni che contraddistinguono gli oggetti, in base a strutture ontologiche codificate che riproducono quelle del mondo reale [165]. Ad esempio, un edificio può essere scomposto in parti e poi in classi di elementi tecnici quali tetti, pavimenti e muri, i quali possono ospitare porte e finestre e così via.

In questa direzione, la norma tecnica ISO 19109:2015 per la modellazione geografica (Geographic information — Rules for application schema) [166] richiede che venga definita una doppia

struttura dell'informazione: da un lato le proprietà geometriche degli oggetti e dall'altro quelle tematiche. I due schemi sono chiamati a mantenere una certa coerenza a tutti i livelli di approfondimento, anche se è possibile che la scomposizione di uno dei due sia più granulare rispetto all'altra. Seguendo queste indicazioni si raggiunge la costruzione di un sistema informativo consistente, che fa sì che ogni elemento geometrico conosca il suo ruolo nella struttura semantica e che ogni oggetto tematico conosca la sua posizione nello spazio [165].

Per quanto concerne la realizzazione di tali sistemi, nonostante ci siano diversi metodi semi-automatici per produrre modelli geometrici tridimensionali a partire da dati grezzi [167, 168], l'introduzione di una struttura semantica risulta ad oggi ancora un'operazione non banale [169], poiché l'attribuzione di significato alle forme richiede l'impiego di una conoscenza critica che è difficilmente automatizzabile.

3. Strumenti

L'intero sistema informativo si fonda su una filiera di strumenti interoperabili, messi in comunicazione grazie a modelli dati e linguaggi standard, pensati per agevolare lo stoccaggio, la trasmissione e la condivisione di informazioni sul panorama naturale e costruito.

3.1. Dati input

Per garantire la replicabilità dei processi, è necessario che i dati di input siano facilmente reperibili e possibilmente provenienti da banche dati aperte disponibili nel contesto europeo. Noti gli obiettivi dello studio qui presentato, le informazioni iniziali per la realizzazione del database informativo devono riguardare aspetti spaziali ed energetici dell'ambiente costruito, al fine di costruire una base di conoscenza capace di relazionare gli indicatori del comportamento energetico degli edifici in un modello navigabile che rappresenta la città.

3.1.1. Dati geografici

Per quanto riguarda i dati geografici e spaziali, la finalità di creare modelli tridimensionali a scala urbana richiede informazioni sugli edifici che comprendano: l'impronta a terra, le altezze delle parti e l'assetto volumetrico, compresa la geometria dei tetti. I rilievi aerei con tecnologia laser-scanning (LiDAR - Light Detection And Ranging) sono in grado di fornire tutti i dati necessari, restituendo una nuvola di punti georeferenziata che rappresenta l'ambiente costruito nel suo insieme. Il dato grezzo non possiede informazioni di tipo semantico e si limita a registrare la posizione dei punti che acquisisce (più eventualmente informazioni sull'intensità, sull'angolo di incidenza, sugli echi e sul colore, a seconda di come viene progettata la campagna di rilievo e di quali apparecchi si utilizzano), ma, una volta processato mediante appositi strumenti, permette di distinguere le diverse entità presenti sul suolo, restituendo una nuvola di punti suddivisa in classi [170] (Fig. 34) dalla quale è possibile, in particolare, isolare gli edifici.

Nell'ambito dei rilievi urbani digitali, la grande efficacia del LiDAR aereo ne sta determinando una vasta implementazione [171] e allo stato attuale molti paesi europei stanno mappando i propri territori e costituendo banche dati accessibili per la consultazione e il download dei dati grezzi. In particolare, si segnala che, sebbene la discussione sia attiva in tutti i contesti nazionali, nuvole di punti derivate da rilievi aerei sono disponibili per Danimarca, Estonia, Finlandia, Gran Bretagna, Italia (copertura inferiore al 50% del territorio nazionale), Lettonia, Paesi Bassi,

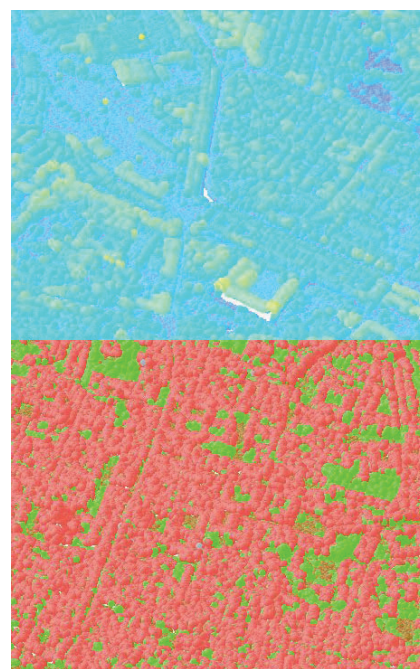
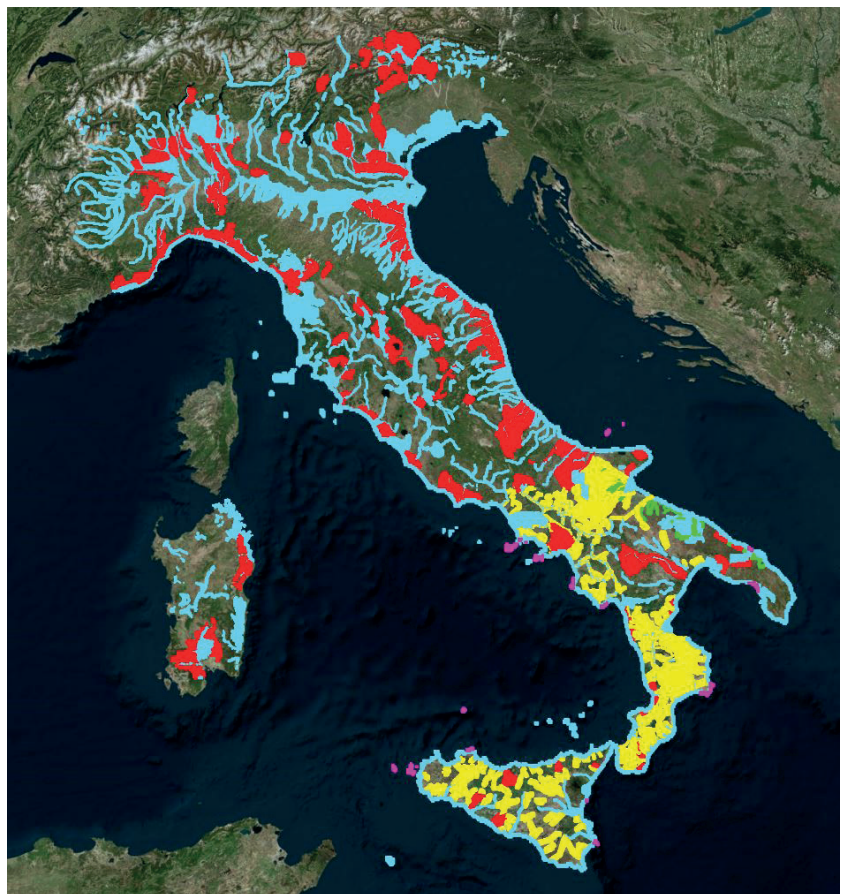


Fig. 34. Nuvola di punti grezza (a) e segmentata (b) con il riconoscimento di edifici, suolo e vegetazione.

Fig. 35. Copertura di rilievi LiDAR aerei sul territorio italiano. Colori diversi rappresentano campagne diverse effettuate nel corso degli anni 2008 e 2009.



Polonia (copertura del 90% del territorio nazionale), Repubblica Ceca (copertura del 70% del territorio nazionale), Slovenia e Spagna.

Nel contesto italiano, tra il 2008 e il 2009 il Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare ha realizzato due campagne di rilievi aerei, volti principalmente all'acquisizione di informazioni su aste fluviali, fasce costiere, zone con particolari criticità o aree esplicitamente richieste da Regioni e Province (Fig. 35). Il risultato è una nuvola di punti costituita da una maglia di 1m x 1m (2m x 2m per le fasce costiere) che copre buona parte del suolo nazionale e intercetta un gran numero di centri urbani.

Nel caso dell'utilizzo di nuvole di punti finalizzate all'estrazione delle geometrie degli edifici, l'integrazione di un data set che riporti le impronte a terra dei fabbricati presenti nell'area oggetto di studio può fornire un importante elemento di semplificazione, pur non essendo fondamentale alla buona riuscita del processo. Nonostante non sia stato possibile ricavare dati statistici sulla diffusione di questo tipo di informazioni nel contesto europeo, poiché si tratta di layer informativi tipici delle basi di dati GIS bidimensionali sull'ambiente costruito, si ritiene che siano facilmente reperibili, distribuito da parte degli enti pubblici di governo del territorio, così come accade nel caso italiano.

3.1.2. Dati energetici

Con riferimento alle caratteristiche energetiche degli edifici, trovare fonti informative omogenee distribuite nei paesi dell'Unione Europea risulta più difficoltoso rispetto al caso dei dati geografici, a cause della significativa complessità e varietà dei dati coinvolti. Tuttavia, si è assistito ad un considerevole passo avanti quando lo sviluppo delle direttive comunitarie sul comportamento energetico degli edifici ha voluto stabilire un quadro di riferimento condiviso, a partire dal quale gli stati membri possono definire regolamenti e strumenti nazionali armonizzati. Di particolare rilevanza risulta l'introduzione dei Certificati di Prestazione Energetica (EPC), disposti dalla EPBD 2002/91/CE [4] e attualmente implementati nelle leggi nazionali di tutti i paesi europei. Gli EPC sono riconosciuti come uno degli strumenti chiave per il miglioramento delle prestazioni energetiche del parco edilizio europeo, funzionando come fonte informativa sia per proprietari e gestori che per gli utenti finali. Sebbene la redazione di attestati di prestazione energetica non sia obbligatoria per tutte le tipologie di edifici e in tutti gli scenari di utilizzo, il loro impiego si è ampiamente diffuso e ha portato all'istituzione di registri che permettono la consultazione e il confronto delle informazioni associate. Da un rapporto del BPIE



Fig. 36. Modalità di gestione dei registri di raccolta degli EPC nei paesi dell'Unione Europea [172].

- Registro nazionale attivo
- Registro regionale attivo
- Registro in attuazione
- ▨ Registro regionale attivo e nazionale in attuazione
- Situazione non rilevata

(Building Performance Institute Europe) [172] si evidenzia che, nel 2014, 24 dei 28 stati membri disponevano di un database per la raccolta degli EPC a livello nazionale o regionale e che in 10 paesi la consultazione era già aperta al pubblico (Fig. 36).

Proprio in virtù della loro standardizzazione e diffusione, gli EPC sono visti dalla comunità scientifica come un'opportunità per creare conoscenza sulle prestazioni energetiche degli stock edilizi [173] e per investigare e analizzare il comportamento energetico delle aree urbane, grazie alla possibilità di estrarre dati statistici rilevanti aggregando le informazioni disponibili sulle singole unità immobiliari.

Per questo motivo, in letteratura è possibile rintracciare numerosi casi studio che utilizzano gli EPC come fonte informativa principale. Negli anni immediatamente successivi all'introduzione dei Certificati di Prestazione Energetica, le prime ricerche che li hanno coinvolti si sono occupate di raccogliere le informazioni di gruppi di certificati, per costruire basi conoscitive sul panorama costruito di contesti territoriali a diverse scale. In questo frangente, i risultati più interessanti sono quelli del progetto europeo DATAMINE [174] svolto nel periodo 2006-2008, di cui si è già avuto modo di parlare.

Successivamente, un consistente filone di ricerca ha messo in correlazione i dati energetici derivanti dagli EPC con informazioni spaziali formalizzate mediante strumenti GIS. In prima istanza il tema è stato affrontato utilizzando mappe bidimensionali [175, 176, 177], mentre in anni più recenti, complice lo sviluppo e la diffusione del GIS 3D, si è assistito a sperimentazioni che includono modelli urbani tridimensionali [178, 179, 180].

Per quanto riguarda gli obiettivi generali di tali studi, una vasta review che analizza l'uso dei Certificati di Prestazione Energetica in 79 pubblicazioni emesse a partire dal 2010 [181] permette un chiaro inquadramento dell'interesse scientifico recente. Va sottolineato che, mentre alcuni studi utilizzano esplicitamente i Certificati di Prestazione Energetica come dati input, altri ne impiegano gli indici e gli indicatori senza fare riferimento ai Certificati o alle banche dati che li raccolgono. Ai fini di questa trattazione, tuttavia, entrambi i casi risultano rilevanti per comunicare quanto l'introduzione di tali strumenti di valutazione abbia influenzato la ricerca in ambito energetico su scala urbana.

Nel contesto europeo, i Certificati di Prestazione Energetica non costituiscono l'unica risorsa informativa sul comportamento energetico degli edifici. Per livelli di indagine più approfonditi e in esplicito riferimento ai casi di riqualificazione energetica, infatti, la Direttiva 2012/27/EU [3] ha introdotto una nuova procedura di valutazione. Gli Audit Energetici sono strumenti volti ad acquisire un'adeguata conoscenza dei fabbisogni di edifici esistenti, allo scopo di identificare scenari di trasformazione efficaci in una prospettiva di analisi costi benefici [182].

In confronto ai Certificati di Prestazione Energetica, questi documenti coinvolgono un'analisi più approfondita dei fabbricati che si svolge in riferimento alle condizioni effettive di utilizzo, invece che a quelle teoriche individuate dagli schemi normativi. Attualmente, gli Audit Energetici sono obbligatori solo per la valutazione del profilo energetico di edifici produttivi, ma diversi soggetti li stanno adottando su base volontaria. Per gli scopi di questo studio, qualora siano disponibili, gli Audit Energetici sono una fonte di informazione preferibile rispetto ai Certificati di Prestazione Energetica, in quanto si tratta di risorse più complete e affidabili, che dimostrano in generale un maggior grado di aderenza alle situazioni di utilizzo reali degli edifici.

3.2. Modelli informativi tridimensionali

La rappresentazione è da sempre lo strumento privilegiato per la conoscenza dell'architettura. Con l'avvento delle tecnologie informatiche, le tecniche acquisite nel tempo sono state implementate in sistemi software capaci di agevolare e supportare il disegno e la progettazione (CAD – Computer Aided Design). Questi hanno tracciato la strada della rappresentazione digitale, codificata sia nella sua forma bidimensionale che in quella tridimensionale. Fin dall'inizio dell'era digitale, tuttavia, le attenzioni dei ricercatori si sono spinte oltre al tema della rappresentazione, comprendendo da subito che le opportunità derivanti dall'implementazione delle tecnologie informatiche potevano arricchire il disegno architettonico di apparati informativi complessi [183]. A questo proposito in un report del 1974, un team di ricerca finanziato dalla National Science Foundation e dall'A.R.P.A. (Advanced Research Projects Agency) del Ministero della Difesa degli Stati Uniti guidato da Charles Eastman asserisce che una descrizione computerizzata degli edifici potrebbe replicare o migliorare tutti gli attuali punti di forza del disegno come mezzo per la progettazione, la costruzione e la gestione degli edifici, oltre che eliminare la maggior parte delle loro attuali debolezze [184]. Con questa premessa, i ricercatori coinvolti nel progetto hanno mirato allo sviluppo di un database che permettesse la descrizione geometrica, spaziale e informativa degli elementi che compongono l'organismo edilizio.

Questo studio, insieme ad altri che sono seguiti nel tempo, ha portato alla definizione di modelli informativi spaziali, ossia strumenti capaci di sfruttare congiuntamente la rappresentazione tridimensionale dell'architettura e la disciplina dei sistemi di database. Se, infatti, i modelli 3D si pongono come raccoglitori di informazioni di carattere geometrico/spaziale, la loro caratterizzazione informativa li trasforma in una simulazione del fenomeno architettonico, arricchendoli di una massa di informazioni multidisciplinari [185].

NORME TECNICHE
UNI 11337-1:2017 Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi
UNI 11337-2:2018 Parte 2: Criteri di denominazione e classificazione di modelli, prodotti e processi
UNI/TS 11337-3:2015 Parte 3: Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazione tecnica per i prodotti da costruzione
UNI 11337-4:2017 Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti
UNI 11337-5:2017 Parte 5: Flussi informativi nei processi digitalizzati
UNI/TR 11337-6:2017 Parte 6: Linea guida per la redazione del capitolato informativo
UNI 11337-7:2018 Parte 7: Requisiti di conoscenza, abilità e competenza delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informative
UNI 11337-8:2018 Parte 8: Processi integrati di Gestione delle Informazioni e delle Decisioni
UNI 11337-9:2018 Parte 9: Gestione informativa in fase di esercizio (Due Diligence, Piattaforma collaborativa e Fascicolo del fabbricato)
UNI 11337-10:2018 Parte 10: Organizzazione delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informative

Tab. 11. Serie di norme UNI Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni.

Nell'ambito della rappresentazione del patrimonio costruito, a differenza di quanto accade nel caso dei modelli fisici, ciò con cui si ha a che fare è un modello matematico, la cui costruzione passa per la definizione di un sistema di regole codificate e condivise [186]. Questo si configura generalmente come un nucleo aggregativo capace di gestire le informazioni, sostenendo modalità innovative di archiviazione, accesso, correlazione e analisi di ampie gamme di dati [187]. A questo scopo, la documentazione e la catalogazione dell'informazione tecnica è sempre più diretta alla generazione di sistemi informativi complessi che gravitano intorno a modelli tridimensionali [188]. Il modello entra così a far parte dell'analisi storico-critica sul manufatto, diventando esso stesso un documento, portatore di informazioni soggette ad un'interpretazione, che vengono espresse in uno spazio virtuale [189].

Riprendendo un concetto visto al capitolo precedente, esiste una stretta relazione fra l'approccio tecnologico all'edificio e l'introduzione dei modelli informativi nel processo edilizio, in quanto la strutturazione dei modelli secondo lo schema costruttivo favorisce l'organizzazione della conoscenza [189]. Gli schemi semantici dei modelli digitali, infatti, vengono progettate in conformità con quella che è la scomposizione tecnologia dei sistemi costruiti, seguendo una struttura ad albero composta da classi e sottoclassi, che conduce dal generale al particolare. In questa direzione, la normativa tecnica ha progressivamente accompagnato lo sviluppo delle tecnologie informatiche e delle metodologie operative. In particolare, in Italia tale sforzo si sta concretizzando nel complesso apparato della UNI 11337 "Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni" (Tab. 11): uno standard articolato in dieci parti, di cui sei risultano già in vigore. Ai fini della presente trattazione, di particolare interesse risulta la schematizzazione presentata nella UNI 11337-1:2017 Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi [190] per caratterizzare i modelli informativi (Fig. 37) che ne evidenzia il forte carattere multidisciplinare e il legame che vige tra la documentazione non digitale e quella digitale.

3.2.1. Scala urbana

I GIS sono sistemi informativi dedicati alla gestione di dati geografici che nascono negli anni '60 per la gestione di mappe digitali e si sviluppano rapidamente nel corso degli anni '80, parallelamente alla diffusione dei database e dei loro sistemi di gestione, con i quali condividono alcuni aspetti fondamentali [191].

Nei sistemi GIS l'informazione è gestita attraverso la definizione di entità geometriche georeferenziate a cui viene associato un record, ossia una riga in una tabella contenente un insieme di attributi, combinando così le caratteristiche proprie di mappe

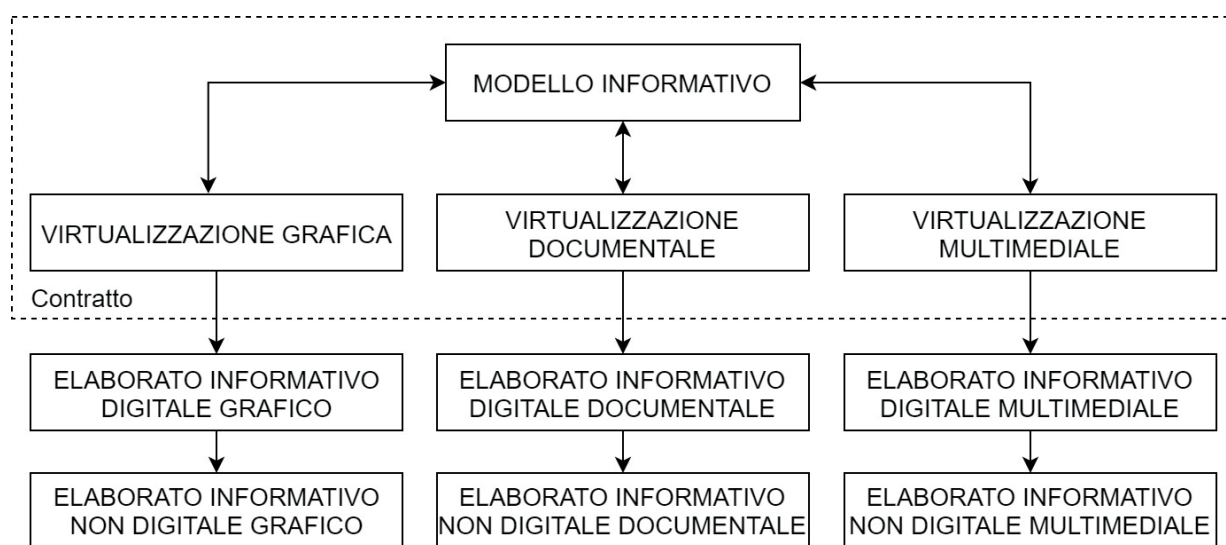


Fig. 37. Schema di funzionamento di un modello informativo secondo la UNI 13377-1:2017. Rielaborazione da [190].

e database. I sistemi GIS uniscono geometria e dati, ma non nascono con una caratterizzazione semantica dell'informazione, sebbene questa possa essere ricreata dagli utenti attraverso la progettazione di attributi specifici. Gli elementi omogenei vengono disposti per livelli e descritti nella medesima tabella, così da creare una rappresentazione stratificata della realtà da cui è possibile creare mappe tematiche (Fig. 38).

Così come tutte le tecnologie informatiche legate alla rappresentazione, il GIS nasce come uno strumento di rappresentazione bidimensionale e si sviluppa solo recentemente nella sua forma tridimensionale. Nonostante le prime pubblicazioni che trattano di GIS 3D risalgano alla metà degli anni '90 [193], allo stato attuale il GIS è utilizzato ancora prevalentemente nella sua forma bidimensionale e l'implementazione della sua nuova versione non appare ancora consolidata, in particolare per quanto riguarda la modellazione dell'ambiente costruito, principalmente in funzione del ritardo rilevato nella creazione e nell'aggiornamento delle tecnologie software associate [194].

L'effettiva introduzione della terza dimensione nel panorama GIS è, infatti, relativamente nuova, ed è generalmente collegata alla nascita dei modelli urbani semantici che si sono sviluppati a fianco alla diffusione del modello dati CityGML [195], uno standard internazionale per la modellazione, l'archiviazione e lo scambio di dati spaziali relativi all'ambiente costruito di cui si avrà modo di parlare nel dettaglio in seguito.

Relativamente all'ambito energetico, le applicazioni GIS hanno visto una significativa crescita negli ultimi decenni, rivelando il profondo legame che sussiste fra gli edifici e i contesti urbani in cui sono inseriti in relazione al comportamento energetico di entrambi. Gli studi in questo settore hanno affrontato principalmente tre tematiche: il potenziale derivante dall'installazione di impianti di produzione energetica di tipo

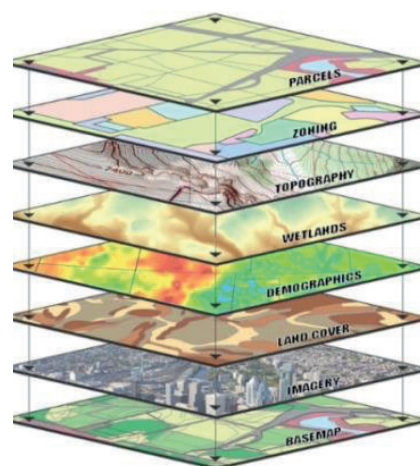


Fig. 38. Gestione dell'informazione sul territorio mediante la schematizzazione in layer omogenei [192].

rinnovabile, i fabbisogni energetici e le emissioni di gas serra degli ambiti urbani e la simulazione di scenari di riqualificazione energetica su larga scala.

Nonostante ci si trovi ancora agli stadi preliminari di sviluppo, i risultati già ottenuti dimostrano che l'impiego del GIS al campo delle analisi energetiche rappresenta un'importante risorsa per sfruttare il potenziale analitico nelle tecniche di pianificazione [196], beneficiando di forme di rappresentazione di facile comprensione. L'integrazione di sistemi GIS con dati sul comportamento energetico del costruito permette, infatti, di ottenere una rappresentazione più completa dei cosiddetti energy landscapes (paesaggi energetici), definiti da [197] come unità di indagine più interessanti rispetto gli ambienti (environment) corrispondenti, da cui si differenziano per il fatto di descrivere la realtà per come viene percepita dal punto di vista umano, nella relazione fra persone, luoghi e società. La forza del sistema risiede, infatti, proprio nelle opportunità derivanti dallo studio dei rapporti che intercorrono fra i fenomeni che accadono nei contesti urbani e territoriali, operazione possibile grazie all'attivazione di strumenti di analisi di tipo relazionale propri delle strutture GIS.

Fino ad ora, la maggior parte degli studi svolti associando sistemi GIS e informazioni di tipo energetico ha esaminato il problema servendosi di tecniche di rappresentazione bidimensionali in cui l'impronta a terra degli edifici serve da segnaposto per la valutazione della distribuzione di determinati indicatori sul territorio. Generalmente, ci si occupa di comprendere i fabbisogni energetici di insiemi aggregati di edifici collocati in contesti spaziali omogenei, la cui estensione può variare dal quartiere [198], alla città [199], alla regione [200], in funzione della scala di indagine. Spesso le informazioni sui consumi vengono poste in relazione con alcune caratteristiche proprie degli edifici, quali il periodo di costruzione o il rapporto superficie/volume, al fine di estrarre informazioni di tipo statistico sul panorama costruito che caratterizza i contesti urbani. Altre volte, invece, i dati sullo stato di fatto vengono sfruttati come punto di partenza per simulare misure di riqualificazione energetica che vengono applicate in modo parametrico a interi comparti edilizi [201].

Queste tipologie di ricerche costituiscono uno strumento di conoscenza rivolto principalmente agli esperti del settore, che hanno confidenza con la rappresentazione cartografica dei territori. Tuttavia, per guadagnare efficacia sul piano della comunicazione, un sistema informativo di tipo GIS deve essere in grado di incorporare la prospettiva degli utilizzatori, presentandosi attraverso interfacce intuitive capaci di adattarsi ai concetti spaziali propri degli utenti [202].

In questa direzione, l'introduzione della terza dimensione nel GIS ha compiuto un significativo passo avanti verso la possibilità

di utilizzare effettivamente i sistemi informativi territoriali come strumenti di informazione e di supporto alla decisione in un'ottica inclusiva.

In letteratura, l'applicazione del GIS tridimensionale ha permesso di esplorare due campi di indagine interferenti tra loro: la visualizzazione dei dati sui consumi energetici degli edifici e la simulazione di modelli energetici urbani.

Nel primo caso, le ricerche pubblicate si sono occupate di trattare il tema dell'integrazione tra BIM e GIS per gestire la raccolta e l'armonizzazione dei dati in relazione agli edifici e agli ambiti territoriali e di sviluppare ambienti di visualizzazione web-based per promuovere una consultazione facilmente accessibile a diverse classi di portatori di interesse [203, 204]. L'introduzione di questi due aspetti ha permesso di definire sistemi informativi che non sono rivolti solo agli specialisti del settore, ma includono anche i cittadini, ovvero gli effettivi consumatori dell'energia, così da creare strumenti capaci sia supportare i processi decisionali strategici che stimolare un uso consapevole delle risorse, aiutando a colmare la distanza fra pianificatori e utilizzatori.

Lo studio di modelli energetici a scala urbana, invece, ha puntato all'estensione dei concetti che hanno definito e standardizzato le simulazioni energetiche sugli edifici al fine di valutare il comportamento aggregato di contesti urbani. Questa categoria di ricerche si è concentrata sull'individuazione di metodologie per la classificazione di edifici di riferimento rappresentativi degli stock edilizi da analizzare [205] oppure si è rivolta allo studio delle dinamiche di interoperabilità fra gli ambienti di visualizzazione e gestione delle informazioni e i software per il calcolo energetico [206]

3.2.2. Scala edile

È difficile identificare una definizione univoca e soddisfacente di Building Information Modeling, poiché è possibile guardare in tema da diverse prospettive, ciascuna delle quali porta con sé concetti differenti. Tuttavia, la descrizione più adeguata disponibile in letteratura, con riferimento all'accezione che si vuole enfatizzare qui, appare quella fornita da Miettinen et al. in [207], che indica il BIM come riferito a una combinazione di tecnologie e soluzioni organizzative finalizzate ad aumentare la collaborazione fra i soggetti coinvolti nel settore AEC e a migliorare la produttività e la qualità in relazione alle fasi di progettazione, costruzione e gestione degli edifici. In questo senso il BIM svela una duplice natura, rivelandosi sia uno strumento per la rappresentazione degli organismi edilizi, che una piattaforma per favorire la collaborazione e il coordinamento nell'industria delle costruzioni. Per svolgere questi due compiti, la modellazione informativa degli edifici fa uso di una rappresentazione che coinvolge geometria e informazioni, poste in uno schema concettuale che comprende una classificazione

semantica di tutte le entità modellate. Inoltre, in un'ottica altamente collaborativa, si può assumere che non abbia senso sviluppare progetti e processi BIM se non in un contesto di standardizzazione e di interoperabilità dell'informazione [208].

Per quanto concerne l'interoperabilità, poiché un modello BIM funziona come una base di dati multidisciplinare che raccoglie le informazioni sull'edificio, deve essere anche in grado di scambiare i dati con piattaforme software esterne in cui processare analisi tematiche i cui risultati torneranno ad arricchire il modello centrale. Per realizzare ciò, è necessario che siano verificati almeno i primi quattro livelli di interoperabilità definiti secondo il modello LCIM (Levels of Conceptual Interoperability Model): tecnica, sintattica, semantica e pragmatica [209] (Fig. 39).

In particolare, l'interoperabilità tecnica assicura che esistano protocolli per servizi informatici capaci di trasportare l'informazione da una piattaforma ad un'altra, l'aspetto sintattico fa sì che un'applicazione sia in grado di leggere i dati scritti da un'altra, grazie alla presenza di una sintassi condivisa nella scrittura delle informazioni. L'interoperabilità semantica implica l'associazione di significati condivisi alle informazioni, che devono essere chiari ed univoci sia dalla prospettiva dell'uomo che da quella delle macchine. Infine, al livello più alto, l'interoperabilità pragmatica viene raggiunta quando i sistemi che utilizzano determinate informazioni sono consapevoli del modo in cui esse sono state scritte dalle altre applicazioni.

Nel mondo BIM, BuildingSmart si occupa di definire protocolli e strumenti volti ad assicurare l'interoperabilità dei processi in modo indipendente dalle case software. Il primo degli standard definiti a questo scopo è IFC, un modello dati gerarchico e semantico che costituisce una vera e propria rappresentazione



Fig. 39. Schema del modello LCIM, che mostra livelli progressivi di interoperabilità al fine di raggiungere integrità, interoperabilità e componibilità. Rielaborazione da [209].

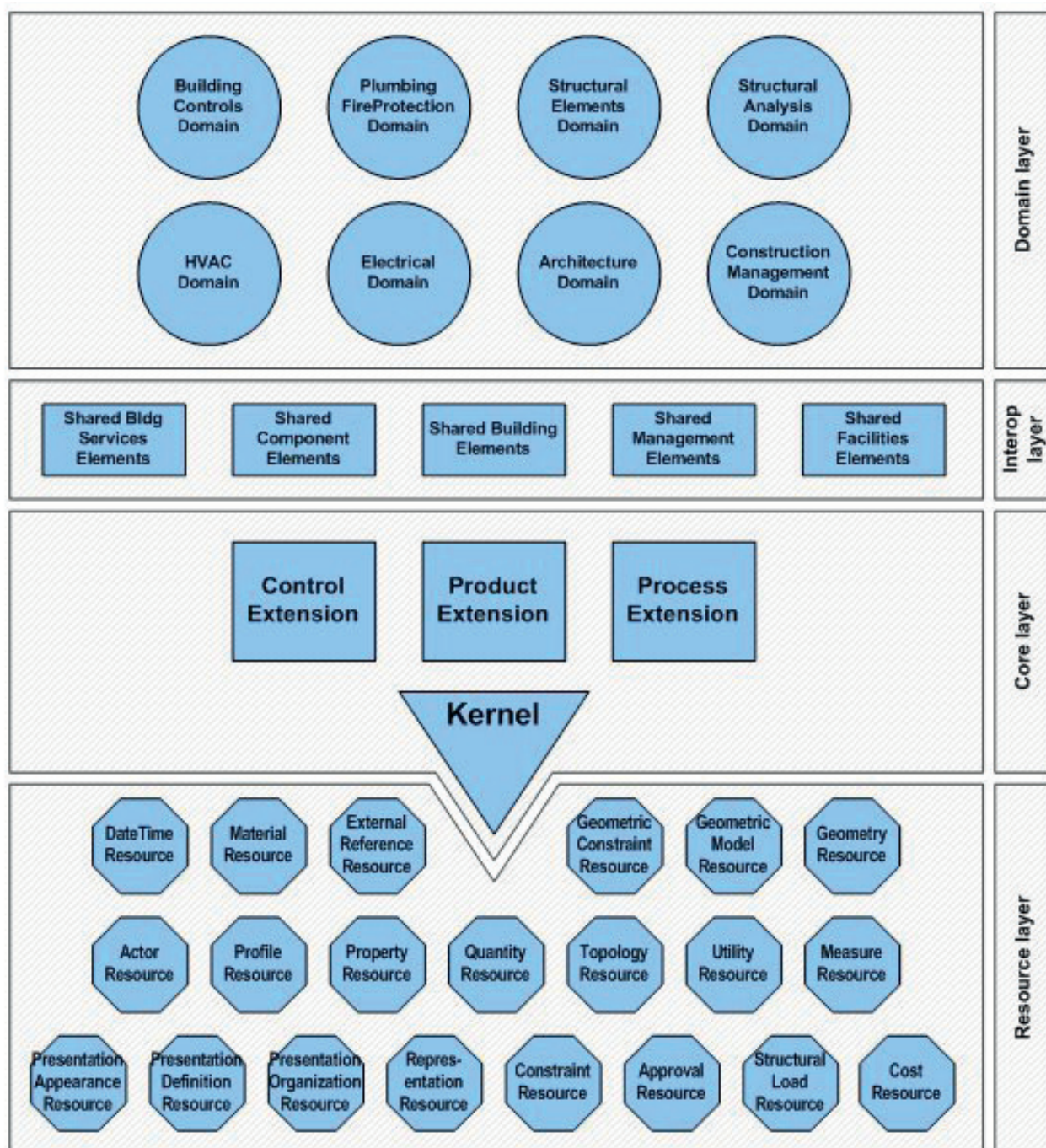


Fig. 40. Rappresentazione schematica dell'architettura del modello dati IFC [212].

digitale dell'ambiente costruito.

La specifica del modello dati IFC è aperta e standardizzata, in quanto è stata registrata come norma internazionale UNI EN ISO 16739:2016 (Industry Foundation Classes (IFC) per la condivisione dei dati nell'industria delle costruzioni e del facility) [210]. L'intero schema è definito in EXPRESS, un linguaggio di specifica dei dati standard ISO 10303-11:2004 [211] che comprende due interfacce mutualmente collegate e dedicate a comunicare con i calcolatori, in forma testuale, e con gli umani, attraverso una versione diagrammatica nota come EXPRESS-G.

IFC organizza l'informazione in classi raggruppate in tre categorie (classe oggetto, classe relazione e classe risorse) con le quali è possibile definire oggetti, relazioni, vincoli e regole di eredità. La struttura di IFC è caratterizzata da una serie di data schema relazionati tra loro sulla base di un modello gerarchico formato da quattro livelli concettuali [212] Fig. 40):

- Resource layer: al livello più basso sono presenti gli schemi che definiscono le strutture base di supporto, ovvero i costrutti che vengono utilizzati per descrivere gli elementi degli strati superiori. Si tratta di specifiche non utilizzabili in modo indipendente, ma che devono essere referenziate a definizioni appartenenti ad altri layer;
- Core layer: in questo livello è presente la struttura fondamentale di IFC (Kernel), ossia le entità e le relazioni comuni, espresse in modo generale. Queste vengono descritte attraverso tre estensioni specifiche per l'industria AEC che trattano di prodotti, processi e risorse;
- Interoperability layer: nel livello sono definite le classi che descrivono prodotti, processi o risorse che hanno valenza multidisciplinare e sono quindi trasversali a più domini;
- Domain layer: il livello più alto contiene le descrizioni di prodotti, processi o risorse inerenti a un determinato dominio disciplinare, che non sono ulteriormente specificabili.

Poiché i modelli BIM sono per loro natura contenitori di informazioni multidisciplinari, quando si tratta il tema dell'interoperabilità in domini specifici, occorre definire quali dati vadano conservati nel processo di esportazione, per evitare di dover gestire grandi moli informative costituite per lo più da dati non rilevanti ai fini delle analisi che si vanno a sviluppare. A questo scopo, un complemento all'uso del formato di scambio IFC è costituito dall'applicazione di filtri sui modelli appositamente progettati per selezionare slot informativi mono disciplinari. Al fine di rispondere a questa esigenza è stato sviluppato il concetto di Model View Definition (MVD) [213], specifiche che entrano a far parte del modello IFC definendone dei sottoinsiemi finalizzati a generare esportazioni snelle, ottimizzate in funzione di specifici domini della conoscenza. BuildingSmart prevede un processo per la proposta e il rilascio di MVD sviluppate a partire dalle esigenze degli utenti, che ha portato alla costituzione

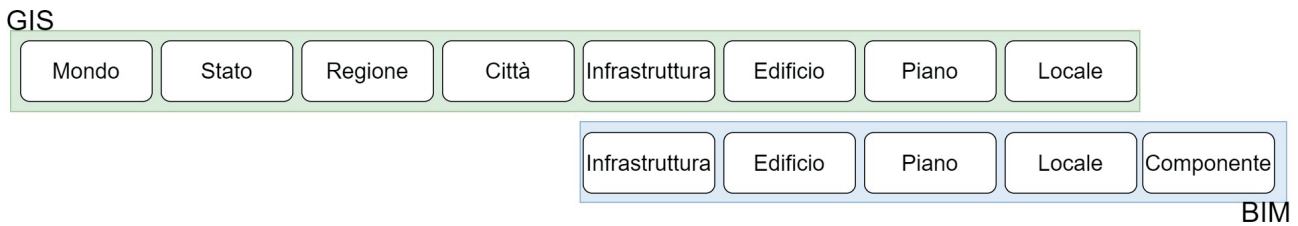


Fig. 41. Sovrapposizione fra i campi di applicazione di GIS e BIM. Rielaborazione da [151].

di un repository estensibile che al momento contiene dieci specifiche di scambio. Tuttavia, nonostante sia prevista la possibilità di customizzare le MVD grazie alla presenza di uno strumento software apposito (ifcDoc), Autodesk Revit, uno degli principali software di authoring presente sul mercato, non consente allo stato attuale l'implementazione delle maschere generate dagli utenti [214], interrompendo la possibilità di un flusso informativo propriamente interoperabile.

In relazione all'ambito energetico, proprio in funzione del ruolo del BIM come base informativa predisposta allo scambio di dati con piattaforme esterne, le ricerche hanno affrontato principalmente il tema dell'interoperabilità verso software per la simulazione energetica degli edifici, definendo procedure e strumenti per ottimizzare i flussi di informazioni. Di particolare rilevanza sono state le ricerche condotte dal Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab) dell'Università della California che, in particolar modo sotto la guida del Prof. Vladimir Bazjanac, hanno gettato le basi metodologiche per la ricerca sull'interoperabilità dei modelli informativi in ambito energetico [215, 216, 217, 218].

Nel presente lavoro, come software per la modellazione informativa si farà uso di Autodesk Revit nella sua versione 2018.3. Nella scomposizione dell'organismo edilizio, Revit organizza le entità secondo uno schema gerarchico che parte dalla definizione delle Categorie, per poi passare a Famiglie, Tipi e Istanze (Fig. 42), determinando uno schema ad albero capace di individuare ciascuna entità del modello.

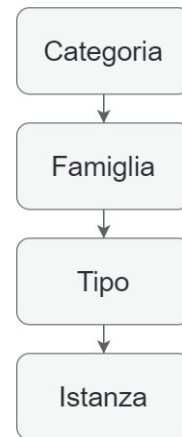


Fig. 42. Organizzazione delle entità del modello secondo lo schema impiegato da Autodesk Revit.

3.3. Integrazione multiscalare

Si è già discusso delle opportunità derivanti dall'integrazione di sistemi informativi a diverse scale e, nel dettaglio, dell'importanza di conseguire una concreta interoperabilità fra GIS e BIM a favore di processi edilizi integrati.

Diversi lavori di revisione della letteratura hanno preso in considerazione contributi sul tema usciti nel periodo 2008-2017, dimostrando che si sta assistendo a un incremento di interesse sul tema [151]. Gli studi analizzati permettono di ricostruire due fasi successive di ricerca. Nel primo periodo, in seguito all'introduzione della tematica, l'attenzione è stata focalizzata

principalmente su problemi tecnologici di integrazione e le proposte formulate hanno definito meccanismi per l'interoperabilità capaci di affrontare problemi in ambiti specifici. In generale, ciò che si può comprendere dalla lettura congiunta di questi studi è che ciascuna categoria di soggetti ha avanzato proposte di risoluzione dal proprio punto di vista: gli utilizzatori del GIS hanno cercato di integrare i modelli a scala edili nelle piattaforme per la gestione del territorio, mentre i professionisti che si confrontano con i processi edilizi hanno tentato di incorporare informazioni di tipo spaziale nei sistemi BIM.

In un secondo momento, gli studi hanno cominciato ad analizzare e definire nuove procedure e standard per la gestione di sistemi informativi integrati [219]. A questo scopo, è possibile identificare tre gradi di integrazione che portano a benefici differenziati [220]:

- Il livello dei dati: funziona attraverso la conversione fra modelli dati differenti, l'introduzione di nuovi standard o l'estensione di quelli esistenti. Viene attuata modificando la semantica di uno o di entrambi i data set originali per conformarla a un'unica soluzione. Perdita di semantica, limitazioni nella conversione geometrica e focalizzazione esclusiva sui alcuni elementi costruttivi risultano le principali preoccupazioni associate a questi metodi;
- Il livello dei processi: viene attuato mediante la definizione di semantiche definite in contesti Web o mediante metodi basati su servizi specifici. In questo caso, le strutture dei file originali non vengono alterate, ma una semantica definita a un livello superiore riesce ad accoglierle entrambe. I modelli BIM e GIS originali rimangono quindi inalterati e separati, mentre i processi utilizzano le capacità di entrambi. Tuttavia, per una corretta attuazione occorre ancora risolvere numerosi problemi al livello di integrazione dei dati;
- Il livello delle applicazioni: si espleta attraverso l'uso di script o plug-in capaci di agire come mezzi per realizzare l'interoperabilità. In questa modalità una fra le due piattaforme software utilizzate per la gestione di modelli BIM o GIS viene arricchita o riconfigurata, al fine di incorporare le funzionalità dell'altra. I sistemi così gestiti risultano generalmente onerosi e poco flessibili.

In generale, nonostante la conversione dei dati geometrici comporti ancora problematiche, in tutti gli approcci l'aspetto più difficoltoso resta legato alla conciliabilità delle strutture semantiche che caratterizzano i due sistemi informativi. Negli ultimi anni si sono compiuti sforzi importanti in questa direzione, anche se la perdita delle informazioni nei processi di trasformazione risulta ancora un problema aperto.

Per quanto riguarda i contenuti delle ricerche pubblicate a partire dal 2008, più della metà degli articoli è indirizzata ad

indagini sugli organismi edilizi, mentre la restante parte si occupa di distretti urbani o infrastrutture [221] (Fig. 43). A fronte di un grande interesse rivolto all'interoperabilità, si assiste quindi a una carenza di intenti che siano davvero volti a sfruttare congiuntamente le caratteristiche di GIS e BIM, poiché non si rilevano studi i cui risultati attivino vere e proprie analisi multiscalarari sul costruito. Come è riportato da Song et al. in [219], infatti, le applicazioni derivanti dall'uso integrato di GIS e BIM sono ancora limitate e le opportunità garantite dallo sfruttamento congiunto dei punti di forza di entrambi i sistemi non sono ancora pienamente attuate.

Nella presente ricerca, l'approccio scelto per raggiungere l'integrazione di GIS e BIM è a livello dei dati e si realizza mediante la definizione di un database informativo fondato su CityGML [222]. Si tratta di uno standard internazionale basato su XML per la rappresentazione e lo scambio di modelli semantici dell'ambiente costruito, adottato dall'OGC (Open Geospatial Consortium) a partire dal 2008 nella sua versione 1.0.0. Lo sviluppo del modello è iniziato nel 2002 e ha impegnato un team di 70 membri appartenenti a diversi settori dell'industria delle costruzioni [223]. Alla fine del 2011 è stata approvata la versione 2.0.0, che viene utilizzata in questo studio, mentre nel 2019 è stata rilasciata in bozza la versione 3.0.

CityGML supporta la rappresentazione di quattro diversi aspetti propri dei modelli virtuali di città, incorporando proprietà geometriche, semantiche, topologiche e di aspetto. E' un modello dati modulare (Fig. 44), costituito da un core module (nucleo di base), che comprende i concetti di base e le componenti essenziali dello schema, e da una serie di thematic modules

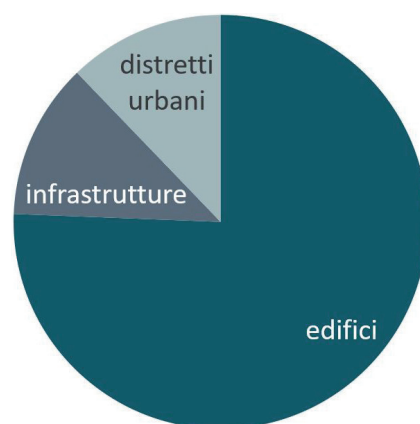


Fig. 43. Distribuzione dei temi di ricerca riscontrate nei paper sull'integrazione GIS BIM. Rielaborazione da [221].

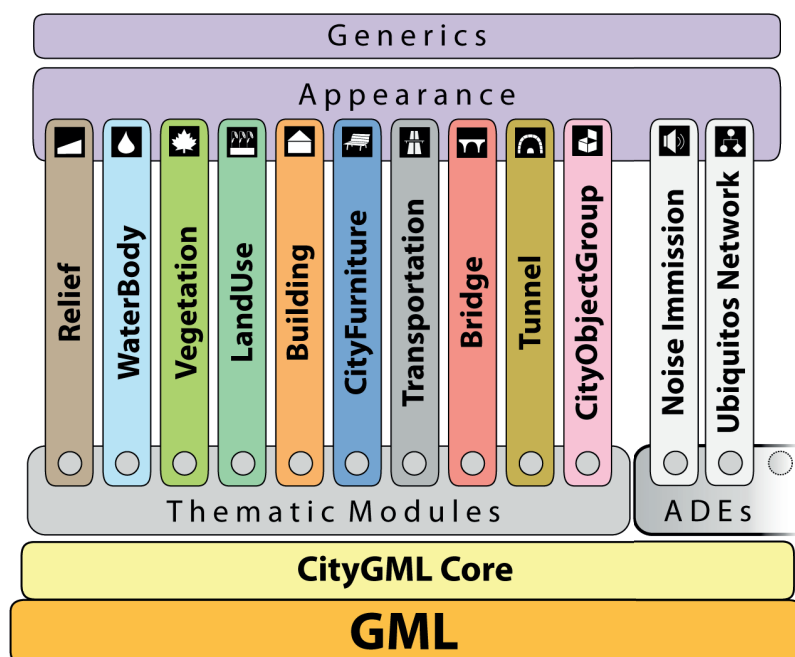
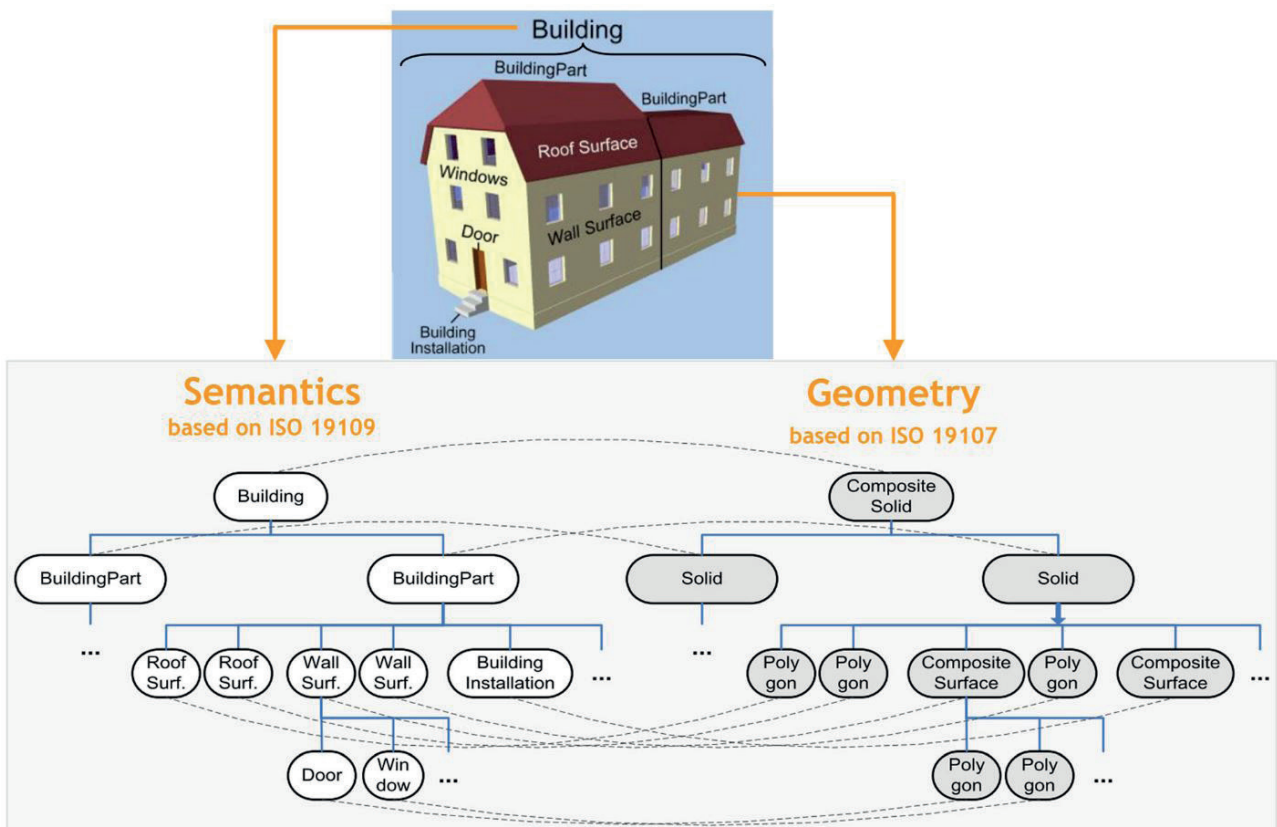


Fig. 44. Rappresentazione dei moduli che compongono CityGML [222].

(moduli tematici), che permettono la descrizione di domini della conoscenza specifici. La divisione del sistema permette un duplice vantaggio: da un lato consente di implementare il modello in modo parziale, in funzione di necessità specifiche, così da mantenere solo le parti strettamente necessarie, mentre dall'altro apre alla possibilità di espandere lo schema. L'estensione dello standard è, infatti, resa possibile mediante la programmazione delle cosiddette Application Domain Extension (ADE), di cui si tratterà in seguito. Nella sua versione attuale, sono presenti 13 moduli tematici: Appearance, Bridge, Building, CityFurniture, CityObjectGroup, Generics, LandUse, Relief, Transportation, Tunnel, Vegetation, WaterBody, and TexturedSurface. La struttura di CityGML si fonda sulle norme ISO 19100 (Geographic Information Standards) per la modellazione delle entità geografiche, che vengono intese come astrazioni degli oggetti che popolano il mondo reale. Lo schema logico che costituisce la struttura semantica di CityGML viene specificato mediante diagrammi UML (Unified Modelling Language), una notazione semi-formale e semi-grafica che consente di costruire modelli dati object-oriented e che può essere tradotta nel metalinguaggio XML per l'utilizzo da parte del calcolatore. In questi schemi vengono rappresentate le classi di elementi, i relativi attributi e le relazioni che intercorrono tra di essi.

Fig. 45. Rappresentazione grafica del concetto di coerenza semantica e spaziale [227].

La descrizione delle componenti geometriche è parte integrante dello schema CityGML e si basa sul modello GML3, che deriva



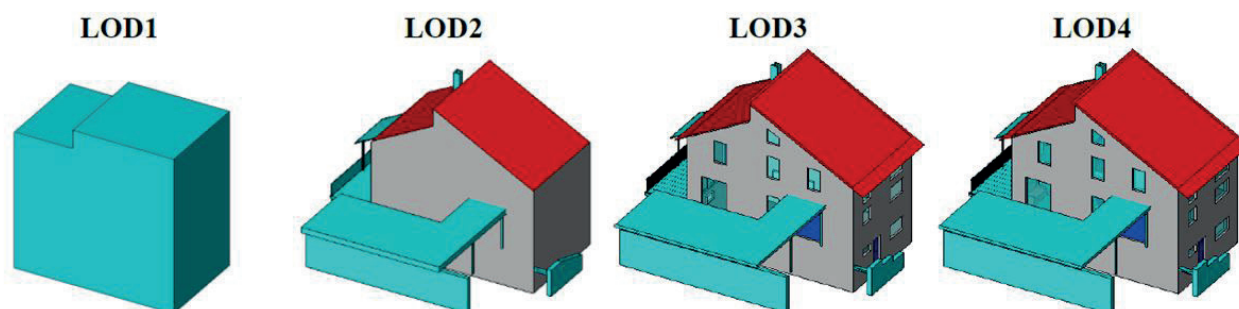


Fig. 46. I Livelli di dettaglio (LOD) di CityGML e le loro ricadute sulla rappresentazione delle entità geometriche [226].

dallo standard ISO 19107 [224]. GML3 fornisce le indicazioni per la descrizione di entità geometriche mono, bi e tridimensionali e comprende la possibilità di rappresentare forme composte o aggregate, basate sul raggruppamento di entità primitive. Gli elementi tridimensionali vengono modellati secondo il modello BRep (Boundary Representation) [225], per il quale ciascun solido deve essere confinato da superfici chiuse.

In CityGML, gli oggetti possono essere scomposti sia dal punto di vista della loro struttura tematica, che riguardo la loro composizione geometrica. Poiché la relazione fra le parti può essere rappresentata solo a livello semantico, per assicurare coerenza fra la descrizione semantica e quella geometrica delle entità del modello, è necessario definire delle regole. Nello standard CityGML il problema viene risolto definendo due gerarchie separate all'interno delle quali gli oggetti corrispondenti sono legati da relazioni [227] (Fig. 45). Ovviamente è necessario che vi sia sempre coerenza tra le gerarchie: se nello schema geometrico un muro è rappresentato con una porta e una finestra, esse devono esistere anche nello schema semantico. In questo modo, la realizzazione di un dataset coerente a tutti i livelli di scomposizione fa sì che ogni componente geometrico conosca il suo ruolo e, viceversa, che ciascuna entità tematica sia conscia del suo assetto spaziale.

Il modello è multiscalare, in quanto definito in cinque livelli di dettaglio (LOD) (Fig. 46), che permettono di incrementare l'accuratezza della rappresentazione e del contenuto informativo degli oggetti in funzione del grado di approfondimento delle analisi coinvolte. A questo scopo, in un modello CityGML, ciascuna entità può essere registrata a diversi livelli di dettaglio. Il grado di definizione più basso (LOD0) corrisponde a un modello topografico del terreno 2.5D, in cui gli edifici compaiono come poligoni in riferimento alla loro impronta a terra. Il LOD1 include la prima rappresentazione tridimensionale delle costruzioni, che vengono delineate mediante prismi estrusi fino alla massima altezza, senza alcuna rappresentazione della geometria delle coperture, che invece vengono incorporate nel LOD2. Proseguendo verso modelli maggiormente dettagliati, il

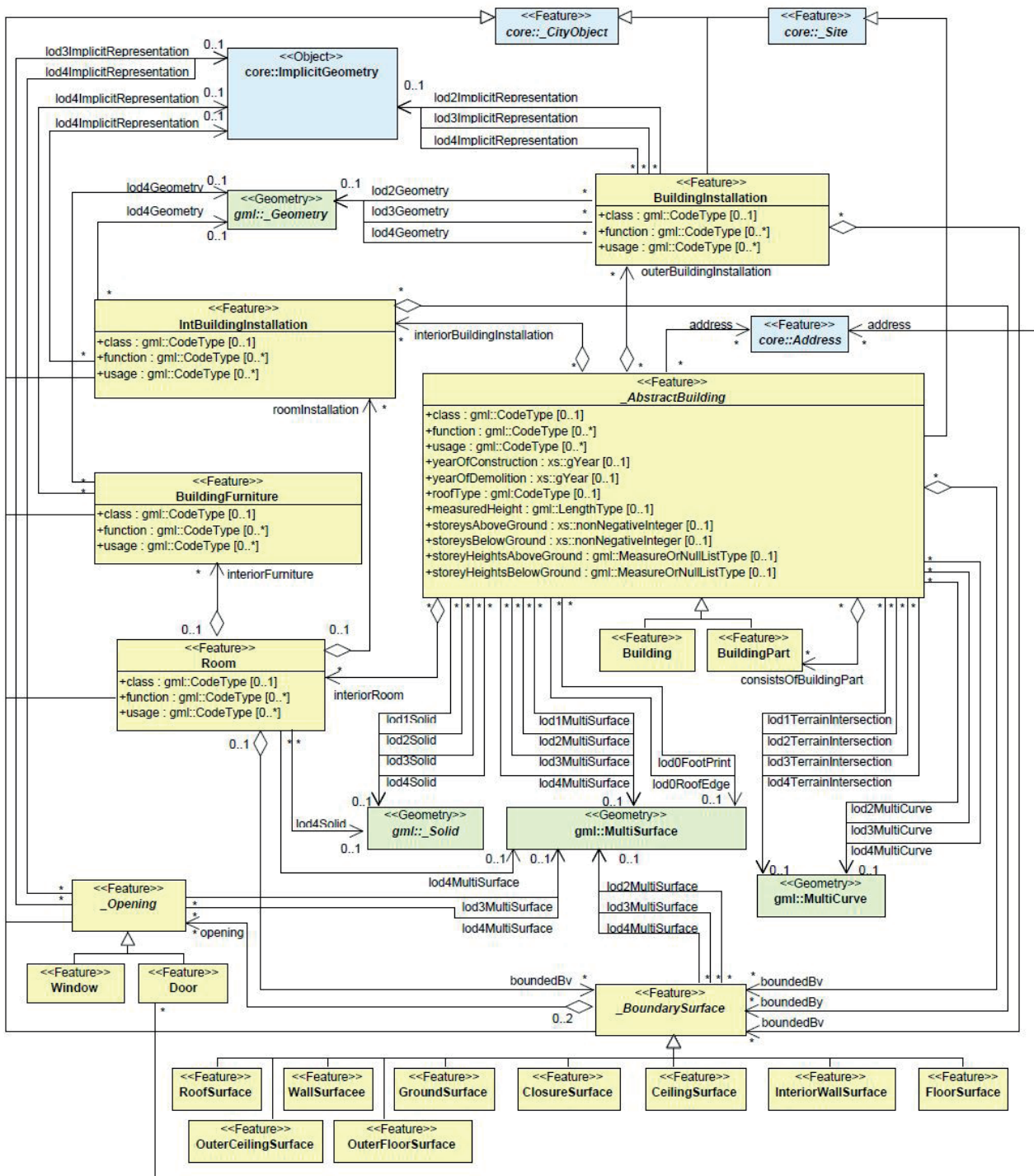


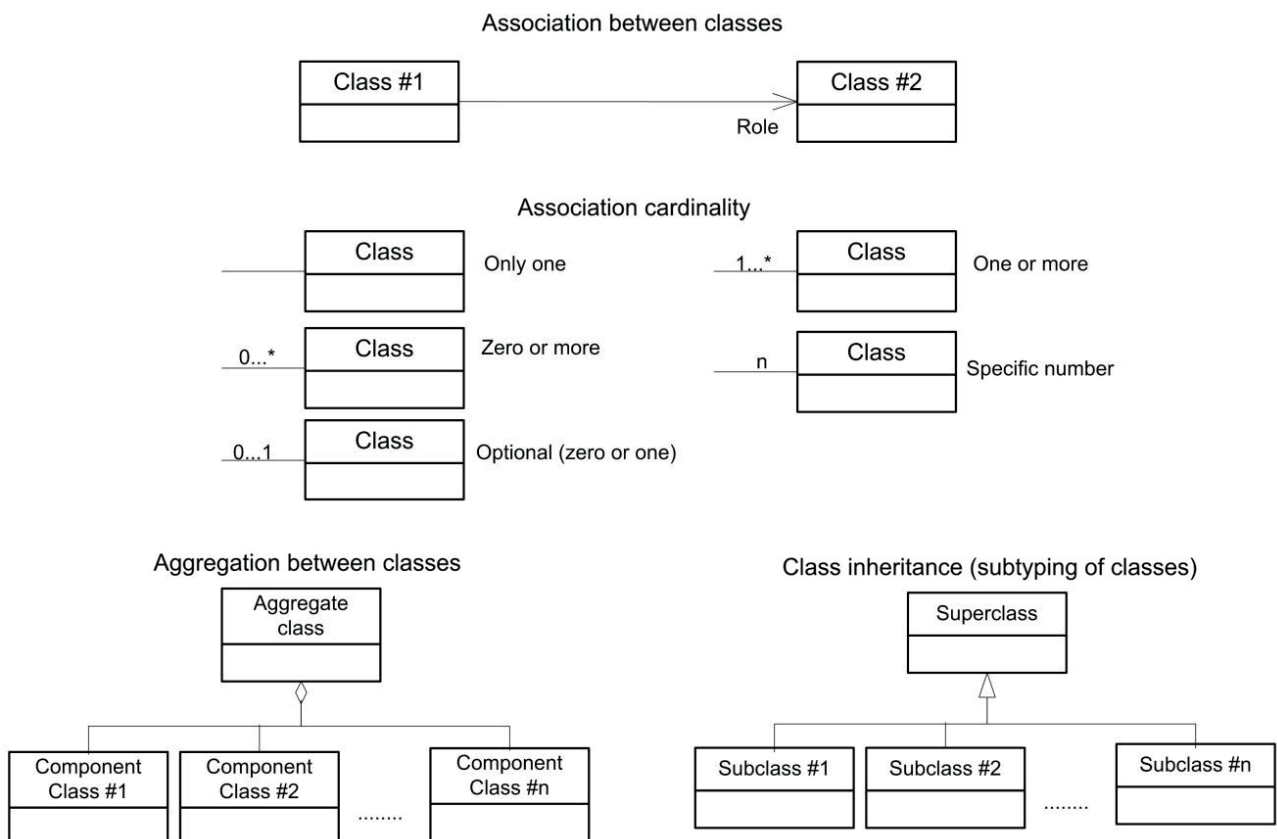
Fig. 47. Schema UML del modulo Building di CityGML [222].

LOD3 rappresenta gli edifici in modo più accurato, introducendo porte, finestre, camini e qualsiasi altro elemento che sia visibile dall'esterno. Infine, il LOD4 completa il modello, aggiungendo le caratteristiche degli ambienti interni, descrivendo l'assetto volumetrico delle stanze e degli elementi tecnici interni all'involucro edilizio. Oltre al caso degli edifici, la stessa classificazione si applica a tutte le categorie di manufatti riscontrabili nell'ambiente costruito, quali ponti, gallerie ecc.

Per il presente studio risulta di particolare rilievo procedere ad un'analisi del modello dati che descrive l'edificio, di cui si riporta lo schema UML in Fig. 47. Come da codifica, nel diagramma i box rettangolari rappresentano le classi di elementi: in giallo quelle pertinenti al modello in fase di discussione (in questo caso Building), in blu quelle che si riferiscono ad altri pacchetti, come evidenziato dal prefisso apposto ai nomi, e in verde quelle relative al modello geometrico. In linea con la definizione dei modelli UML secondo la notazione pubblicata nella ISO TS 19103 [228], le frecce descrivono le relazioni fra le classi, esplicitando associazioni (freccia aperta), vincoli di eredità (freccia chiusa) e aggregazioni (rombo vuoto), oltre che specificando la cardinalità delle relazioni mediante i simboli associati (Fig. 48).

Nello schema dell'edificio, la classe centrale è AbstractBuilding, da cui derivano le due classi non astratte Building e BuildingPart che ne ereditano tutti gli attributi. Nei LOD da 1 a 4, le entità

Fig. 48. Specifiche di rappresentazione del modello UML per la descrizione di CityGML [222].



possono essere rappresentate da geometrie di tipo Solid o MultiSurface. Gli edifici sono confinati da elementi della classe astratta BoundarySurface, che si concretizza negli elementi tecnici di chiusura che compongono l'involucro edilizio (RoofSurface, WallSurface, GroundSurface, FloorSurface ecc.) e che può ospitare aperture (opening), suddivise fra Door e Window, nei LOD 3 e 4. Solo nel livello di dettaglio più alto, invece, è possibile definire geometricamente gli ambienti interni all'edificio (Room) con le rispettive entità.

CityGML è stato progettato in un'ottica universale, pensato per affrontare una pluralità di tematiche concernenti il settore AEC. Tuttavia, nelle applicazioni pratiche del modello, può risultare utile avere la possibilità di gestire set informativi (costituiti indifferentemente da attributi o da classi di oggetti) che non sono presenti nello standard originale. Per questi casi, CityGML ammette due modalità di azione finalizzate ad estendere il modello base. Il primo coinvolge l'utilizzo di generic city objects e generic attributes, elementi aggiunti che non trovano un vero e proprio riscontro nella gerarchia del modello base. Il secondo, invece, implica una progettazione di nuove parti dello schema, definite in coerenza con le regole che governano l'intero modello. Questa modalità, che è quella raccomandata dall'OGC [229], fa uso delle Application Domain Extension (ADE), integrazioni dello schema di CityGML che possono aggiungere nuovi attributi, classi o tipi di dati. Le ADE sono propriamente pezzi di codice XML formalmente specificati, capaci di combinarsi con gli schemi di base del modello dati cui fanno riferimento. Per la loro definizione si può fare uso di schemi UML che vengono poi tradotti nel metalinguaggio XML, in alternativa è ammessa la scrittura diretta nel formato testuale. La pubblicazione delle Application Domain Extension prevede un processo di validazione da parte dell'OGC e, al momento, sono disponibili 12 estensioni tematiche dello schema. Tuttavia, un'analisi di letteratura rileva che negli ultimi anni un certo numero di studi ha incluso la progettazione di un'ADE nei propri progetti di ricerca, tanto che sono riscontrabili 44 diversi modelli progettati per esplorare nuovi domini della conoscenza o per rispondere a problemi specifici [230].

In un recente rapporto pubblicato congiuntamente dall'OGC e BuildingSmart [231] dal titolo "Built environment data standards and their integration: an analysis of IFC, CityGML and LandInfra", i modelli dati CityGML e IFC vengono posti a confronto diretto, discutendo i punti comuni e le differenze con la finalità di promuovere le iniziative di integrazione fra GIS e BIM. Ciò che ne deriva è un'ulteriore riprova della complementarità dei due sistemi di rappresentazione della realtà, dove al centro, come fulcro per entrambi si trova il tema dell'edificio (Fig. 49). La scelta di impiegare CityGML appare chiaramente giustificata

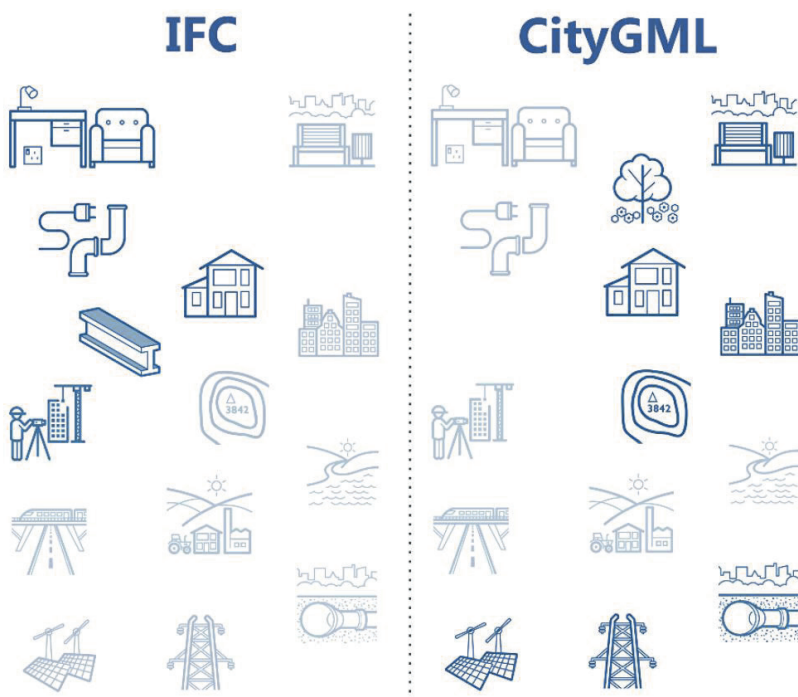


Fig. 49. Ambiti di applicazione di IFC e CityGML. Il colore più marcato rappresenta una copertura completa, mentre quello in trasparenza una copertura parziale o in fase di sviluppo [231]. Si noti che il tema dell'edificio è trattato parimenti in entrambi gli schemi, fungendo da anello di congiunzione fra i due.

se si confrontano le caratteristiche del modello appena esposte con i requisiti espressi al capitolo precedente. In particolare:

- Classe 1 - Replicabile/Standardizzato/Aperto/Interoperabile: CityGML è un modello dati aperto e standardizzato, distribuito liberamente dall'OGC e definito in conformità con le norme tecniche internazionali ISO. Il suo impiego nella creazione di strumenti informatici ne garantisce ampia possibilità di disseminazione, poiché il formato, definito senza riferimento a case software e realtà commerciali specifiche, risulta processabile da parte di numerose piattaforme.
- Classe 2 - Interoperabile/Multiscalare/Multidisciplinare: La definizione in diversi LOD assicura la possibilità di creare modelli multiscalari, bilanciando il carico informativo in funzione della tipologia di analisi da effettuare. Il supporto di diversi gradi di approfondimento nella descrizione semantica e geometrica delle entità coinvolte permette di spaziare dalla rappresentazione del territorio a quella dell'edificio, fino a definire le caratteristiche degli ambienti interni.
- Classe 3 - Multidisciplinare/Tematico/Modulare/Estensibile: La struttura di CityGML è definita mediante la sinergia di moduli generali e tematici, che ne delineano l'assetto modulare. Nelle applicazioni è possibile impiegare solo alcune parti o aggiungere nuove sezioni in relazione a specifici domini della conoscenza, grazie alla programmazione di Application Domain Extension.
- Classe 4 - Navigabile/Semantico/Georeferenziato: Il riferimento allo schema GML3 per la rappresentazione delle entità geometriche garantisce una struttura solida e condivisa dei dati spaziali. La disposizione di elementi tridimensionali rappresentati secondo modelli codificati consente il collegamento a diverse

piattaforme per la visualizzazione e la rappresentazione di città virtuali e la consultazione delle informazioni da parte di applicazioni GIS.

3.4. Gestione dell'informazione

Nonostante il modello dati CityGML proponga già intrinsecamente una struttura dell'informazione riconoscibile e condivisa, al fine di garantire maggiori opportunità di accesso ai dati, va progettato un adeguato componente per la loro gestione, affinché possano essere raccolti, confrontati, adattati, aggiornati e scambiati [232]. In questa direzione, le basi di dati sono lo strumento informatico più adeguato a cui rivolgere l'attenzione.

I database sono collezioni di dati, utilizzati per rappresentare le informazioni di interesse per una determinata applicazione. In ambito informatico sono gestiti da sistemi di gestione di basi di dati (Database Management System - DBMS), software in grado di trattare raccolte di dati che siano grandi, condivise e persistenti, garantendo affidabilità e privacy [233]. Fra diversi modelli logici di rappresentazione dell'informazione, quello su cui si fonda la gran parte dei DBMS attualmente disponibili è il modello relazionale, definito nel 1970 dall'informatico Edgar F. Codd [234]. Lo schema si basa sul concetto matematico di relazioni, che vengono rappresentate nei DBMS mediante tabelle. Queste sono caratterizzate da attributi, ossia le proprietà che definiscono gli oggetti, e formate da tuple, ovvero gli insiemi dei valori assunti dagli attributi stessi, che vengono identificati da codici univoci detti chiavi primarie (primary key). I rapporti presenti fra le tabelle, che determinano le relazioni fra le classi di oggetti, sono invece rappresentate mediante l'utilizzo di chiavi esterne (foreign key), che funzionano come rimandi fra le entità. Il linguaggio per l'interrogazione dei database relazionali è SQL (Structured Query Language) e può essere utilizzato per impartire istruzioni che influiscono sui dati (DML – Data Manipulation Language) o sugli schemi dei database (DDL – Data Definition Language).

NOME	DESCRIZIONE	RAPPRESENTAZIONE
Point	Point on a plane	(x,y)
Line	Infinite line	{A,B,C}
Lseg	Finite line segment	((x1,y1),(x2,y2))
Box	Rectangular box	((x1,y1),(x2,y2))
Path (closed)	Closed path	((x1,y1),...)
Path (open)	Open path	[(x1,y1),...]
Polygon	Polygon	((x1,y1),...)
Circle	Circle	<(x,y),r>

Tab. 12. Tipi di geometria disponibili nativamente in PostgreSQL.

delle coordinate che la costituiscono, mentre non compare alcuna informazione in relazione ai sistemi di riferimento.

Proprio allo scopo di integrare quest'ultimo aspetto, con PostGIS vengono definiti due ulteriori modelli per la rappresentazione delle entità spaziali: EWKB (Extended Well-Known Binary) e EWKT (Extended Well-Known Text). Gli standard così estesi sono capaci di supportare le informazioni sui sistemi di riferimento, che vengono espresse attraverso il corrispondente SRID (Spatial Reference System Identifier) inserito nella stringa della geometria. Di seguito si riportano alcuni esempi di geometrie definite in EWKT:

- SRID=32632;POINT(0 0)
- MULTILINESTRING((0 0 0,1 1 0,1 2 1),(2 3 1,3 2 1,5 4 1))
- SRID=32632;GEOMETRYCOLLECTIONM(POINTM(2 3 9), LINESTRINGM(2 3 4, 3 4 5))

3.4.1. Base di dati fondata su CityGML

Nella progettazione di una base di dati capace di accogliere le informazioni contenute nel modello CityGML occorre affrontare un problema metodologico, che ha a che fare con la traduzione di un modello dati orientato agli oggetti verso una struttura di tipo relazionale. Come evidenziato da Golobisky et al. [238], le possibilità sono molteplici e differiscono fra loro in funzione del numero di tabelle, e quindi dell'efficienza dimensionale, del database che si viene a creare a fronte di uno schema di partenza predeterminato. L'approccio più semplice prevede di mappare direttamente le classi di oggetti in tabelle, dove ciascuna istanza viene trasformata in una tupla e collegata a una chiave primaria, mentre le chiavi esterne vengono utilizzate per rappresentare i vincoli di associazione, aggregazione ed eredità.

Sull'argomento ha lavorato a lungo lo stesso gruppo di ricerca che si è occupato dello sviluppo del modello CityGML. In questo ambito, la prima sperimentazione ha riguardato la definizione di un database spaziale per la città di Berlino, che è stato realizzato mediante il metodo appena descritto [232].

Successivamente, si è passati alla formulazione di una proposta più sofisticata, capace di ottimizzare il numero di tabelle risultanti dalla mappatura dello schema CityGML nella sua interezza. Tale percorso si è concluso nel 2018 con la pubblicazione di 3DCityDB [239]: uno strumento che include uno schema di database e alcune applicazioni per il suo utilizzo.

Nonostante l'importanza della soluzione concepita dai ricercatori del TUM (Technische Universität München), nel caso del presente lavoro si preferisce adottare l'approccio più semplice, per diversi motivi:

- A fronte di un'applicazione parziale dello schema di CityGML il vantaggio computazionale generato dall'ottimizzazione del numero di tabelle risulta irrisorio;

- Una progettazione ad hoc dello schema del database misurata sui moduli di CityGML coinvolti e sull'ADE appositamente creata permette un maggior controllo del flusso di informazioni.

Pertanto, nella definizione dello schema logico del database si seguirà il seguente processo, adattato a partire dalla ricerca presentata in [232] (Fig. 50):

a) Il processo parte da una lettura accurata della struttura CityGML e in particolare dei moduli che andranno considerati nella sperimentazione e delle addizioni implicate dall'attivazione dell'ADE. Lo schema viene poi semplificato, così da mantenere solo le parti che svolgono un ruolo effettivo nel progetto che si va a delineare, ovvero le classi di entità e gli attributi che saranno effettivamente utilizzati. Questa operazione porta alla definizione di un nuovo diagramma UML, alleggerito rispetto a quello originale.

b) La seconda parte del lavoro consiste nella traduzione del nuovo diagramma UML nello schema effettivo del database. A questo scopo, occorre mappare le classi, gli attributi e le relazioni proprie della struttura di CityGML nelle tabelle del database, assicurandosi di rappresentare coerentemente le relazioni e i vincoli fra le classi, che andranno a determinare le chiavi esterne del database. Questa operazione passa idealmente per la redazione di un modello E-R (entity-relationship): uno schema concettuale dei dati, che sintetizza la realtà da rappresentare mediante l'uso di costrutti codificati [233]. Operativamente si tratta di una via di mezzo fra il modo umano di descrivere un determinato dominio e un effettivo schema di database. Se disegnato correttamente, infatti, un diagramma E-R può essere trasformato automaticamente in uno schema database, ovvero in istruzioni scritte nel linguaggio DDL di SQL, per mezzo di

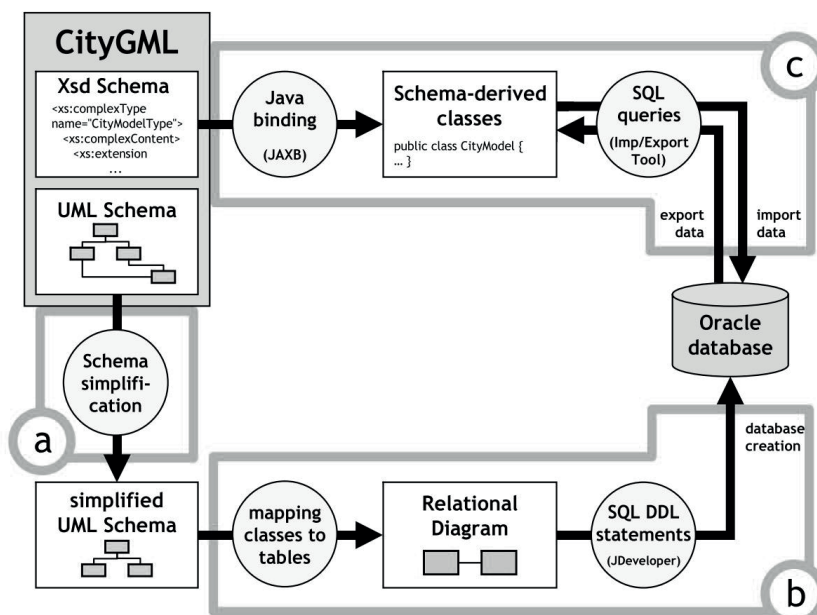


Fig. 50. Processo per la definizione del geodatabase della città di Berlino [232].

apposite applicazioni informatiche. Tuttavia, se il problema è già pienamente definito, è possibile saltare la fase di redazione del modello E-R e convertire direttamente il diagramma semplificato UML in comandi DDL, utilizzando software commerciali quali Sparx Systems Enterprise Architect.

La parte identificata con la lettera c) in Fig. 50 non rientra negli scopi della presente ricerca, in quanto riguarda la programmazione di uno strumento per l'esportazione automatica dei modelli CityGML nello schema database, operazione che verrà qui eseguita secondo un'altra modalità.

3.5. Veicolo per l'interoperabilità

Sebbene gli assunti metodologici per realizzare l'interoperabilità siano stati consolidati da tempo, a livello pratico sussistono ancora ostacoli alla corretta interpretazione delle informazioni nelle operazioni di conversione fra codici differenti, specialmente quando si passa da formati poco strutturati ad altri con schemi logici predefiniti.

A questo scopo, l'impiego di Linguaggi di Programmazione Visuale (VPL) può rivelarsi un valido strumento utile a supportare i processi di trasformazione dell'informazione, consentendo anche agli utenti meno specializzati di manipolare i dati a un livello superiore da quello consentito dalle interfacce grafiche dei software, pur senza la necessità di lavorare con linguaggi di programmazione propriamente detti.

I linguaggi di programmazione visuale sono definiti come codici che permettono di impartire istruzioni ai calcolatori attraverso la manipolazione di elementi grafici. La loro introduzione nel settore AEC ha a che fare principalmente con lo sviluppo di forme parametriche complesse, la cui modellazione può essere governata da input numerici forniti all'interno di script in ambienti visuali. Tuttavia, in tempi più recenti le potenzialità di tali strumenti sono state sfruttate anche per una più efficace gestione dei dati nei modelli. Nel contesto della modellazione informativa, ambienti di programmazione visuale sono stati integrati nei software di authoring, è questo il caso di Grasshopper per Rhinoceros, rilasciato nella sua prima versione nel 2007, e di Dynamo per Autodesk Revit, disponibile come plug-in partire dalla versione 2015 e successivamente incorporato nel software [240]. Nonostante la letteratura scientifica al riguardo sia quasi completamente assente, una discreta comunità di utenti sta crescendo intorno al tema della VPL, sviluppando nodi ed estensioni personalizzate che vengono poi distribuite con licenza aperta attraverso i principali servizi di hosting per progetti informatici. La ragione del successo si deve probabilmente al fatto che il livello di conoscenze necessario all'approccio è nettamente inferiore rispetto al caso dei codici informatici

testuali, poiché i VPL sono strumenti più intuitivi e tolleranti nei confronti degli errori. Inoltre, la formulazione visuale delle query è quasi totalmente indipendente dalla tipologia di dati di input, elemento che rende la tecnologia facilmente adattabile a diversi contesti [241].

Per le finalità della presente ricerca, con lo scopo di ampliare le possibilità di manipolazione delle informazioni nei modelli BIM verrà utilizzata la piattaforma VPL integrata nel software Autodesk Revit 2018, nella sua versione 1.3.2.2480. Come supporto ai processi di interoperabilità si utilizzerà, invece, il software Safe FME (Feature Manipulation Engine), un ambiente di programmazione visuale progettato per la conversione tra formati file capace di processare un'enorme quantità di informazioni differenziate. Attraverso FME è possibile ristrutturare lo schema che costituisce i modelli dati di oltre 200 formati, processando una trasformazione capace di preservare gli attributi associati alle entità coinvolte [242].

3.6. Conclusioni

Nonostante l'intrinseca resistenza che l'industria delle costruzioni presenta nei confronti dell'innovazione tecnologica basata sull'informatica [243], le soluzioni ICT recentemente sviluppate possono costituire l'elemento decisivo per il rinnovamento del settore AEC [244]. Ciò è vero in particolar modo se si riesce a sfruttare la sinergia che si genera dall'utilizzo di più strumenti posti in una catena interoperabile, realizzando dei flussi di lavoro in cui l'informazione può cambiare forma senza perdere il contenuto che veicola. In questo modo, è possibile realizzare processi integrati, capaci di gestire da una singola piattaforma una pluralità di discipline, realizzando le cinque caratteristiche della qualità dei dati, come definita dalla norma UNI CEI ISO/IEC 25012:2014 [245]: accuratezza, attualità, coerenza, completezza e credibilità.

Nel presente progetto di ricerca, gli strumenti appena presentati e approfonditi verranno sfruttati per definire una metodologia il cui scopo principale è quello di valorizzare data set esistenti, ma carenti in termini di organizzazione, che trattano del panorama costruito, nell'idea che la messa a sistema di informazioni già presenti possa concorrere a formulare una solida base di conoscenza sul territorio, e quindi supportare i processi decisionali nella definizione di scenari trasformativi.

4. Metodologia

Noti gli obiettivi di un sistema informativo per la gestione del costruito, si propone di mettere a sistema gli strumenti di cui si è trattato nel capitolo precedente, al fine di realizzare una metodologia integrata volta ad organizzare la conoscenza sui patrimoni edificati e a supportare i processi di decision-making nell'ambito del miglioramento delle performance energetiche del costruito.

Il processo ha origine su due fronti, trattando inizialmente in modo separato le informazioni relative alle due scale di rappresentazione coinvolte, implementando lo stesso schema logico per entrambe. A livello urbano, i dati input vengono inizialmente assemblati nella creazione di un GIS tridimensionale, che viene poi convertito in un modello CityGML a bassi livelli di dettaglio. Alla scala edile, invece, i rilievi vengono elaborati per la creazione di modelli BIM, anch'essi da tradursi in modelli CityGML ai LOD più alti. Grazie all'intrinseca multiscalarità del modello dati CityGML, le rappresentazioni a diversi livelli di dettaglio sono tenute insieme a comporre un'unica banca dati. Infine, il modello complessivo può essere convertito nel contenuto di un database informativo, il cui schema deriva dalla struttura di CityGML, addizionata per mezzo di un'ADE tematica. Con la disposizione di un database informativo contenente le informazioni del modello urbano, è possibile attivare numerose modalità di accesso ai dati, quali strumenti di interrogazione, visualizzazione e analisi. A prescindere dall'applicazione, qualsiasi piattaforma che si interfacci con il database può passare per la componente geometrica delle informazioni, ed eventualmente rappresentarla in un contesto tridimensionale, oppure prescindere da essa, dialogando direttamente con i dati che si riferiscono alle entità spaziali.

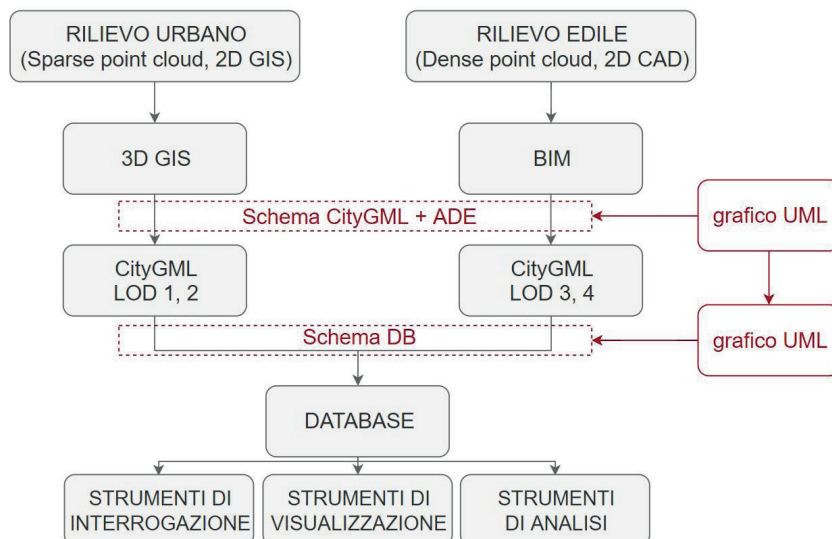


Fig. 51. Schema del flusso di lavoro associato alla metodologia proposta.

Nelle sezioni successive, si analizza in modo dettagliato il flusso di operazioni che caratterizza il processo proposto.

4.1. GIS tridimensionale

Per la ripetibilità della metodologia, è di fondamentale importanza che i dati di input provengano da fonti aperte e facilmente raggiungibili. Alla scala urbana, queste informazioni di base devono essere in grado di rappresentare l'ambiente costruito in modo generico, ma al contempo affidabile. Per questo motivo ci si è rivolti a banche dati di tipo istituzionale, gestite da enti pubblici che operano sul territorio. In particolare, la combinazione ideale di strati informativi da cui partire per la modellazione di un GIS tridimensionale comprende:

- Un GIS bidimensionale con le impronte a terra dei fabbricati;
- Una nuvola di punti a bassa densità del territorio.

Perché siano utilizzabili, i dati vanno innanzitutto armonizzati in un unico ambiente virtuale, verificando l'omogeneità dei sistemi di riferimento. Questa operazione, così come le successive, ha luogo all'interno del software GIS ESRI ArcGIS Pro, utilizzato nella sua versione 2.2.0.

La buona riuscita della fase di estrazione dei solidi costituenti il panorama costruito oggetto di studio è condizionata in primis dalla qualità della classificazione della nuvola di punti [246]. Per la ricostruzione, infatti, è necessario isolare i punti appartenenti agli edifici da quelli che ricadono in altre categorie. In particolare, la classificazione dei punti è basata sulla specificazione emessa dall'ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) [247] (Tab. 14). La segmentazione della nuvola di punti è il primo passo per raggiungere la classificazione, e quindi l'estrazione di determinate entità. I segmenti non sono nient'altro che porzioni del data set riconosciute come omogenee in funzione di una determinata regola. Generalmente, l'applicazione di un singolo meccanismo di segmentazione non è sufficiente per raggiungere un risultato soddisfacente, ma, al contrario, occorre applicare una combinazione di algoritmi, capaci di considerare simultaneamente diversi aspetti [248].

I principi per il raggruppamento dei punti si basano su regole geometriche, che possono essere valutate prendendo in considerazione le proprietà di singoli elementi (intensità, elevazione, vettore normale), oppure valutando la relazione fra punti adiacenti (ripidezza, differenza di altezza, omogeneità) [170, 171, 246].

A prescindere dalla tipologia di algoritmi che si possono implementare, la disposizione di un layer informativo contenente le impronte a terra degli edifici costituisce una grande semplificazione per il processo di segmentazione della nuvola di punti, in quanto rende possibile isolare le porzioni del

COD	NOME
0	Never classified
1	Unassigned
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Noise
8	Model Key / Reserved
9	Water
10	Rail
11	Road Surface
12	Overlap / Reserved
13	Wire – Guard
14	Wire – Conductor
15	Transmission Tower
16	Wire – Connector
17	Bridge Deck
18	High Noise
19-63	Reserved for ASPRS Definition (LAS 1.1 to 1.3 support up to class code 31)
32-255	User Definable (Only supported in LAS 1.0 and certain versions of 1.4)

Tab. 14. Classificazione ASPRS per le nuvole di punti.

rilievo digitale la cui proiezioni a terra ricadono all'interno del perimetro identificativo degli elementi costruiti, al netto di un offset corrispondente agli sporti di gronda.

Nel caso presente, ciò si rileva di fondamentale importanza poiché, per le applicazioni pianificate, risulta sufficiente far emergere gli edifici rispetto al suolo, mentre la parte restante della nuvola di punti può essere ragionevolmente considerata come vegetazione.

Nel caso applicativo, le operazioni sopra descritte vengono effettuate per mezzo dell'uso in sequenza di una coppia di strumenti di geoprocessing, che vengono messi a disposizione da ArcGIS Pro. In particolare:

- Set LAS class codes using features: Tutti i punti nello spazio che intersecano l'impronta bidimensionale di punti, linee e poligoni vengono classificati a seconda del codice assegnato. E' compresa la possibilità di prevedere una distanza di buffer per estendere l'area di influenza delle geometrie piane utilizzate come confronto. Nello specifico, è utilizzato per isolare i punti che caratterizzano l'edificato, per mezzo del confronto con le impronte a terra delle costruzioni;

- Classify LAS ground (Fig. 52): Classifica i punti della nuvola che appartengono al terreno, sulla base di algoritmi statistici che mettono in relazione i singoli punti con l'intorno, identificando le aree prive di discontinuità collocate alle quote inferiori.

Poiché il focus è incentrato sugli edifici, in seguito all'applicazione di questi due strumenti, nel caso in cui lo specifico contesto lo consenta, per differenza tutti i punti rimasti possono essere ragionevolmente classificati come Medium Vegetation.

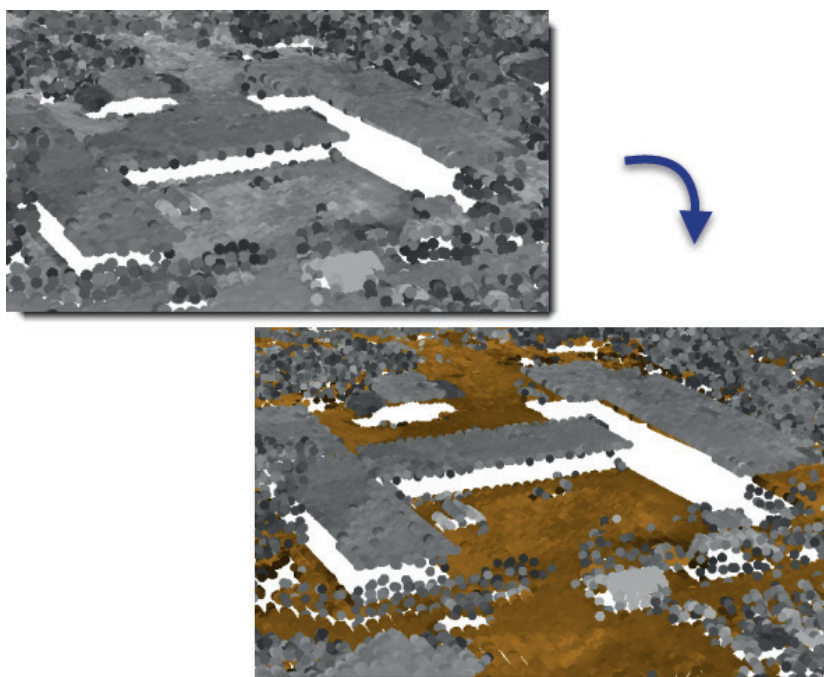


Fig. 52. Esempio di applicazione dello strumento di geoprocessing "Classify LAS ground" di ArcGIS [<https://pro.arcgis.com/>].

Completata la classificazione della nuvola di punti in relazione alle specifiche necessità di progetto, per procedere è necessario estrarre tre layer raster bidimensionali (Fig. 53, Fig. 54):

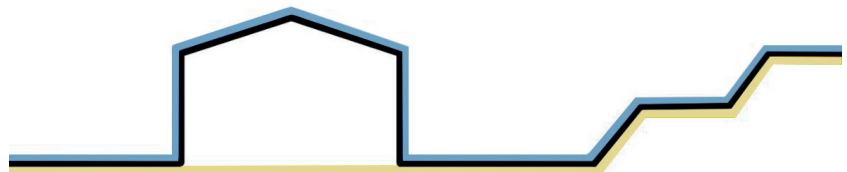
- DSM (Digital Surface Model): superficie statistica terrestre comprendente tutti gli elementi naturali e artificiali che insistono sul suolo, viene prodotto mediante l'elaborazione di tutti i punti che costituiscono la nuvola;
- DTM (Digital Terrain Model): superficie statistica terrestre che rappresenta la sola morfologia del suolo, viene prodotto considerando solo i punti classificati nella categoria ground;
- nDSM (normalized Digital Terrain Model): differenza fra DSM e DTM, utilizzata per determinare l'altezza degli elementi a partire dalla superficie del suolo.

L'operazione viene eseguita per mezzo del comando "LAS data to raster", avendo cura di filtrare la nuvola di punti in funzione della sua classificazione, a seconda dell'immagine che si sta andando a creare. Per quanto riguarda la risoluzione degli strati raster, in seguito alla valutazione comparata di diverse soluzioni, si è scelto di impostare la dimensione delle celle pari a 0.1 m.

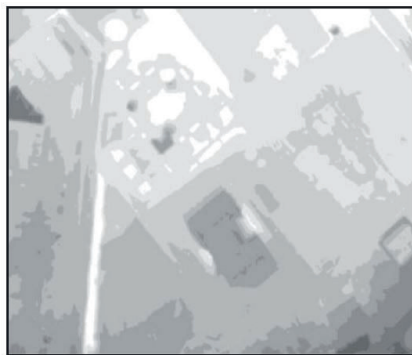
Da questo risultato, il processo per l'estrazione dei solidi costituenti l'edificato dell'area oggetto studio prosegue seguendo il flusso di lavoro raccomandato da ESRI [250]. La procedura non trova un vero e proprio riscontro in letteratura, anche se il metodo viene utilizzato da altre sperimentazioni scientifiche [251]. La funzione "Segment Buildings using Elevation" compie un'operazione di preprocessing sulle sagome degli edifici, dividendole sulla base dei segmenti individuabili dal DSM. Successivamente, la task "Create Buildings" permette di estrarre i fabbricati, fornendo come input il layer con le impronte

Fig. 53. Differenza fra DTM, in blu e DSM, in rosso.

Fig. 54. DSM (a sinistra), DTM (in centro) e nDSM (a destra) di Alcalá de Henares (Spagna) [249].



580 635



580 605



0 30



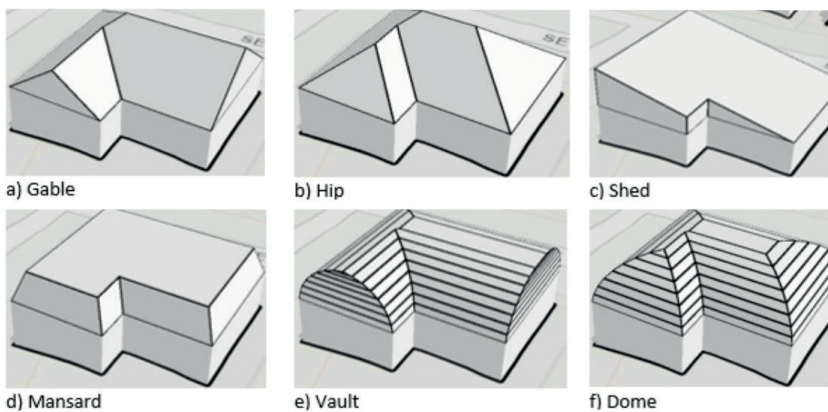


Fig. 55. Applicazione delle forme di tetto ammesse dallo script "Publish Schematic Buildings" su un edificio con pianta a L. Elaborazione da <https://www.esri.com/>.

a terra degli edifici e i tre livelli raster calcolati in precedenza. In questo passaggio, l'operazione più complessa risulta l'individuazione delle forme delle coperture. Questa avviene per mezzo del cosiddetto model driven method [252], che consiste nel confronto fra la nuvola di punti e un set predefinito di forme di tetti, al fine di individuare quella che si adatta meglio alla geometria di ciascun edificio. Nel caso specifico, l'algoritmo introduce tre nuovi attributi che determinano la morfologia delle coperture: BLDHEIGHT (altezza massima dell'edificio), EAVEHEIGHT (altezza di gronda) e ROOFFORM (forma del tetto). Quest'ultimo in particolare può assumere un numero finito di valori tra: Flat, Gable, Hip, Shed, Mansard, Vault e Dome (Fig. 55). La decisione sul valore da assegnare viene presa dallo script, in funzione del confronto con la nuvola di punti, procedendo secondo un diagramma di flusso che analizza la giacitura dei piani determinati dai punti.

Il risultato porta all'identificazione di un numero di oggetti pari a quello delle istanze del layer GIS 2D di partenza. Gli elementi generati sono di tipo PolygonZM, che vengono convertiti in Multipatch (entità tridimensionali che raccolgono in una sola riga le informazioni relative a più regioni definite nello spazio) mediante il comando "Layer 3D to feature class" per garantire maggiori possibilità di manipolazione. L'esito di questa procedura è globalmente soddisfacente, ma non può dirsi ottimale, in quanto si rende necessaria un'operazione di revisione e intervento manuale per la correzione degli errori, che si riscontrano specialmente nel caso di contesti storici densamente costruiti e caratterizzati da forme complesse degli edifici.

A livello informativo, poiché è già stabilita la finalità di trasformare il GIS 3D in un modello CityGML, i dati inseriti devono rispecchiare i requisiti per la definizione dei LOD1 e 2 che nella specifica dell'OGC sono attribuite alla classe degli Abstract Buildings (Tab. 15). Generalmente, molti di questi parametri sono già presenti nella cartografia GIS bidimensionale o possono essere ricavati dalle caratteristiche delle entità spaziali. In questo

NOME
class
function
usage
yearOfConstruction
yearOfDemolition
roofType
measuredHeight
storeysAboveGround
storeysBelowGround
storeysHeightAboveGround
storeysHeightBelowGround

Tab. 15. Attributi della classe CityGML AbstractBuilding.

caso, è possibile trasferire in modo automatizzato le proprietà coincidenti fra il GIS bidimensionale e quello tridimensionale per mezzo di un'intersezione geometrica, facendo uso dello strumento di ArcGIS Pro "Spatial join".

Oltre a ciò, la volontà di processare valutazioni energetiche sui modelli in fase di definizione fa sì che sia necessario integrare alcuni parametri, per rappresentare grandezze significative nell'ambito della valutazione del comportamento energetico degli edifici. In particolare:

- heatedArea: Area riscaldata (m²);
- heatedVolume: Volume riscaldato (m³);
- annualThermalEnergy: Fabbisogno di energia termica annuale (kWh/a);
- annualElecticalEnergy: Fabbisogno di energia elettrica annuale (kWh/a);
- hasEpc: Indica se l'edificio è dotato di APE (EPC Energy Performance Certificate);
- epcClass: Indica la classe del corrispondente APE.

Infine, trattando di strumenti che hanno a che fare con il panorama costruito nel contesto europeo, di cui si sono già discussi i caratteri ricorrenti, risulta opportuno considerare e conseguentemente mappare nei modelli alcuni attributi capaci di descrivere gli edifici storici. Ciò ha portato all'inserimento di un set di parametri capaci di descrivere le caratteristiche principali del patrimonio costruito, ponendo l'accento in particolare sul regime vincolistico e i soggetti ad esso correlati. Le proprietà integrative, definite a questo scopo sono [253]:

- denomination: Nome comunemente assegnato all'edificio;
- AATStylePeriod: Stile codificato secondo il dizionario Art & Architecture Thesaurus del Getty Research Institute;
- hasCHDeclaration: Indica se esiste un vincolo sull'edificio;
- CHDeclarationDocument: Codice identificativo del documento di vincolo;
- ownership: Riferimento al soggetto fisico o giuridico che detiene la proprietà del bene;
- preservationAuthorityName: Autorità competente in tema di protezione.

4.2. Modelli informativi

La fase di realizzazione dei modelli BIM a partire da rilievi digitali rappresentati attraverso disegni bidimensionali (piante, sezioni, prospetti ecc.) o nuvole di punti non comporta particolari elementi di novità. Tuttavia, la definizione dei requisiti del modello per il suo inserimento in un flusso di lavoro basato sull'interoperabilità dei sistemi informativi, può meritare alcune riflessioni. Infatti, è importante che i modelli, intesi come

sintesi della realtà, siano pensati in relazione all'uso finale che se ne deve fare, caratterizzando propriamente ciascuno degli elementi che li compone. Nel caso specifico, la modellazione di edifici esistenti volta sia all'esportazione verso CityGML che alla gestione di dati di tipo energetico sul panorama costruito esistente genera requisiti che impattano parimenti sulla qualità della rappresentazione geometrica e sul contenuto informativo.

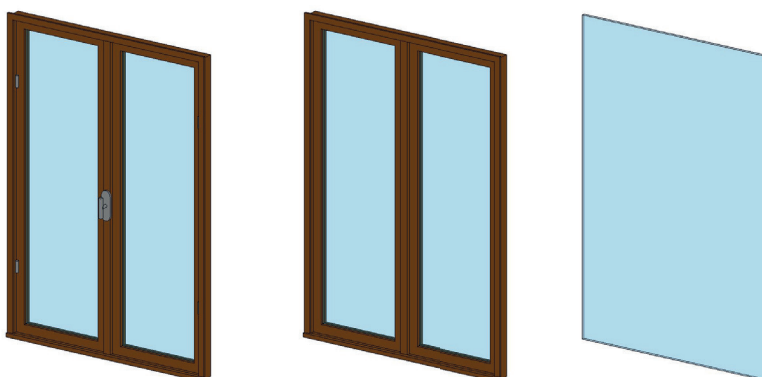
Si è già posto l'accento sulla continuità che sussiste fra GIS e BIM, e sul fatto che il Livello di Definizione più alto per il primo sistema informativo possa essere inteso come corrispondente al più basso per il secondo. Poiché la presente ricerca si focalizza sulle fasi preliminari del processo edilizio, in cui la relazione fra obiettivi multiscalari assume massima rilevanza, il punto di congiunzione fra i due modelli dati esprime esattamente il livello dei contenuti che interessa sviluppare, risultando il più adatto per la definizione di valutazioni strategiche sui fabbricati.

In ambito energetico, a questo grado di approfondimento è sufficiente dettagliare gli elementi tecnici che compongono l'involucro termico ed edilizio dei fabbricati. Per questo motivo, delle numerose categorie del modello offerte da Autodesk Revit, è sufficiente considerarne un numero ristretto, che comprende Muri, Pavimenti, Controsoffitti, Porte e Finestre. Tuttavia, al fine di distinguere i flussi termici che attraversano elementi caratterizzati da diverse condizioni al contorno, occorre che la classificazione di queste categorie sia più granulare rispetto a quanto viene normalmente definito dal software. A questo scopo, risulta utile implementare i sistemi di classificazione per una più efficace scomposizione dell'organismo edilizio. In particolare, secondo quanto indicato nella tabella 21 (Elements) di OmniClass, le entità prese in considerazione vengono suddivise, come schematizzato in Tab. 16. Tuttavia, perché il sistema informativo resti aperto

Tab. 16. Classi di elementi considerati nella costruzione dell'involucro edilizio, secondo quanto riportato nella Tab. 21 (Elements) di Omniclass.

ELEMENTO	CODICE	TITOLO	TITOLO Livello 2	TITOLO Livello 1
Muri interrati	21-01 20 10	Walls for Subgrade Enclosures	Subgrade Enclosures	Substructure
Pavimenti interrati	21-01 40	Slabs-On-Grade	Slabs-On-Grade	Substructure
Pavimenti (struttura)	21-02 10 10	Floor Construction	Superstructure	Shell
Tetti (struttura)	21-02 10 20	Roof Construction	Superstructure	Shell
Muri esterni	21-02 20 10	Exterior Walls	Exterior Vertical Enclosures	Shell
Finestre esterne	21-02 20 20	Exterior Windows	Exterior Vertical Enclosures	Shell
Porte esterne	21-02 20 50	Exterior Doors and Grilles	Exterior Vertical Enclosures	Shell
Tetti	21-02 30 10	Roofing	Exterior Horizontal Enclosures	Shell
Tetti inclinati	21-02 30 10 10	Steep Slope Roofing	Exterior Horizontal Enclosures	Shell
Tetti piani	21-02 30 10 50	Low-Slope Roofing	Exterior Horizontal Enclosures	Shell
Pavimenti sospesi	21-03 10 60	Raised Floor Construction	Interior Construction	Interiors
Muri interni	21-03 10 10	Interior Partitions	Interior Construction	Interiors
Finestre interne	21-03 10 20	Interior Windows	Interior Construction	Interiors
Porte interne	21-03 10 30	Interior Doors	Interior Construction	Interiors

Fig. 56. Tre livelli di dettaglio della rappresentazione di una finestra in Autodesk Revit.



ad altre finalità oltre a quella qui specificamente approfondita, nell'esportazione è bene considerare un numero più vasto categorie, che fanno parte della morfologia dell'edificio, pur non concorrendo alla sua caratterizzazione fisico-tecnica preliminare, quali Scale, Colonne, Modelli generici e Telai Strutturali (Pilastri e Travi).

Dal punto di vista della modellazione geometrica dei singoli componenti, occorre impostare correttamente i livelli di dettaglio delle famiglie coinvolte nei progetti, assicurandosi che il più basso fra quelli previsti da Autodesk Revit sia coerente con le specifiche di CityGML. In questo ambito, l'esempio più chiaro è fornito dalla categoria delle finestre, la cui rappresentazione geometrica può assumere forme anche molto complesse. Com'è possibile comprendere da Fig. 56, mentre i livelli di dettaglio alti conservano tutte le caratteristiche del serramento con lievi differenze, allo stadio più basso la finestra degenera in una lastra vetrata. Nonostante l'area di quest'ultima appaia chiaramente maggiore delle due superfici vetrate della finestra originale, occorre sottolineare che i valori numerici associati al

Tab. 17. Parametri condivisi applicati agli elementi del modello.

PARAMETRO	UdM	TIPO	MURI	FINESTRE	PORTE	PAVIM.	TETTI
Involucro termico	/	Si/No	X	X	X	X	X
Trasmittanza termica	Wm ² /K	Numero	X	X	X	X	X
Fattore solare	/	Numero		X	X		
Emissività	/	Numero	X	X	X	X	X
Fattore di assorbimento solare	/	Numero	X		X	X	X
Tipo parete	/	Testo	X				
Angolo di ombreggiamento α_{fin}	/	Numero	X	X	X		
Angolo di ombreggiamento α_{hor}	/	Numero	X	X	X		
Angolo di ombreggiamento α_{ov}	/	Numero	X	X	X		
Condizione al contorno	/	Testo	X	X	X	X	X
Temperatura adiacente	°C	Numero	X	X	X	X	X
Esposizione	/	Testo	X	X	X		
Area	m ²	Numero	X	X	X	X	X
Spessore	m	Numero	X			X	X

componente rimangono immutati, e che quindi, a prescindere dalla qualità del modello geometrico, i dati sull'area vetrata e su quella del serramento rimangono coerenti.

Per quanto riguarda il contenuto informativo, in vista dell'utilizzo specifico che si farà del modello, anche in questo caso una lista di nuove specifiche viene aggiunta a quella di default. Tutti i nuovi attributi sono definiti come "parametri condivisi", individuati da un file di testo (.txt) esterno ai modelli, che garantisce la ripetibilità dell'applicazione a qualsiasi progetto. In particolare, in relazione all'ambito energetico si introducono (Tab. 17):

- Involucro termico: Indica se il componente fa parte dell'involucro termico e quindi se vada computato ai fini della simulazione energetica;
- Trasmittanza termica: Quantità di potenza termica scambiata da per unità di superficie e unità di differenza di temperatura;
- Fattore solare: Per materiali traslucidi, rapporto tra l'energia termica trasmessa e quella incidente;
- Emissività: Frazione di energia irraggiata rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero alla stessa temperatura;
- Fattore di assorbimento solare: Porzione di energia assorbita dai componenti opachi dell'involucro edilizio in relazione alla radiazione incidente;
- Tipo parete: Classificazione in funzione della tipologia di parete, effettuata secondo la UNI/TS 11300-1:2014 [254] (Tab. 18) volta alla stima preliminare dei contributi dei ponti termici ai flussi di calore;
- Angoli di ombreggiamento: Angoli formati fra il baricentro di un oggetto ed eventuali ostacoli esterni;
- Condizione al contorno: Caratterizzazione degli spazi presenti oltre all'elemento tecnico secondo la definizione della norma UNI EN 12831:2018 [255] (Tab. 19);
- Temperatura adiacente: Indicazione della temperatura a cui considerare eventuali locali limitrofi non inclusi nel calcolo energetico;
- Esposizione: Punto cardinale verso cui il componente è rivolto;
- Area: Area del componente;
- Spessore: Spessore del componente.

Tab. 18. Tipologie di parete per la determinazione semplificata del contributo dei ponti termici lineari. Rielaborazione da [254].

TIPO DI PARETE
Pareti con isolamento dall'esterno senza aggetti/balconi e ponti termici corretti
Pareti con isolamento dall'esterno con aggetti/balconi
Parete omogenea in mattoni o pietra (senza isolante)
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno

CONDIZIONE AL CONTORNO
Esterno
Ambiente riscaldato alla stessa temperatura
Ambiente riscaldato ad altra temperatura
Ambiente con una parete esterna
Ambiente senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne
Ambiente con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne
Ambiente con tre pareti esterne
Piano interrato o seminterrato senza finestre o serramenti esterni
Piano interrato o seminterrato con finestre o serramenti esterni
Sottotetto tasso di ventilazione del sottotetto elevato senza rivestimento con feltro o assito
Sottotetto altro tetto non isolato
Sottotetto tetto isolato
Aree interne di circolazione senza muri esterni
Aree interne di circolazione liberamente ventilate
Solette sospese (solette sopra vespaio)
Pavimento o parete controterra

Tab. 19. Condizioni al contorno e relativi fattori di correzione del flusso termico. Rielaborazione da [255].

Allo stesso modo, in funzione della caratterizzazione degli elementi tecnici degli edifici storici [253], si aggiungono:

- hasAuthor: Autore riconosciuto dell'opera;
- timeOfBeginningExistence: Periodo di costruzione;
- timeOfEndingExistence: Periodo di demolizione;
- deterioration: Presenza di degradi, secondo la specifica NorMal 1/88 [256].

Infine, in relazione alle caratteristiche degli impianti termici, che vengono incluse per la prima volta a questo livello di dettaglio, si procede attraverso l'introduzione di alcuni parametri nella categoria "Project Information". Le caratteristiche individuate vanno ripetute per ciascun sottosistema o componente impiantistico che si vuole comprendere nella descrizione del sistema. La terminologia e i riferimenti impiegati in questa sezione derivano dal Libretto di impianto dell'edificio. In funzione del sottosistema impiantistico di pertinenza, si esplicitano:

- codeHvac: Codice identificativo del componente impiantistico;
- denominationHvac: Denominazione del componente;
- descriptionHvac: Descrizione del componente;
- deliveredPowerHvac: Potenza utile del componente;
- installationYearHvac: Anno di installazione del componente;
- efficiencyHvac: Rendimento del componente.

In seguito alla caratterizzazione del modello informativo, si procede alla sua esportazione verso il modello per l'interoperabilità IFC. In questa fase occorre fare attenzione a tutte le specifiche che sono state definite all'interno del modello, al fine di veicolarle nel modo corretto. La procedura più formale, in questo frangente, sarebbe la progettazione e l'applicazione di

una specifica Model View Definition per IFC, che agisca da filtro nei confronti delle categorie e integri i nuovi parametri. Tuttavia, la mancata apertura alle MVD customizzate che è stata rilevata in Autodesk Revit costringe all'adozione di un percorso alternativo e meno strutturato. La selezione delle categorie del modello da esportare avviene quindi per mezzo della finestra "IFC Options" del software di modellazione, che permette di caricare file di testo (.txt) definiti esternamente, nei quali è contenuta la matrice di conversione fra categorie di Revit e classi di IFC. Nel caso specifico, gran parte dei campi dati viene settato su "Not Exported", mentre le categorie del modello che costituiscono l'involucro edilizio (più alcune altre di cui si è già discusso) vengono indirizzate alle classi IFC corrispondenti, come riportato in Tab. 20. In coerenza con quanto espresso in precedenza, il livello di dettaglio dell'esportazione viene impostato al minimo. Per quanto riguarda gli attributi aggiuntivi definiti nel modello, il passaggio dell'informazione dal formato proprietario di Autodesk Revit a IFC avviene per mezzo di un'opzione offerta da IFC exporter: un plug-in che permette di ampliare la gamma di proprietà dell'esportazione. Si tratta di "export schedules as property sets" (esporta abachi come property set di IFC), che consente di generare degli insiemi di proprietà mappati su categorie specifiche sulla base di abachi quantità definiti all'interno del progetto. Se, per esempio, esiste nel progetto un abaco dei Muri che riporta i parametri "Trasmittanza termica" e "Fattore solare", introdotti nel modello come parametri condivisi e successivamente compilati, allora nell'esportazione IFC questi verranno conservati e raggruppati in un insieme che porta il nome dell'abaco stesso.

4.3. Application Domain Extension

Prima di passare al dettaglio della conversione dei modelli dati verso CityGML, occorre delineare le caratteristiche dell'Application Domain Extension che è stata sviluppata per supportare i contenuti informativi del progetto. Per la sua progettazione, i principali riferimenti in letteratura sono da individuarsi in due ADE già sviluppate e nei processi di ricerca che hanno portato alla loro definizione. La prima è la CityGML Energy ADE, sviluppata a partire dal 2015 da un gruppo di ricerca dell'Università Tecnica di Delft [257, 258]. Si tratta di un'estensione dello schema molto estesa e complessa, che è stata ufficialmente riconosciuta dall'OGC e viene oggi distribuita insieme allo standard nella sua seconda versione. La Energy ADE comprende nuovi attributi, classi e tipi di dato ed è stata progettata allo scopo di veicolare le informazioni necessarie ad eseguire analisi energetiche degli edifici anche in regime dinamico. Alcune definizioni della CityGML Energy ADE vengono riprese per dettagliare il comportamento energetico dei

CATEGORIE REVIT	CLASSI IFC
Ceilings	IfcCovering
Columns*	IfcColumn
Doors	IfcDoors
Floors	IfcSlab
Generic Models*	IfcBuilding ElementProxy
Project	IfcProject
Roofs**	IfcRoofs
Site	IfcSite
Stairs*	IfcStair
Structural Framing*	IfcBuilding ElementProxy
Walls	IfcWalls
Windows	IfcWindows

Tab. 20. Corrispondenza fra Categorie di Revit e Classi di IFC. Gli elementi identificati con * vengono conservati in quanto facenti parte della morfologia degli edifici, ma non costituiscono elementi di calcolo ai fini delle simulazioni energetiche. La categoria indicata con **, invece, merita un trattamento a parte, che si terrà in seguito.

componenti edilizi. Tuttavia, non è parso appropriato utilizzarla in tutta la sua complessità, in quanto il contesto in cui si opera, in coerenza con la fase del processo edilizio in cui si colloca, non presenta la necessità di supportare simulazioni energetiche ad un tale livello di approfondimento.

Il secondo riferimento deriva dal lavoro di Francesca Noardo, che con la sua ricerca ha sviluppato un'estensione del modello dati CityGML rivolta alla gestione dei beni culturali [259, 260]. L'importanza di questa proposta, e quindi la necessità di includerla nel presente progetto, sta proprio nella volontà di agevolare le operazioni di gestione dei manufatti storici, centrando una serie di attributi sul regime vincolistico che può insistere sugli edifici e sui soggetti competenti in materia. L'adozione di alcune specifiche provenienti da questa estensione del modello dati permette di arricchire la base informativa, aggiungendo informazioni anagrafiche e normative fondamentali per la descrizione dei manufatti storici.

Gli attributi aggiuntivi che vengono introdotti nel modello dati sono già stati menzionati al capitolo precedente, dove si sono individuati specifiche proprietà da compilare sia alla scala urbana che a quella edile, rispettivamente nei modelli GIS e BIM. Questa serie di parametri è pensata per relazionarsi al panorama costruito in vista di eseguire valutazioni e analisi energetiche, senza però tralasciare gli aspetti peculiari che potrebbero caratterizzarlo, in funzione della possibilità di avere a che fare con edifici storici. Componendo quindi quanto visto precedentemente, si trovano due liste di attributi da integrare nel modello dati CityGML, come riportato in Tab. 21.

Noto il contenuto informativo che si vuole aggiungere al modello dati CityGML, per la definizione della ADE va compilato il relativo diagramma UML, secondo le specifiche emesse dall'OGC [229]. A partire dallo schema che rappresenta il modulo Building e tenendo conto delle regole di aggregazione e di eredità, in generale, i parametri che hanno a che fare con tutte le possibili entità che insistono sul panorama urbano vanno mappati nella classe CityObject, quelli che incidono solo sugli edifici vanno inseriti nella classe AbstractBuilding, mentre quelli che descrivono le proprietà degli elementi tecnici vanno aggiunti alla classe BuildingSurface. A questo schema fa eccezione solo

Tab. 21. (serie) Parametri introdotti nei modelli GIS e BIM per gli edifici e gli elementi tecnici che li compongono.

PROGETTO	AMBITO
codeHvac	Energetico
denominationHvac	Energetico
descriptionHvac	Energetico
deliveredPowerHvac	Energetico
installationYearHvac	Energetico
efficiencyHvac	Energetico

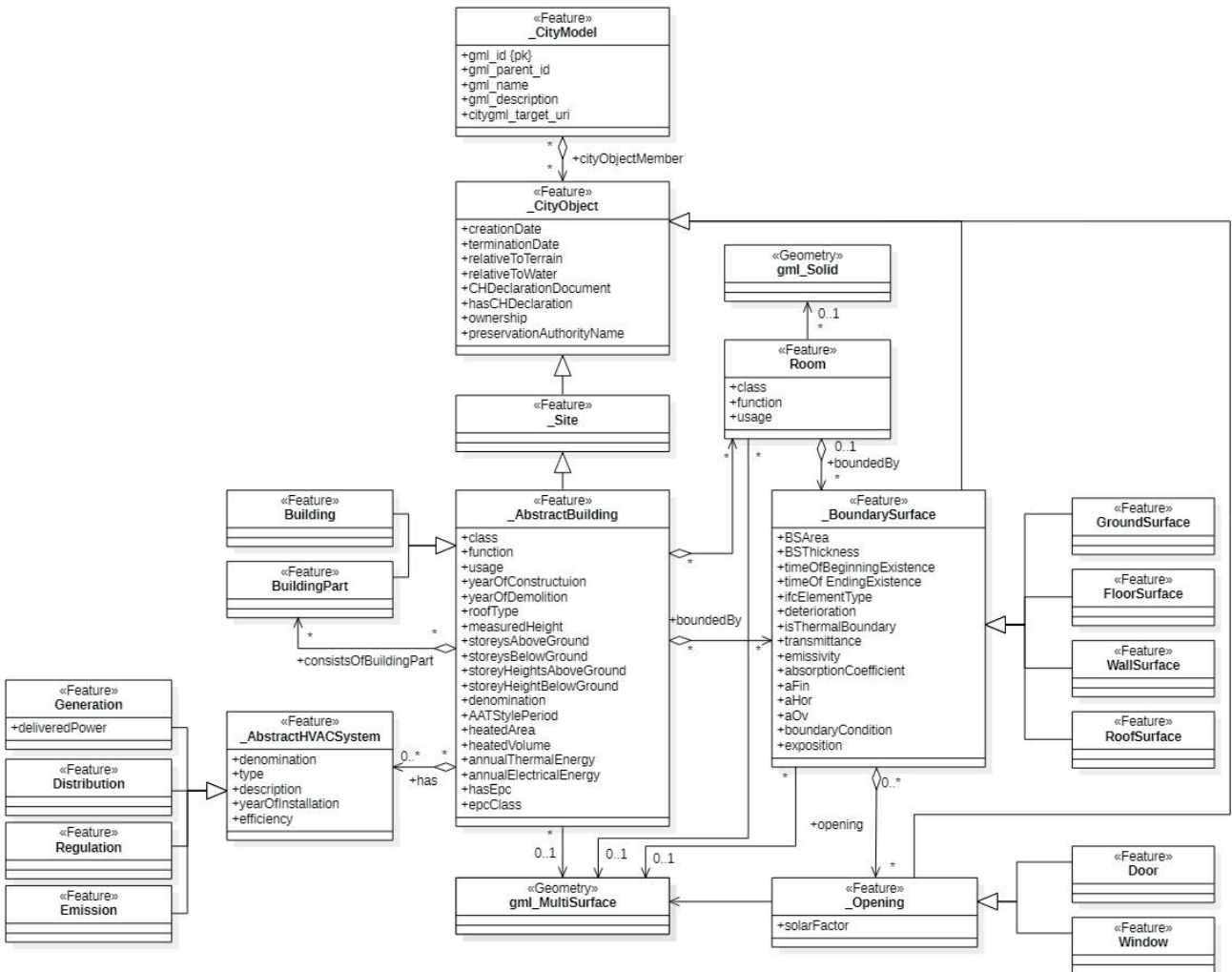
EDIFICIO	AMBITO
class	CityGML
function	CityGML
usage	CityGML
yearOfConstruction	CityGML
yearOfDemolition	CityGML
roofType	CityGML
measuredHeight	CityGML
storeysAboveGround	CityGML
storeysBelowGround	CityGML
storeysHeightAboveGround	CityGML
storeysHeightBelowGround	CityGML
denomination	Valore culturale
AATStylePeriod	Valore culturale
hasCHDeclaration	Valore culturale
CHDeclarationDocument	Valore culturale
ownership	Valore culturale
preservationAuthorityName	Valore culturale
heatedArea	Energetico
heatedVolume	Energetico
annualThermalEnergy	Energetico
annualElectricalEnergy	Energetico
hasEpc	Energetico
epcClass	Energetico

ELEMENTO TECNICO	AMBITO
BSArea	Generico
BSThickness	Generico
hasAuthor	Valore culturale
timeOfBeginningExistence	Valore culturale
timeOfEndingExistence	Valore culturale
deterioration	Valore culturale
isThermalBoundary	Energetico
transmittanceU	Energetico
solarFactorG	Energetico
emissivityE	Energetico
AbsorptionCoefficientA	Energetico
aFin	Energetico
aHor	Energetico
aOv	Energetico
boundaryCondition	Energetico
exposition	Energetico
ifcElementType	BIM

l'attributo solarFactorG, che può rientrare direttamente nella classe Openings, in quanto si applica solo ai componenti apribili, quali porte e finestre. Per l'introduzione dei sistemi impiantistici nello schema dell'edificio, si è scelto invece di realizzare delle nuove Feature Class: una astratta che funge da collettore e assegna gli attributi per eredità più quattro specifiche per ciascun sottosistema impiantistico. In questo modo, è possibile definire un numero qualsiasi di componenti di impianto, che vanno ad aggregarsi nello stesso sistema, collegato a sua volta alla classe AbstractBuilding.

Lo schema UML complessivo dell'ADE così costituita è mostrato in Fig. 57. In relazione allo scopo per cui è stata programmata, l'estensione prende il nome di EM_ADE (Energy Management Application Domain Extension). Si tratterà in seguito di come il diagramma UML possa essere convertito affinché le informazioni in esso contenute siano utilizzate per l'effettiva espansione della struttura di CityGML e per la definizione dello schema della base di dati in cui verranno riversati i modelli.

Fig. 57. Schema UML della EM_ADE.



4.4. CityGML LOD1,2

Tornando al modello urbano, una volta definito il nuovo schema integrato di CityGML, occorre progettare una serie di passaggi per rendere il GIS tridimensionale idoneo al trasferimento delle informazioni. Come si è già avuto modo di vedere, i contenuti ottenuti sono già quelli che ci si aspetta di riversare nello schema CityGML, mentre ciò che ancora manca è la struttura semantica del modello dati, che va organizzata sia dal punto di vista geometrico che da quello informativo.

A partire dalle geometrie Multipatch, che sono state create all'interno del software ESRI ArcGIS, le prime operazioni da compiere sono la scomposizione dei modelli degli edifici in superfici e la classificazione delle stesse, secondo la struttura proposta dal modello dati CityGML. In questi passaggi, una prima impronta gerarchica viene impressa al modello, al fine di mantenere legati gli edifici alle superfici che ne costituiscono l'involucro.

Le trasformazioni avvengono inizialmente per mezzo della piattaforma di programmazione visuale Safe FME, all'interno della quale si definiscono tre script da processare in sequenza:

1. A partire dal modello così come è stato prodotto da ArcGIS Pro, ovvero costituito da una serie di geometrie Multipatch, gli insiemi di superfici vengono inizialmente scomposti (Deaggregator), avendo cura di mantenere traccia della gerarchia del modello, e poi riformate sulla base di tolleranze dimensionali settate in funzione dell'offset fra i piani e dell'allineamento dei vettori normali (SurfaceDissolver). Così facendo, si riesce a produrre un numero ragionevole di superfici, capaci di rappresentare gli involucri edilizi scomponendone le entità costituenti. L'output dell'algoritmo registra le nuove informazioni convertendo la geometria da Multipatch a Polygon. Noti gli attributi di partenza, in uscita si definiscono e si popolano tre nuovi campi dati (ID_EDIF, ID_PART e ID_SUP) che identificano in modo univoco gli edifici, le parti e le superfici costituenti. In questo modo, ciascuna superficie sarà marcata con i dati che riguardano anche le entità aggregate di livello superiore, permettendo di tracciare la gerarchia che caratterizza il modello (Fig. 58).

2. Per ogni superficie che è stata determinata al passo precedente vengono estratti gli attributi spaziali x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max} , z_{min} e z_{max} (BoundsExtractor). Successivamente, vengono aggiunte le informazioni sulle normali alle superfici e sull'inclinazione rispetto al piano orizzontale (SurfaceNormalCalculator). La mappatura di questi dati servirà in seguito per la classificazione delle entità sulla base di regole geometriche (Fig. 59).

3. Le facce dei poligoni vengono orientate in modo da avere la normale uscente diretta verso l'esterno (Orientor), i valori delle proprietà calcolate con lo script precedente vengono arrotondati alla quarta cifra decimale (AttributeRounder) e nuovi

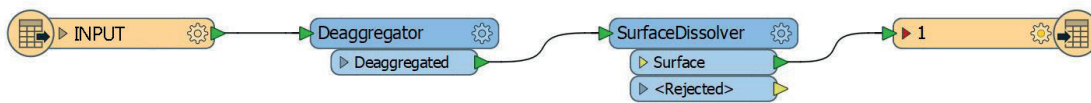


Fig. 58. Script FME per la scomposizione delle superfici del modello

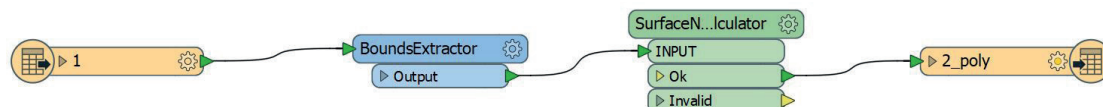


Fig. 59. Script FME per la caratterizzazione delle superfici secondo attributi geometrico-spaziali

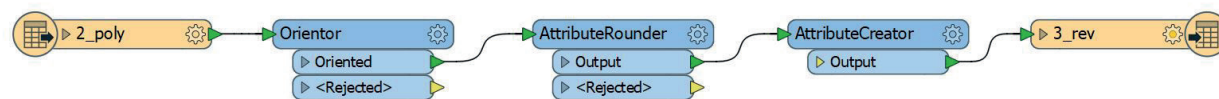


Fig. 60. Script FME per la caratterizzazione delle superfici secondo attributi geometrico-spaziali.

attributi calcolati vengono creati per registrare il valore assoluto delle normali alle superfici (AttributeCreator). Il livello di output è ancora caratterizzato da geometrie tipo 3D Polygon (Fig. 60).

In seguito, il file in uscita dal terzo script viene riportato in ambiente ArcGIS Pro per procedere alla classificazione delle entità del modello. Nel software GIS un breve script compilato in linguaggio Python definisce una funzione che, sulla base delle caratteristiche geometrico-spaziali estratte e registrate nel secondo script sviluppato in Safe FME, permette il discernimento delle superfici, che vengono distinte fra Roof, Ground e Wall per mezzo di un parametro appositamente creato e compilato. Si ottiene così un file in formato shape in cui le superfici costituenti gli involucri degli edifici sono separate, ma collegate da parametri che tengono traccia della struttura gerarchica del modello e in cui sono presenti tutte le informazioni necessarie per la definizione del modello CityGML ai livelli di dettaglio più bassi.

Giunti a questo punto, si ha a disposizione l'apparato geometrico e informativo per la conversione del modello urbano verso CityGML, ma occorre ancora strutturare le regole semantiche che lo caratterizzano. Per portare a compimento quest'ultima operazione, si ricorre ancora una volta al software per la programmazione visuale Safe FME, facendo inizialmente riferimento al flusso di lavoro presentato da Sengül in [261]. Per la definizione degli edifici, sei classi tematiche di CityGML vengono mappate a partire dal GIS tridimensionale: CityModel, Building (LOD1 and LOD2), BuildingPart (LOD1 and LOD2), RoofSurface, GroundSurface and WallSurface. Il modello del terreno, invece, è stato realizzato direttamente importando la

nuvola di punti in FME e trasferendone il contenuto rielaborato verso le classi ReliefFeature e TINRelief (Fig. 61). Lo script è stato diviso in undici parti, per poter leggere e scrivere separatamente le informazioni relative a ogni classe di CityGML. Per ciascuna, infatti, i blocchi di codice acquisiscono dai dati di input sia la geometria che gli attributi e definiscono le relazioni che intercorrono fra di esse. In uscita, invece, in conformità con le specifiche dell'OGC, i dati spaziali non vengono sempre associati ai contenuti informativi. Nel modello dati CityGML, infatti, la geometria viene rappresentata solo nella classe più bassa di ciascun livello di dettaglio, mentre le rimanenti sono composte solo da informazioni di tipo non spaziale (Fig. 62). La geometria corrispondente al LOD1 viene generata all'interno dello script per mezzo dell'estrusione dell'impronta a terra degli edifici e registrata nelle classi Building o BuildingPart. Per la definizione geometrica del LOD2, invece, vengono utilizzate le superfici introdotte dal file Shape tridimensionale, che trovano la loro collocazione nelle classi semantiche WallSurface, GroundSurface e RoofSurface. La struttura gerarchica del modello è preservata grazie alla serie di relazioni genitore-figlio che collegano tutti i blocchi.

Nel dettaglio, a fini esplicativi, è possibile scomporre lo script in 16 parti composte da un numero non omogeneo di blocchi di manipolazione, che vengono raggruppati per tema (Fig. 63).

1. Importazione della nuvola di punti in formato LAS.
2. Si procede con l'unione dei file LAS in un unico data set (PointCloudCombiner) e con il filtraggio della nuvola per mantenere solo i punti corrispondenti alla classe del terreno (PointCloudFilter). Successivamente, nel ramo superiore viene rimossa ogni componente geometrica (GeometryRemover),

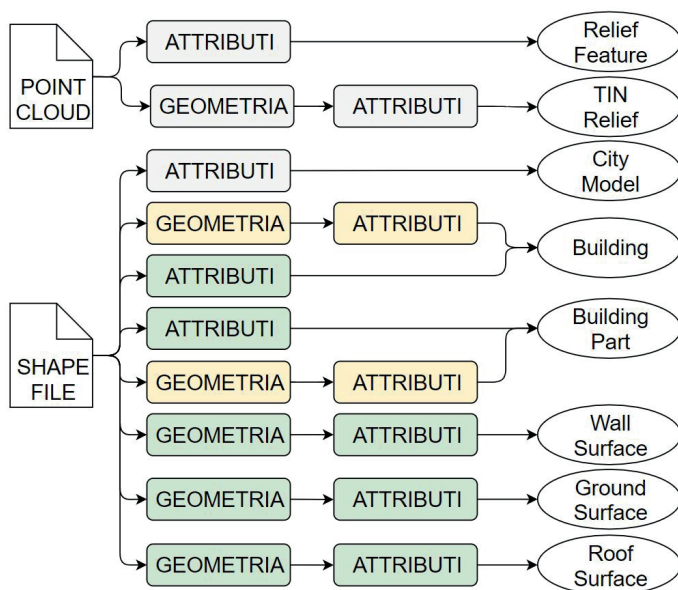
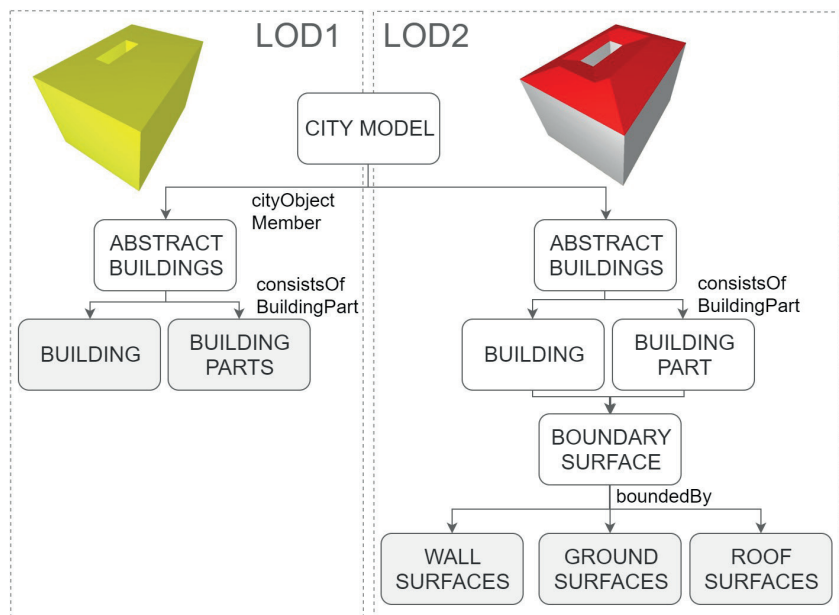


Fig. 61. Schema concettuale della procedura per convertire il GIS 3D in un modello CityGML. In giallo le operazioni relative alla definizione del LOD1 e in verde quelle relative al LOD2.

Fig. 62. Struttura dell'informazione di CityGML nella classe Building per il LOD1 e LOD2. I blocchi campiti in grigio evidenziano le entità che trasportano le geometrie degli oggetti.



vengono creati due attributi per la registrazione dell'ID di ciascuna entità e dell'oggetto corrispondente al livello superiore (coppia ID, parentID) (AttributeCreator) e il risultato viene mandato alla classe ReliefFeature. Nel ramo inferiore, invece, dalla nuvola di punti filtrata viene prodotta una triangolazione (TINGenerator), poi semplificata (Mesh Simplifier). In successione, il nodo CityGMLGeometrySetter, che tornerà più volte nel processo, permette di importare il "CityGML LOD Name" e il "featureRole", due parametri fondamentali per la strutturazione del modello CityGML, con riferimento al suo funzionamento multiscalare. Viene poi creata una serie di attributi propri del modello dati CityGML (citygml_level_of_detail, fme_feature_type, xml_type, gml_geometry, srs_dimension, gml_parent_id e gml_id) (AttributeCreator), che vengono impressi alla geometria per mezzo del blocco GeometryPropertySetter. Questa operazione converte gli attributi comuni nei cosiddetti "Trait", ovvero proprietà capaci di ancorarsi alle entità spaziali. La geometria e le informazioni processate in questa parte vanno a fondersi nella classe TINRelief.

3. La classe CityModel, che costituisce il livello più alto delle entità presenti in questo modello, viene generata all'interno dello script (Crator) e dotata di un'ID e di un nome (AttributeCreator).

4. Importazione del GIS tridimensionale in formato Shape.

5. Preliminarmente alle operazioni per la definizione degli edifici al LOD1 e 2, si procede all'aggregazione delle entità sulla base del parametro ID_EDIF per ricostruire gli edifici a partire dalle superfici (Aggregator), e all'eliminazione della componente geometrica (GeometryRemover), giustificata dal fatto che nel presente modello, tutti gli edifici sono definiti per mezzo della classe BuildingPart, quindi nessuna entità della classe Building si fa portatrice di componenti geometriche.

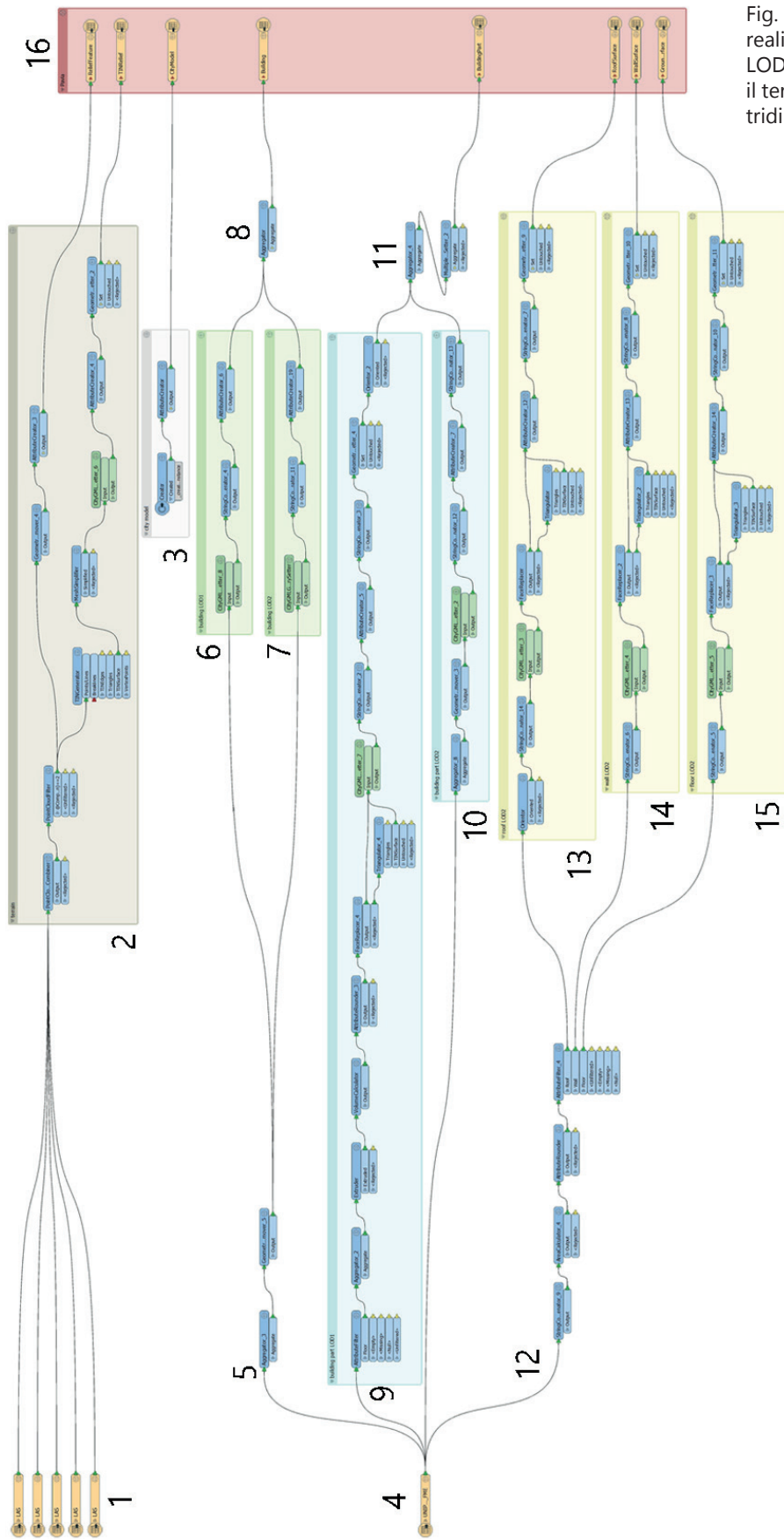


Fig. 63. Script completo per la realizzazione di un modello CityGML LOD1 e LOD2 capace di rappresentare il terreno e gli edifici a partire da un GIS tridimensionale.

6, 7. Per la compilazione della classe Building in LOD1 e LOD2, si impostano i parametri "CityGML LOD Name" e "Feature Role" (CityGMLGeometrySetter), si modifica il parametro ID_EDIF in modo che tutti i valori, costituiti da numeri interi progressivi, siano preceduti dal prefisso BLD_ (StringConcatenator) e si crea una serie di attributi propri del modello dati CityGML (AttributeCreator). I due blocchi di codice, apparentemente uguali, differiscono per il valore dato all'attributo "CityGML LOD Name".

8. Prima dell'immissione finale nella classe di destinazione, si procede all'aggregazione delle entità Building definite in LOD1 e 2 per la collocazione nella classe semantica di pertinenza (Aggregator).

9. Per la definizione della classe BuildingPart al LOD1, occorre generare la geometria solida per mezzo dell'estrusione delle impronte a terra degli edifici. Si procede quindi con: filtraggio degli elementi del modello GIS 3D per mantenere solo le superfici di pavimento (Ground) (AttributeFilter), aggregazione delle stesse secondo l'attributo ID_PART (Aggregator), estrusione fino al punto più alto, valutato sulla nuvola di punti (Extruder), calcolo del volume (VolumeCalculator) e arrotondamento del relativo valore (AttributeRounder). Successivamente, il nodo FaceReplacer sostituisce la geometria degli elementi da poligoni con facce, ossia entità planari dotate di un vettore normale che identifica un fronte e un retro. Da questo punto, gli oggetti rifiutati vengono triangolati (Triangulator) e mandati al blocco CityGMLGeometrySetter, dove si ricongiungono con le altre occorrenze, e ricevono gli attributi "CityGML LOD Name" e "Feature Role". In chiusura, gli ID di Building e BuildingPart vengono concatenati rispettivamente con i prefissi "BLD_" e "PRT_" per rendere ogni identificativo effettivamente univoco nel database (StringConcatenator), un set di nuovi attributi per la gestione del file CityGML viene creato (AttributeCreator) e tutte le proprietà vengono impresse nelle geometrie (GeometryPropertySetter). Come ultima operazione, il nodo "Orientor" permette di orientare le facce assicurandosi che la normale uscente sia sempre rivolta verso l'esterno.

10. La definizione delle BuildingPart al LOD2 è più semplice, in quanto la classe non deve contenere informazioni di tipo geometrico. Le superfici del modello GIS vengono aggregate in funzione del parametro ID_PART (Aggregator), le componenti geometriche vengono rimosse (geometryRemover), "CityGML LOD Name" e "Feature Role" vengono esplicitati (CityGMLGeometrySetter), gli ID di Building e BuildingPart vengono concatenati rispettivamente con i prefissi "BLD_" e "PRT_" (StringConcatenator) e i parametri specifici per la gestione del file CityGML vengono creati e compilati (AttributeCreator).

11. Prima dell'immissione nella classe BuildingPart, gli output

deiblocchi 9 e 10, corrispondenti alle medesime entità descritte in LOD1 e LOD2, vengono aggregati (Aggregate) e viene esplicitato il ruolo della geometria nel LOD2, svincolandola dai contenuti del LOD1 (MultipleGeometrySetter).

12. Per la gestione delle superfici del modello, che andranno a realizzare la geometria delle entità al LOD2, si procede preliminarmente con la rimodulazione del parametro ID_SUP in modo che tutti i valori, costituiti da numeri interi progressivi, siano preceduti dal prefisso SRF_ (StringConcatenator), il calcolo dell'area di ciascuna superficie (AreaCalculator) e l'arrotondamento alla terza cifra decimale (AttributeRounder). Dopodiché, avviene il filtraggio delle entità sulla base dell'attributo SUP_TYPE, fra Roof, Ground e Wall.

13. Per la compilazione della classe semantica RoofSurface, le facce vengono innanzitutto orientate correttamente (Orientor), gli ID di Building e BuildingPart vengono concatenati rispettivamente con i prefissi "BLD_" e "PRT_" (StringConcatenator) e i parametri specifici per la gestione del file CityGML vengono creati e compilati (AttributeCreator). Di seguito, si utilizza ancora il nodo "FaceReplacer", accoppiato con il nodo "Triangulator" per restituire il tipo di geometria che CityGML si aspetta. Infine, vengono creati i parametri di gestione del modello dati CityGML (AttributeCreator), poi impressi nella geometria (GeometryPropertySetter).

14 e 15. La definizione dei muri e dei pavimenti per il LOD2, che andranno a popolare rispettivamente le classi WallSurface e GroundSurface, procedono nello stesso modo, al netto dell'operatore iniziale "Orientor", che non si rileva necessario alla correzione delle geometrie per come sono state importate dal file Shape 3D.

16. Nella parte finale dello script, raggruppate in verticale, si trovano tutte le classi di destinazione di CityGML, ovvero, nell'ordine: ReliefFeature, TINSurface, CityModel, Building, BuildingPart, RoofSurface, WallSurface e GroundSurface. A tal proposito occorre esplicitare che, nell'introduzione di questo gruppo di nodi in Safe FME, si è scelto di importare il modello dati di CityGML 2.0.0 addizionato della EM_ADE, che viene richiamata per mezzo di un file .xsd, riportato all'Allegato 1.

Il file CityGML così composto contiene la rappresentazione del terreno, generata a partire dalla nuvola di punti, e i modelli degli edifici, definiti al LOD1 e LOD2. Per quanto concerne l'aspetto informativo, gli edifici vengono mappati con i dati previsti dal modello CityGML e dalla EM_ADE, definita per la descrizione del panorama costruito esistente in un'ottica di gestione orientata all'aspetto energetico. La disposizione di un modello sommario di ampie porzioni di territorio permette di realizzare valutazioni di carattere generale su contesti urbani. Come si vedrà più avanti

attraverso l'applicazione al caso studio, tale dotazione fornisce l'opportunità di conoscere i contesti in cui si posizionano beni specifici, e di supportare l'attuazione di analisi integrate che hanno bisogno di usufruire di informazioni a diverse scale di rappresentazione.

4.5. CityGML LOD3,4

Il lavoro svolto secondo le modalità viste al paragrafo precedente permette la realizzazione di un modello urbano ai livelli di dettaglio più bassi del modello dati CityGML. Tuttavia, per arrivare a progettare analisi che permettano di supportare processi decisionali il cui oggetto ultimo sono gli organismi edilizi, occorre arricchire la rappresentazione delle entità del modello e, a questo scopo, i dati che possono essere recuperati a livello urbano si rivelano troppo generici. Per procedere verso la caratterizzazione dell'ambiente costruito a scale più dettagliate occorre, quindi, integrare nel processo modelli pensati specificatamente per rappresentare gli edifici e i loro elementi costitutivi. A questo scopo, vengono sfruttati i modelli BIM, per i quali è necessario creare una procedura di conversione verso un modello CityGML capace di soddisfare i requisiti dei LOD3 e 4.

La trasformazione di un file IFC verso il modello dati CityGML risulta meno onerosa di quella vista in precedenza per il caso del GIS 3D, in quanto la conversione avviene fra due schemi che sono già strutturati secondo una logica gerarchica e semantica. In particolare, poiché i modelli degli edifici sono definiti generalmente a livelli di dettaglio più alti rispetto a quelli urbani, si può affermare che buona parte dello sforzo è finalizzato alla semplificazione delle geometrie e del contenuto informativo. Da un punto di vista teorico, infatti, un modello informativo esportato in IFC incontra i requisiti di un CityGML LOD4, a meno di un'operazione di semplificazione del data set iniziale. Come riportano Donkers et al. [262], infatti, il processo di conversione si può suddividere in due fasi principali: filtraggio e mappatura. Nel caso presente, il filtraggio per il raggiungimento del LOD4 avviene già in fase di esportazione del modello verso il formato per l'interoperabilità IFC, grazie alla definizione di una vista di esportazione nella quale la caratterizzazione geometrica delle categorie mantenute attive è conforme alle specifiche di CityGML. Per quanto riguarda la definizione del modello LOD3, la differenza con il suo corrispettivo più dettagliato sta nell'esclusione degli elementi posti all'interno dell'involucro edilizio [263]. In questo senso, la realizzazione a partire dal LOD4 può essere attuata filtrando le entità per mezzo di un parametro che identifica ciascuna entità sulla base delle sue condizioni al contorno. Nella presente ricerca, in relazione agli scopi specifici del progetto, ci si limita alla realizzazione dei modelli CityGML

LOD3, che risultano sufficienti all'attuazione di valutazioni di tipo preliminare sul comportamento energetico degli edifici. Tuttavia, a livello metodologico sono considerate le procedure per raggiungere le specifiche del LOD4.

Per quanto riguarda la fase di mappatura, al fine di ideare un processo operabile, vanno innanzitutto analizzate e comprese le differenze che sussistono nel modo in cui IFC e CityGML scompongono e descrivono i sistemi edilizi. Le diversità, infatti, vanno al di là del numero degli elementi o della loro qualità di rappresentazione, in quanto sono radicate nella costruzione stessa delle due ontologie. In questo frangente, riferendosi principalmente lavoro effettuato da El-Mekawy et al. e finalizzato alla definizione di un unico modello dati capace di accogliere GIS e BIM [264], è possibile confrontare i due schemi per comprenderne affinità e discrepanze. Limitando la trattazione alle entità che costituiscono l'involucro edilizio, la struttura dell'informazione nei due modelli dati è sintetizzata in Fig. 64 e Fig. 65. Come si può notare, entrambi gli schemi adottano una struttura ad albero, in cui tutte le classi contribuiscono alla definizione dell'apparato informativo, mentre solo un numero limitato si occupa della trasmissione della geometria. In generale, IFC propone una scomposizione più granulare dell'edificio, che si espleta attraverso un numero maggiore di classi specifiche per la rappresentazione degli elementi tecnici. Ciò introduce delle complessità nella definizione di un sistema di mappatura, che non potrà sempre essere attuato per mezzo di relazioni di tipo 1:1, ma richiederà, invece, delle operazioni di adeguamento per gestire le relazioni di tipo 1:molti e molti:1.

Il processo di conversione avviene all'interno della piattaforma di programmazione visuale Safe FME. Come è possibile riscontrare dalla rappresentazione sintetica dello script (Fig. 66), sono richiesti alcuni aggiustamenti per l'allineamento e la mappatura delle classi semantiche. In particolare, la mancanza di alcune classi intermedie dotate di identificativo univoco nello schema CityGML, rende necessario ristrutturare lo schema delle relazioni genitore/figlio. Ciò avviene fondendo alcune classi di IFC e riorganizzando la gerarchia attraverso il collegamento delle entità, non con la classe direttamente superiore, ma con quella che si trova ancora di un ordine più in alto, come mostrato per il caso delle finestre in Fig. 67.

Un altro problema specifico si rileva per la categoria delle coperture, in particolare nel caso dei tetti composti da più falde. In IFC, infatti, i tetti vengono identificati univocamente nella classe `IfcRoof`, con un codice che li intende come un'aggregazione delle falde. Tuttavia, la geometria corrispondente è registrata nella classe `IfcSlab` che riporta un'istanza per ciascuna falda. Diverse soluzioni sono state testate per superare l'ostacolo, ma

non si è trovata una procedura soddisfacente per trasmettere al modello CityGML un'aggregazione di geometrie raccolte sotto un unico ID che corrispondesse a quello del tetto. Per ottenere un risultato operabile, si è adottato un accorgimento nella fase di modellazione, e tutte le coperture sono state realizzate nel software di authoring come singole falde. In questo modo, ad una sola falda corrisponde un solo tetto e viceversa, così da evitare l'insorgenza di errori nella codifica degli elementi.

Fig. 64. Schema della struttura organizzativa del modulo Building in IFC. I blocchi riquadrati in nero sono le uniche classi a contenere informazioni di tipo geometrico.

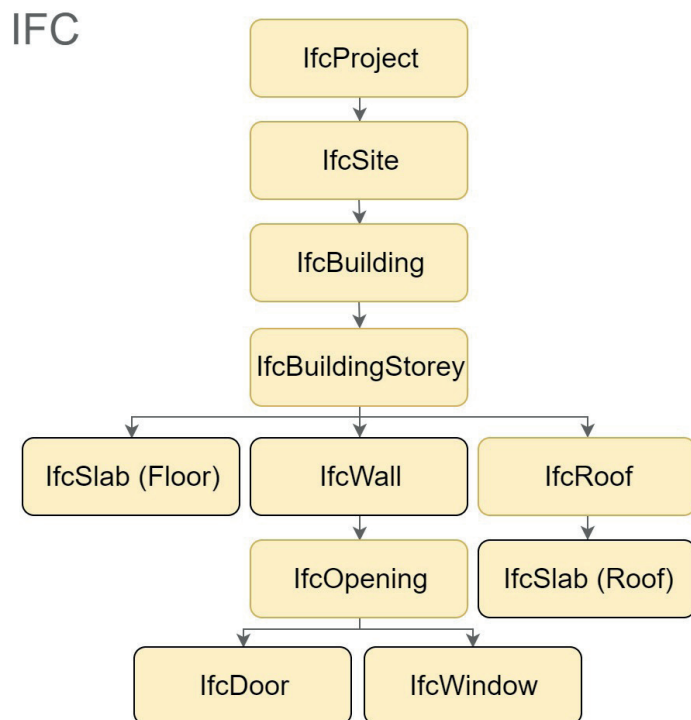
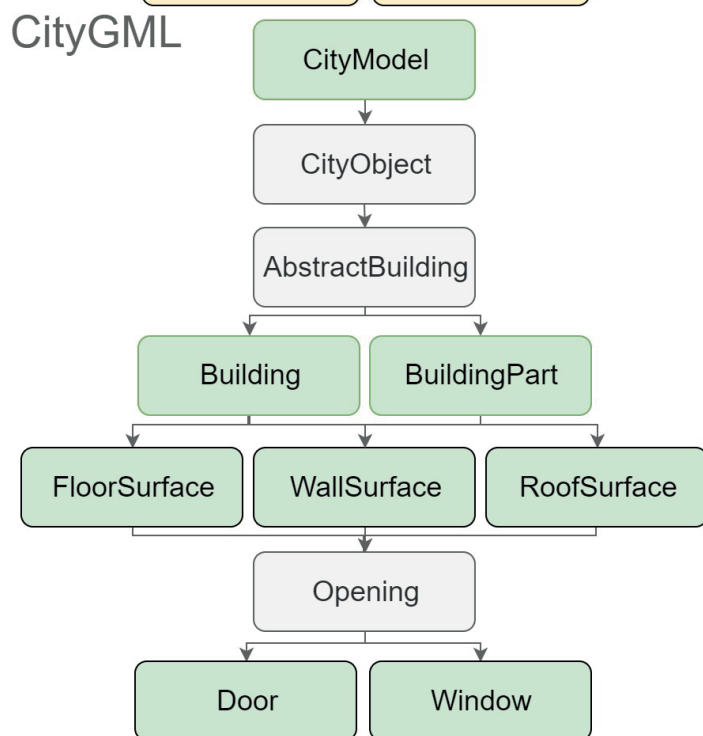


Fig. 65. Schema della struttura organizzativa del modulo Building in CityGML. I blocchi riquadrati in nero sono le uniche classi a contenere informazioni di tipo geometrico. I blocchi campiti in grigio sono le classi astratte, non dotate di uno specifico ID.



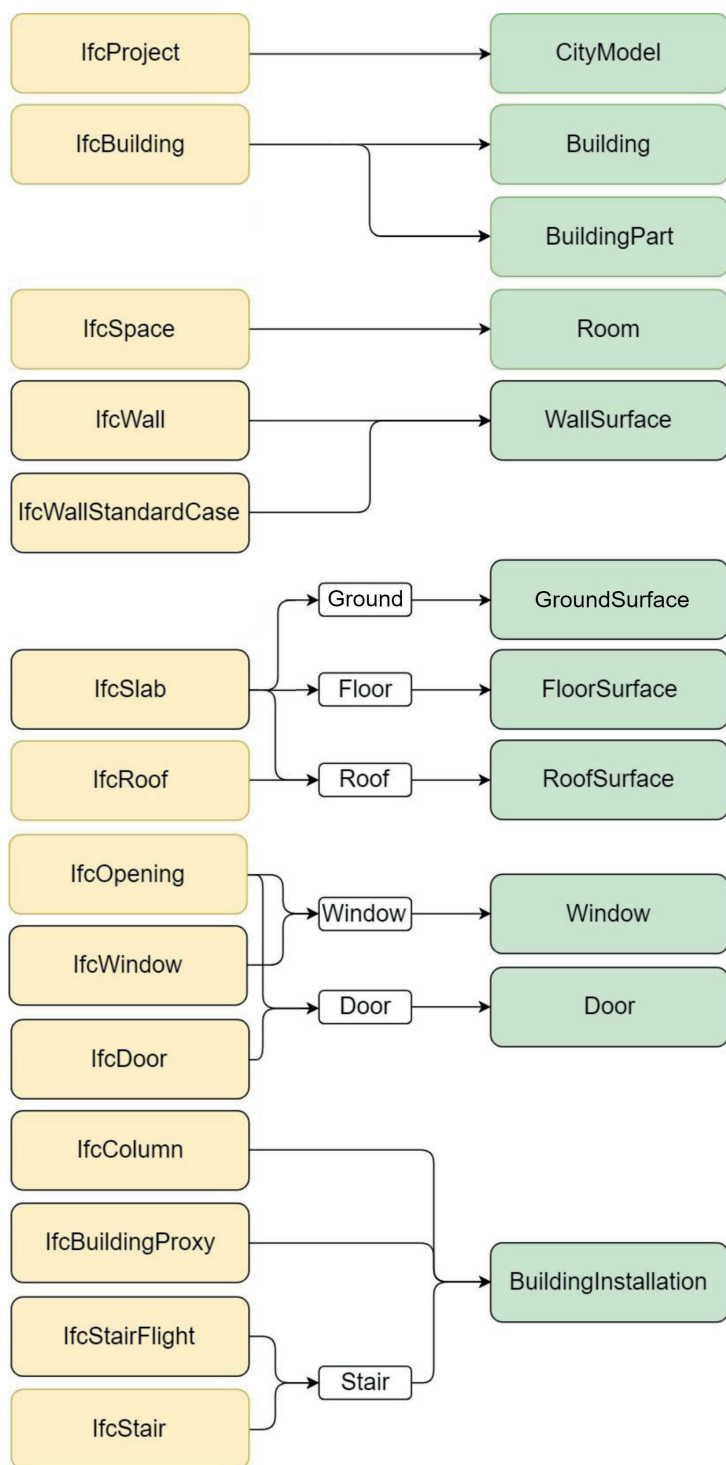
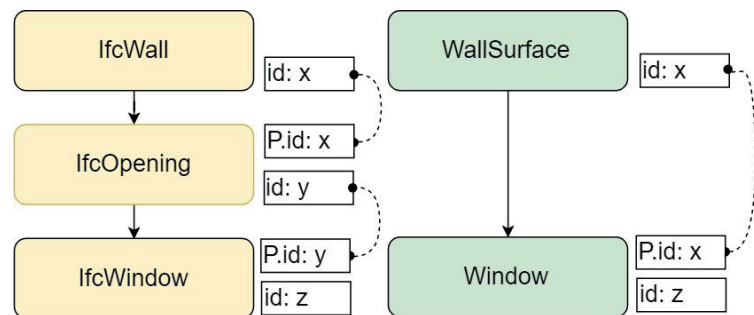


Fig. 66. Schematizzazione dello script per la conversione del modello IFC nel modello CityGML. In giallo la struttura del file IFC di input e in verde quella del file CityGML in uscita.

Lo script realizzato in ambiente Safe FME procede in maniera piuttosto lineare, generando una catena di operazioni che vengono ripetute per ciascuna classe di IFC, con qualche piccola eccezione. Nel dettaglio (Fig. 68):

1. Si tratta di una serie di azioni che partono dall'importazione di tutte le categorie di IFC, senza produrre alcun output. Il loro scopo è quello di generare le relazioni genitore/figlio, mappando

Fig. 67. Alterazione della relazione genitore/figlio che ha luogo qualora vi sia uno slittamento fra classi di IFC (in giallo) e classi di CityGML (in verde).



i collegamenti fra le parti in considerazione di quelle classi intermedie di IFC da bypassare nella redazione dello schema CityGML. I primi due nodi (BinaryEncoder) traducono in testo gli attributi ID di IFC, mentre i secondi (VariableSetter) assegnano l'ID genitore aggiornato. Il risultato è una tabella contenente l'insieme delle entità del modello IFC, nel quale vengono esplicitate tutte le relazioni di tipo genitore/figlio, secondo lo schema CityGML.

2. Dalla classe IfcProject, vengono creati degli attributi di gestione (AttributeCreator) e l'ID di IFC viene rinominato nell'ID di CityGML (AttributeRenamer) per popolare la classe CityModel.

3. Lo stesso avviene per la definizione dei Building nella codifica di CityGML, con la differenza che preliminarmente la geometria viene esclusa dalle operazioni (GeometryRemover). Con il nodo AttributeRenamer si rinominano sia l'ID che il parent_ID del modello IFC.

4. Per la codifica delle Room di CityGML, si parte dagli IfcSpace. Di questi vengono rinominati i parametri identificativi (AttributeRenamer), ed estratte le proprietà della geometria (GeometryPropertyExtractor e AttributeExposer). Successivamente, si settano il "CityGML LOD Name" e il "Feature Role" con il nodo CityGMLGeometrySetter, come già visto nel caso di conversione delle entità GIS 3D in CityGML, e si creano i nuovi attributi di gestione (AttributeCreator). Tutte le proprietà vengono poi fissate nella geometria (GeometryPropertySetter) e veicolate nella classe semantica Room di CityGML.

5. Poiché in IFC i muri sono separati in due classi semantiche (IfcWall e IfcWallStandardCase), queste vengono innanzitutto fuse in un unico nodo, da cui si estraggono le proprietà della geometria (GeometryPropertyExtractor e AttributeExposer). In seguito, per problemi legati alla complessità geometrica che la categoria di muri di IFC può comportare, le entità spaziali vengono disaggregate (Deaggregator) e filtrate (GeometryFilter), così da escludere gli oggetti monodimensionali. Le entità restanti vengono convertite in poligoni (GeometryCoercer). Successivamente, una serie di nodi crea nuovi attributi, rinomina gli identificatori e fissa le proprietà alle geometrie, come già eseguito più volte, prima di riversare le informazioni nella classe di CityGML WallSurface.

6. Il caso della gestione delle informazioni legate ai tetti è il più complesso dell'intero script. Nella procedura di conversione, dalla classe IfcRoof vengono estratte le proprietà delle geometrie (GeometryPropertyExtractor e AttributeExposer) e rinominato l'attributo identificatore (AttributeRenamer). Dopodiché, mediante un nodo FeatureMerger, si uniscono le informazioni relative alle IfcSlab, filtrate per contenere solo le coperture, a quelle appena estratte dagli IfcRoof. Da qui lo script prosegue disaggregando le geometrie e convertendole in poligoni (Deaggregator e GeometryCoercer), creando nuove proprietà di gestione, rinominando gli identificatori ID e parent_ID e ancorando le proprietà alle geometrie. Le informazioni così modellate vanno a convergere nella classe semantica di CityGML RoofSurface.

7. La categoria degli IfcSlab contiene informazioni e geometrie che in CityGML vanno spartite fra RoofSurface, FloorSurface e GroundSurface, distinzione particolarmente importante nell'ambito della gestione energetica dei fabbricati. A partire dalla classe di IFC, quindi, le entità vengono innanzitutto filtrate (AttributeFilter) fra Roof e Floor. Mentre i Roof vanno a ricollegarsi al flusso di lavoro descritto nel blocco 6, i Floor subiscono il processo di trasformazione già discusso per le altre categorie del modello fino al raggiungimento di un altro nodo AttributeFilter, che separa ulteriormente i pavimenti contro terra da quelli interpiano, per popolare le classi di CityGML FloorSurface e GroundSurface.

8, 9. La definizione di finestre e porte procede secondo lo stesso flusso di lavoro, utilizzando tutte le funzioni già enumerate per le categorie precedentemente trattate. In particolare, è richiesta solo un'accortezza nella corretta ricostruzione della gerarchia del modello, che si esplicita escludendo la classe opening per andare a referenziare le entità direttamente alla categoria superiore, saltando una generazione nella definizione delle relazioni genitore/figlio.

10. Le BuildingInstallation di CityGML raccolgono tutti gli elementi che non hanno un ruolo già definito altrove, ma che contribuiscono a rappresentare l'organismo edilizio. La decisione su quali categorie del modello IFC includere in questo insieme è soggettiva, e si basa principalmente sulle ragioni specifiche per le quali si stanno costruendo i modelli. Nel caso presente, si è scelto di includere colonne e pilastri (IfcColumn), scale (IfcStair e IfcStairFlight) e modelli generici (IfcBuildingElementProxy), che raccolgono una varietà di oggetti per la caratterizzazione degli edifici quali modanature, ringhiere, gronde e pluviali, ecc.. Anche in questo caso il processo di conversione è simile a quelli già descritti. Scale e pianerottoli vengono inizialmente trattati a parte per essere fusi in oggetti unici, mentre le altre entità seguono un filone autonomo, per poi venire raggruppate in chiusura nella classe BuildingInstallation di CityGML.

Il processo così definito raggiunge lo scopo di una conversione automatizzata dei modelli IFC nei corrispettivi CityGML, per la loro introduzione in processi di analisi multiscalari in cui le potenzialità del BIM possono fondersi con quelle del GIS 3D. Tuttavia, i risultati non possono dirsi impeccabili, in quanto, specialmente in presenza di morfologie molto complesse, possono verificarsi errori in relazione alla rappresentazione, anche se la loro incidenza è generalmente rara. In particolare, alcune tipologie di errori ricorrenti possono essere individuate, come evidenziato da Lilis et al. [265]:

- Intersezione fra le parti: Errore che si viene a generare quando sono presenti intersezioni non vuote fra diverse entità, accade quando le geometrie costituenti gli elementi del modello non sono definite correttamente;
- Errato orientamento delle facce: Succede quando l'ordine dei punti che caratterizzano un poligono è registrato in senso inverso rispetto alla convenzione, determinando un vettore normale uscente che punta verso l'interno del modello dell'edificio anziché verso l'esterno. Questa tipologia di problema è imputabile a bug che intervengono nella fase di esportazione del file IFC;
- Lacune: Si riscontrano lacune quando mancano alcune parti del modello in uscita dallo script di conversione. Con l'esperienza corrente si è visto che generalmente le informazioni correlate alle entità difettose sono comunque presenti, ma manca la geometria a cui fanno riferimento. In questo modo, le analisi che interrogano il database non vengono compromesse, ma possono esserci errori di visualizzazione.

4.6. Base di dati

L'ultimo passaggio del flusso di lavoro riguarda la realizzazione e il popolamento del database informativo. A questo scopo, occorre disporre di tre elementi: un sistema di gestione della base di dati (DBMD), uno schema logico per la strutturazione dell'informazione e il contenuto informativo che si vuole organizzare attraverso il database. Nel caso presente, tutto è già stato predisposto: il DBMS scelto per la manipolazione delle informazioni è PostgreSQL, addizionato con l'estensione PostGIS, lo schema della base di dati corrisponde alla struttura di CityGML, specificatamente in relazione al modulo Building con l'aggiunta della EM_ADE e, infine, il dataset rispecchia i contenuti del modello CityGML, definito nei vari livelli di dettaglio.

Tuttavia, l'effettiva attuazione del processo richiede che vengano eseguite ancora alcune operazioni, per riportare le informazioni nei nuovi strumenti di gestione. Per la costruzione dello schema del database, occorre generalmente scrivere un file di testo che contenga una serie di istruzioni in formato DDL di SQL. Queste, a partire da un modello vuoto, generano l'insieme delle tabelle

e il sistema di relazioni che sussistono tra di esse, attraverso l'individuazione di chiavi primarie e chiavi esterne. La redazione di tale documento può teoricamente avvenire in modo automatico processando il diagramma UML per mezzo di software proprietari che si occupano della conversione, quali Sparx System Enterprise Architect. Nel caso presente, tuttavia, si è proceduto ad una compilazione di tipo manuale delle istruzioni, con l'obiettivo di mantenere il massimo controllo su tutti i passaggi. La trascrizione dello script SQL è riportata all'Allegato 2. Le istruzioni impartite attivano innanzitutto l'estensione PostGIS di PostgreSQL per garantire la manipolazione delle entità spaziali e, successivamente, indicano quali tabelle costituire, esplicitando gli attributi e le relazioni che sussistono tra le entità, come da Tab. 22.

Tab. 22. (serie) Tabelle del database costruite per la gestione delle informazioni relative al modello CityGML.

city_model		
gml_id	varchar(50)	primary key
citygml_target_uri	varchar(100)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	

building		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	references city_model(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	
citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
citygml_class	varchar(50)	
citygml_function	varchar(50)	
citygml_usage	varchar(50)	
citygml_roof_type	varchar(10)	
citygml_measured_height	real	
citygml_storey_above_ground	int	
citygml_storey_heights_above_ground	real	
citygml_storey_below_ground	int	
citygml_storey_heights_below_ground	real	
citygml_year_of_construction	int	
citygml_year_of_demolition	int	
heated_area	real	
heated_volume	real	
annual_electrical_energy	real	
annual_thermal_energy	real	
denomination	varchar(50)	
ownership	varchar(50)	

aat_style_period	varchar(50)	
has_ch_declaration	boolean	
preservation_authority_name	varchar(50)	
ch_declaration_document	varchar(100)	
has_epc	boolean	
epc_class	varchar(5)	
geom_text	varchar(100000)	

wall_surface		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	references building(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	
citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
bs_area	real	
bs_thickness	real	
is_thermal_boundary	boolean	
boundary_condition	varchar(10)	
transmittance	real	
emissivity	real	
absorption_coefficient	real	
exposition	varchar(1)	
afin	real	
aov	real	
ahor	real	
ifc_element_type	varchar(50)	default 'ifcWall'
deterioration	varchar(100)	
time_of_beginning_existence	varchar(20)	
time_of_ending_existence	varchar(20)	
geom_text	varchar(100000)	

roof_surface		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	references building(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	
citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
bs_area	real	
bs_thickness	real	
is_thermal_boundary	boolean	

boundary_condition	varchar(10)	
transmittance	real	
emissivity	real	
absorption_coefficient	real	
exposition	varchar(1)	
afin	real	
aov	real	
ahor	real	
ifc_element_type	varchar(50)	default 'ifcRoof'
deterioration	varchar(100)	
time_of_beginning_existence	varchar(20)	
time_of_ending_existence	varchar(20)	
geom_text	varchar(100000)	

ground_surface		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	references building(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	
citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
bs_area	real	
bs_thickness	real	
is_thermal_boundary	boolean	
boundary_condition	varchar(10)	
transmittance	real	
emissivity	real	
absorption_coefficient	real	
exposition	varchar(1)	
afin	real	
aov	real	
ahor	real	
ifc_element_type	varchar(50)	default 'ifcFloor'
deterioration	varchar(100)	
time_of_beginning_existence	varchar(20)	
time_of_ending_existence	varchar(20)	
geom_text	varchar(100000)	

floor_surface		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	references building(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	

citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
bs_area	real	
bs_thickness	real	
is_thermal_boundary	boolean	
boundary_condition	varchar(10)	
transmittance	real	
emissivity	real	
absorption_coefficient	real	
exposition	varchar(1)	
afin	real	
aov	real	
ahor	real	
ifc_element_type	varchar(50)	default 'ifcFloor'
deterioration	varchar(100)	
time_of_beginning_existence	varchar(20)	
time_of_ending_existence	varchar(20)	
geom_text	varchar(100000)	

window_surface		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	references wall_surface(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	
citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
bs_area	real	
bs_thickness	real	
is_thermal_boundary	boolean	
boundary_condition	varchar(10)	
transmittance	real	
emissivity	real	
absorption_coefficient	real	
solar_factor	real	
exposition	varchar(1)	
afin	real	
aov	real	
ahor	real	
ifc_element_type	varchar(50)	default 'ifcWindow'
deterioration	varchar(100)	
time_of_beginning_existence	varchar(20)	
time_of_ending_existence	varchar(20)	

geom_text	varchar(100000)
-----------	-----------------

door_surface		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	refernces wall_surface(gml_id)
citygml_target_uri	varchar(100)	
citygml_feature_role	varchar(50)	
gml_description	varchar(100)	
gml_name	varchar(50)	
bs_area	real	
bs_thickness	real	
is_thermal_boundary	boolean	
boundary_condition	varchar(10)	
transmittance	real	
emissivity	real	
absorption_coefficient	real	
solar_factor	real	
exposition	varchar(1)	
afin	real	
aov	real	
ahor	real	
ifc_element_type	varchar(50)	default 'ifcDoor'
deterioration	varchar(100)	
time_of_beginning_existence	varchar(20)	
time_of_ending_existence	varchar(20)	
geom_text	varchar(100000)	

generation_system		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	refernces building(gml_id)
denomination	varchar(50)	
type	varchar(100)	
description	varchar(100)	
yearOfInstallation	int	
efficiency	real	
deliveredPower	real	

distribution_system		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	refernces building(gml_id)
denomination	varchar(50)	

type	varchar(100)	
description	varchar(100)	
yearOfInstallation	int	
efficiency	real	

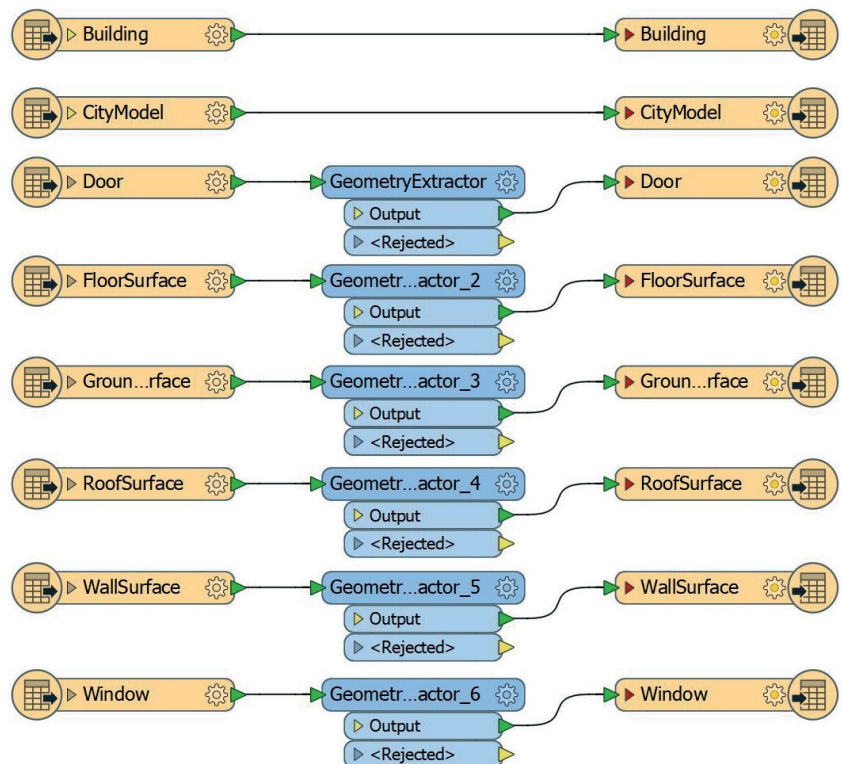
regulation_system		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	refernces building(gml_id)
denomination	varchar(50)	
type	varchar(100)	
description	varchar(100)	
yearOfInstallation	int	
efficiency	real	

emission_system		
gml_id	varchar(50)	primary key
gml_parent_id	varchar(50)	refernces building(gml_id)
denomination	varchar(50)	
type	varchar(100)	
description	varchar(100)	
yearOfInstallation	int	
efficiency	real	

In seguito alla creazione della struttura del database, il passaggio delle informazioni dal modello CityGML alla base di dati ha luogo per mezzo di uno script VPL, che fa corrispondere le classi di CityGML con le tabelle appena costituite, stabilendo una connessione con il database da popolare. La trasformazione avviene in modo semplice e lineare, in considerazione della corrispondenza biunivoca che sussiste fra gli schemi logici delle piattaforme informative (Fig. 69) e i dati possono fluire da una struttura all'altra senza la necessità di ulteriori adattamenti.

Tuttavia, una certa attenzione è necessaria nel trasporto della componente geometrica degli oggetti del modello. Le entità spaziali vengono, infatti, estratte dalle classi di CityGML ed importate inizialmente come testo, all'interno di un campo dati molto lungo che le accoglie in formato EWKT. Successivamente, una nuova serie di istruzioni scritte in SQL crea per ogni tabella una colonna di tipo geometrico (AddGeometryColumn), progettata per contenere e gestire il tipo di dati multipolygonz. Infine, grazie al comando ST_GeomFromText incluso nell'estensione PostGIS, la nuova colonna viene popolata, convertendo la stringa scritta in EWKT proveniente dallo script FME in formato binario. La trascrizione di questo set di istruzioni è riportata all'Allegato 3.

Fig. 69. Script VPL per il popolamento del database informativo a partire dal modello CityGML.



Un'ultima riflessione va fatta, infine, sulla gestione del sistema di riferimento. Affinché tutti i modelli GIS e BIM che vanno a costituire il database informativo siano coerenti nella loro collocazione geografica, occorre che vengano definiti nel medesimo sistema di riferimento e che, di conseguenza, tutte le entità spaziali ad essi associate siano codificate secondo lo stesso standard geografico e cartografico. Per l'intero progetto, si è scelto di riferirsi al sistema WGS84/UTM zone 32N, che viene identificato nello standard gestito dal Comitato Geodetico dell'International Association of Oil and Gas Producers (OGP) con la sigla EPSG:32632.

Nel database spaziale, all'attivazione dell'estensione PostGIS, viene creata la tabella "spatial_ref_sys" che contiene gli ID (SRID), la descrizione sintetica e le proprietà dei sistemi di riferimento secondo la classificazione data dall'EPSG (European Petroleum Survey Group) e globalmente adottata. Mentre, nella fase di definizione dello schema del database, allo script SQL che descrive le tabelle costituenti la base di dati, viene aggiunta un'ulteriore tabella, che seleziona il sistema di riferimento scelto in relazione a quelli contenuti nella tabella "spatial_ref_sys", richiamandone uno per mezzo di una chiave esterna. Successivamente, nel popolamento del database con gli oggetti definiti all'interno dei modelli, il comando "AddgeometryColumn" così come il successivo che include l'operazione "ST_GeomFromText", fanno riferimento esplicito al SRID del progetto, inserendolo nella sintassi delle istruzioni scritte in SQL.

4.7. Conclusioni

La metodologia illustrata consente di sfruttare modelli informativi a scala urbana ed edile, generati a partire da dati facilmente reperibili, per realizzare un database informativo basato su uno schema standard. Il vantaggio principale che deriva dall'applicazione di questo processo consiste proprio nella trasformazione di dati che sono inizialmente sparsi e disorganizzati, prima in modelli organici e poi in strutture informative la cui interpretazione non presenta margini di soggettività. La strutturazione di un database spaziale fondato su CityGML, infatti, consente di attivare molteplici soluzioni per la visualizzazione, l'interrogazione e l'analisi dei dati, mentre la scelta di adottare codici e piattaforme open permette di incorporare la base di dati in applicazioni esistenti o di programmarne di nuove per usi specifici.

Nonostante il progetto qui presentato sia rivolto alla definizione di strumenti per la valutazione del comportamento energetico degli edifici, sulla base della metodologia appena esposta è facile comprendere come i medesimi processi si possano applicare ad innumerevoli domini della conoscenza, aprendo alla possibilità di generare strutture disciplinari modulari che permettano di incrociare le analisi riferite a più ambiti.

5. Caso studio

La metodologia presentata al capitolo precedente viene applicata a diversi livelli di indagine per attivare un sistema di analisi sulla città di Pavia e, in particolare, sugli edifici dell'Università. Nelle prossime sezioni, si seguirà lo sviluppo del flusso di lavoro su un caso reale e si esporranno e discuteranno alcuni possibili output realizzati a partire dal database informativo. In questa fase, i risultati sono volti alla costruzione di un quadro conoscitivo sul panorama costruito, la ricerca si rivolge quindi alla progettazione di strumenti operativi che, attraverso l'organizzazione strutturata delle informazioni sugli edifici esistenti, aiutino la comprensione e la comunicazione dei dati, in un'ottica inclusiva nei confronti di tutti i profili di utenza.

5.1. Flusso di lavoro

Procedendo secondo il diagramma di flusso metodologico, occorre innanzitutto individuare la porzione di territorio di cui realizzare il modello GIS tridimensionale, di estensione congrua rispetto alla contestualizzazione dei fabbricati dell'asset immobiliare oggetto di analisi. Ciò va verificato sia dal punto di vista urbanistico/infrastrutturale che da quello storico/culturale, così da disporre di un inquadramento che sia significativo per la lettura del sistema urbano e che sia in grado di rappresentare le caratteristiche principali dell'ambiente naturale e costruito che determinano e influenzano il contesto di studio.

Con questa finalità, nell'esempio presente si è ritenuto di prendere in considerazione un'area di poco superiore a quella del centro storico di Pavia, circoscritta in modo chiaro da elementi sia naturali che artificiali, tali da identificare limiti facilmente individuabili: il Naviglio Pavese a Nord e a Est, il Ticino a Sud e la ferrovia a Ovest (Fig. 70).

Individuato l'ambito di indagine, è necessario reperire dati input a scala territoriale per la sua descrizione. Le informazioni da collezionare in questa fase devono essere sufficienti per supportare la definizione di un modello GIS tridimensionale, disposto per rappresentare in modo schematico ma affidabile l'ambito nel quale sorgono gli edifici oggetto di studio. Secondo quanto già discusso in precedenza, la necessità di individuare contenuti aperti e facilmente reperibili porta alla scelta di riferirsi a due specifici set di dati. Il primo è un insieme di livelli GIS bidimensionali, confezionati e distribuiti dal SIT (Sistema Informativo Territoriale) della Provincia di Pavia. Si tratta di un pacchetto informativo costituito da tre layer, che rappresentano il panorama costruito attraverso il tracciamento dell'impronta



Fig. 70. Vista aerea della città di Pavia e del territorio circostante. Il tratteggio rosso indica l'area di impianto storico, mentre la campitura in trasparenza individua l'area oggetto di studio. Rappresentazione fuori scala.

a terra, della massima estensione e della suddivisione in unità volumetriche dei fabbricati (Fig. 71). Il secondo insieme di dati consiste, invece, in una nuvola di punti a bassa densità (4 punti per m²), registrata nel 2008/2009 dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare con l'impiego di tecnologia LiDAR aerea (Fig. 72). Il data set risponde ai requisiti per l'attivazione della procedura semi-automatizzata, tuttavia, si riscontra una lacuna nella parte Nord-Occidentale della città, rendendo necessario procedere ad una modellazione manuale in quest'area.

Per procedere, i due contenuti informativi vengono caricati nell'ambiente di lavoro ESRI ArcGIS Pro, dove i sistemi di riferimento di origine vengono armonizzati in WGS 1984 UTM Zone 32N (EPSG:32632), uno dei più diffusi per la descrizione delle entità geografiche in ambito italiano. Grazie alla qualità dei dati input, l'operazione di segmentazione e di classificazione della nuvola di punti avviene senza particolari difficoltà e con un risultato soddisfacente. La disposizione del layer contenente le impronte a terra degli edifici permette, infatti, di individuare facilmente i punti posti in corrispondenza alle coperture dei fabbricati, operazione che altrimenti risulterebbe piuttosto complessa in relazione alla densità del tessuto urbano e all'importante presenza della vegetazione che caratterizzano l'area oggetto di studio.



Fig. 71. Cartografia GIS bidimensionale con le impronte a terra dei fabbricati, tagliata secondo l'area oggetto di studio. Rappresentazione fuori scala.

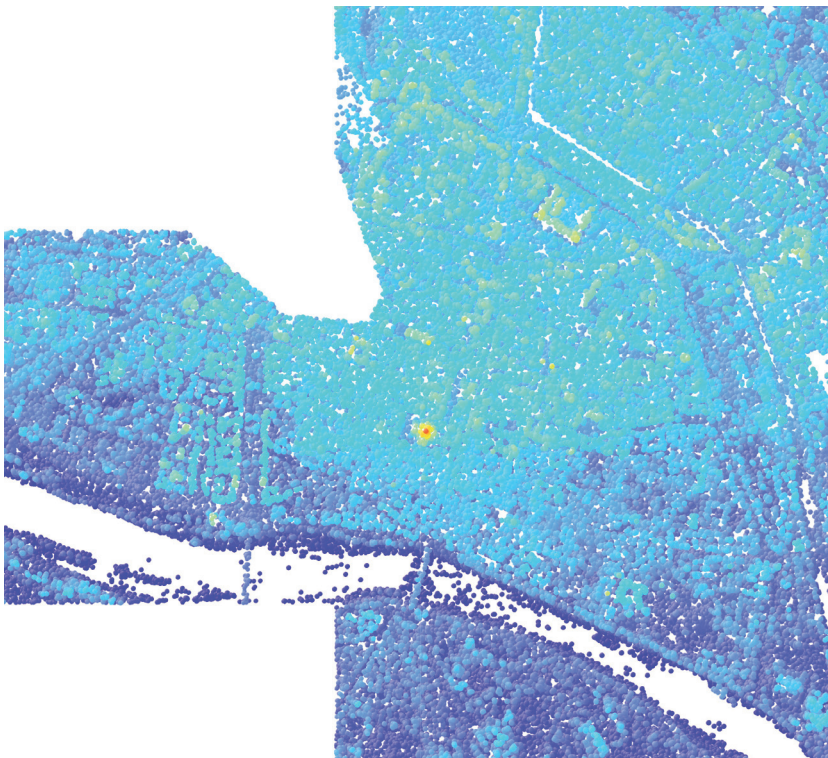


Fig. 72. Nuvola di punti a bassa densità dell'area urbana di Pavia. Si noti la mancanza di informazioni in corrispondenza dell'angolo Nord-Occidentale della città. Rappresentazione fuori scala.

In seguito alla classificazione dei punti nelle categorie terreno, edifici e vegetazione, è possibile produrre le tre immagini raster (DTM, DSM e nDTM) (Fig. 73, Fig. 74 e Fig. 75), che permettono l'attivazione della sequenza di strumenti di geoprocessing per la generazione dei solidi che rappresentano l'ambiente costruito. L'estrazione degli edifici produce un numero di poligoni tridimensionali (3D Polygon) uguale a quello dei record che compongono il layer delle impronte a terra dei fabbricati.

Fig. 73. DSM dell'area oggetto di studio, estratto mediante l'elaborazione di tutti i punti del rilievo digitale.



Fig. 74. DTM dell'area oggetto di studio, estratto mediante l'elaborazione dei punti della classe "Ground" del rilievo digitale.

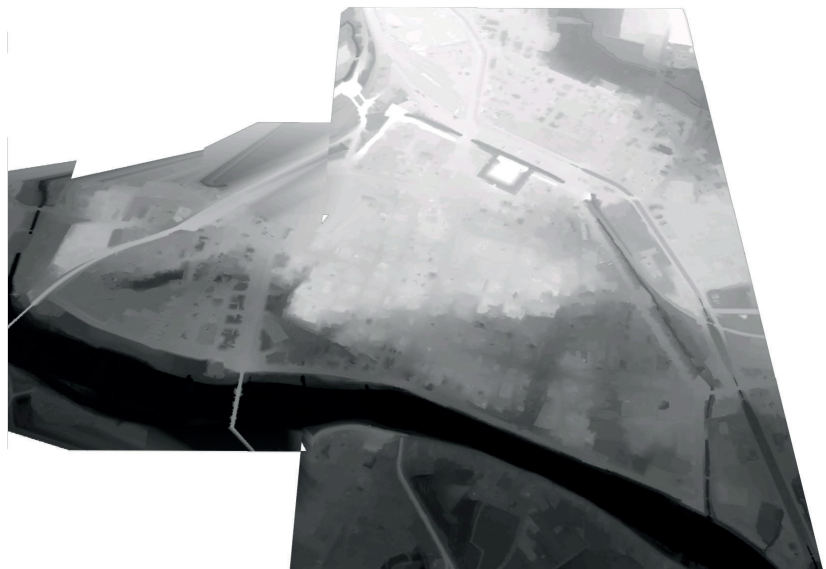


Fig. 75. DTM dell'area oggetto di studio, ottenuto sottraendo i risultati delle due esportazioni precedenti.



Fig. 76. Modello Multipatch dell'edificato dell'area oggetto di studio, visualizzato in ambiente ArcGIS Pro.



Fig. 77. Zoom del modello Multipatch dell'edificato dell'area oggetto di studio, visualizzato in ambiente ArcGIS Pro.



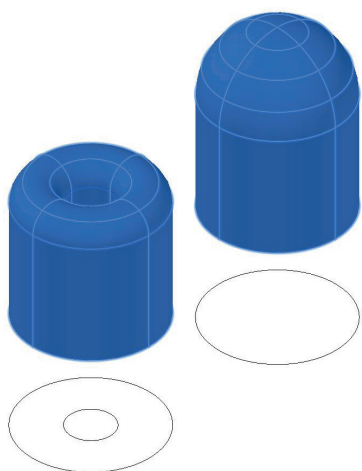


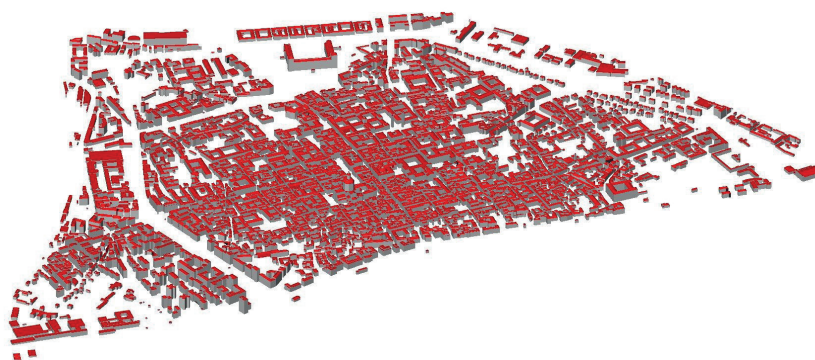
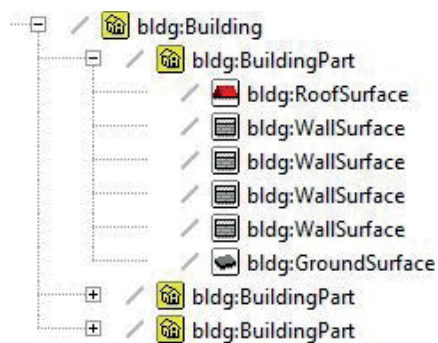
Fig. 78. Rappresentazione schematica del problema geometrico che si viene a creare nel caso di forme piane concentriche.

Il risultato è globalmente soddisfacente, tuttavia alcuni interventi manuali si rendono necessari per correggere errori di interpretazione, che riguardano principalmente le forme dei tetti. Un esempio delle difformità che si possono presentare è descritto in Fig. 77, con riferimento alla cupola del Duomo di Pavia. Considerato che nella cartografia bidimensionale la proiezione a terra della cupola e delle sue sovrastrutture sono raffigurate mediante forme concentriche, le superfici di pertinenza di ciascuna unità volumetrica risultano forate. Di conseguenza, in seguito all'assegnazione della corretta forma del tetto, in questo caso "Dome" (Cupola), il solido che si viene a costituire è sormontato da una struttura toroidale, invece che da una effettivamente a cupola (Fig. 78). Errori di questo genere necessitano di una revisione manuale dei modelli.

Il file Shape prodotto da ArcGIS Pro con l'estrazione dei modelli degli edifici, viene processato in Safe FME, secondo quanto già visto in fase di descrizione della metodologia. Per organizzare le informazioni in relazione alle classi di elementi tecnici e per tracciare la struttura semantica di CityGML, le superfici che costituiscono gli involucri edilizi vengono classificate fra "Roof", "Floor" e "Wall" in base all'inclinazione sull'orizzontale e ai valori di elevazione delle geometrie. Nello stesso passaggio, le relazioni genitore/figlio che esistono fra le entità del modello vengono registrate creando dei collegamenti fra gli ID degli oggetti. In particolare, si correlano le superfici di chiusura (Tetti, Pavimenti e Muri) alle parti di edificio e quindi agli edifici corrispondenti. In relazione al popolamento dei parametri, le proprietà già mappate vengono trasferite nei campi dati del modello CityGML, che viene addizionato della EM_ADE. Inoltre, ciascuna entità geometrica viene etichettata utilizzando la Tabella 21 del sistema di classificazione standard internazionale OmniClass. Con queste operazioni, mediante l'utilizzo di script di programmazione visuale, il modello viene strutturato e arricchito per adattarsi alla struttura di CityGML e alle esigenze determinate dalle finalità del progetto di ricerca.

Il risultato finale è un modello della città definito per il LOD1 e LOD2, costituito da 1853 edifici (Building), 3514 parti (BuildingPart) e 47714 superfici, organizzate in uno schema

Fig. 79. Modello CityGML del centro di Pavia (LOD2) e relativo schema di scomposizione semantica.



semantico e gerarchico, che permette la corretta collocazione e individuazione di ciascuna entità sulla base delle sue relazioni con il modello complessivo.

Infine, il contenuto informativo viene riversato in un database relazionale, la cui struttura corrisponde alla versione di CityGML con cui il modello è stato definito. Operativamente, un ulteriore script VPL definisce formalmente il collegamento fra le classi del modello CityGML e le tabelle del database, generate a loro volta a partire dal diagramma UML rappresentativo dello schema del modello dati ampliato in considerazione della ADE tematica.

Con questa operazione, tutte le informazioni geometriche, spaziali, numeriche e testuali sono rappresentate e strutturate nella base di dati di destinazione, da cui possono essere richiamate per mezzo di istruzioni SQL o sfruttando il collegamento con applicazioni software esterne capaci di interfacciarsi con il database relazionale.

5.2. Applicazioni

La disposizione di un sistema informativo sul costruito, strutturato secondo uno schema standard e correlato ad entità spaziali geolocalizzate, permette la progettazione di strumenti innovativi per la gestione e la comunicazione di set di dati molto vasti, con l'obiettivo di mettere in relazione fra loro gli aspetti multidisciplinari che caratterizzano i sistemi urbani.

Alla scala di rappresentazione propria dei modelli CityGML LOD1 e LOD2 è stato possibile realizzare alcune applicazioni in grado di descrivere il comportamento energetico dell'intero contesto oggetto di studio attraverso la mappatura di alcune delle informazioni contenute negli Attestati di Prestazione Energetica (APE) ed effettuare degli approfondimenti sugli edifici dell'Università di Pavia mediante l'inserimento di informazioni più accurate derivanti sia dagli Audit Energetici che dall'integrazione dei dati contenuti nelle bollette delle forniture di energia elettrica e termica.

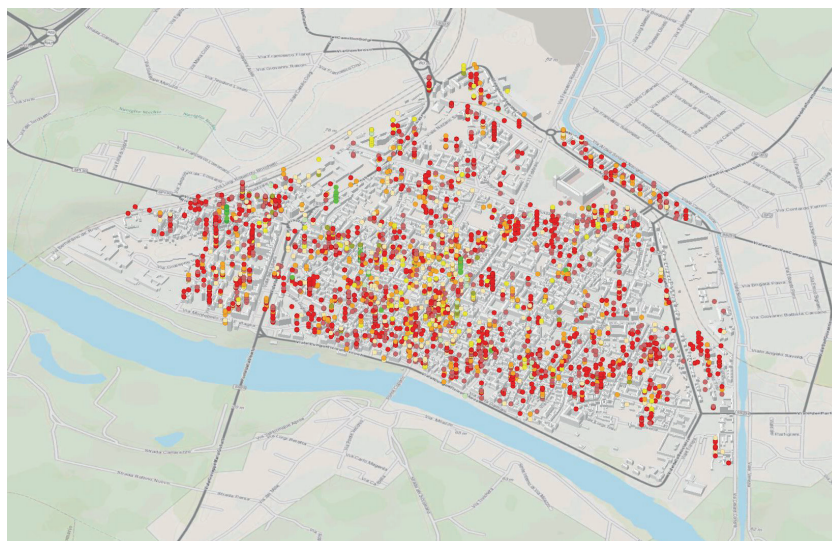
5.2.1. Geolocalizzazione degli APE

Il primo degli esempi che si riportano è stato svolto integrando il modello della città con le informazioni contenute negli Attestati di Prestazione Energetica. La grande diffusione degli APE e la formazione di banche dati per la loro consultazione ha reso questa tipologia di documenti una preziosa fonte informativa, capace di supportare indagini a livello territoriale sul comportamento energetico degli edifici esistenti. Nel caso presente, il database di riferimento è quello offerto del CENED (Certificazione ENergetica degli EDifici) per la Regione Lombardia, che, allo stato attuale, permette di consultare in formato aperto i dettagli di 2,5 milioni di APE.

Limitando la ricerca all'area oggetto di studio, le informazioni sono state inizialmente geolocalizzate sulla base delle coordinate geografiche associate a ciascuna rilevazione. In ambiente ArcGIS Pro, una prima elaborazione ha portato alla visualizzazione dei dati degli Attestati di Prestazione Energetica in sovrapposizione al modello della città, rappresentandoli come entità puntuali orientate nello spazio e associate a record informativi contenenti tutti i dati dell'APE stesso (Fig. 80). Il formato originale, per come è fornito dal CENED, è costituito da una tabella dotata di circa 150 attributi, tuttavia, per le esigenze del presente caso di studio, ci si è limitati a considerare un numero ridotto di campi dati, come da Tab. 23. Successivamente, si è passati all'aggregazione dei dati, in funzione dell'attribuzione di un'etichetta univoca per ogni edificio rappresentato nel modello. Poiché ciascun Attestato si

Fig. 80. Modello tridimensionale della città di Pavia con sovrapposizione di entità spaziali puntuali in rappresentazione degli APE. I diversi colori rappresentano la classe energetica dell'Attestato corrispondente, secondo lo schema riportato in legenda.

- CLASSE ENERGETICA
- A1
 - A2
 - A3
 - A4
 - B
 - C
 - D
 - E
 - F
 - G
 - Altro



Tab. 23. Attributi considerati per la realizzazione della mappa di geolocalizzazione degli APE.

N	NOME ATTRIBUTO	FORMATO DATO
1	COD_APE	Numero
2	DATA_INS	Data
3	RESIDENZIALE	S/N
4	PROPRIETA_PUBBLICA	S/N
5	USO_PUBBLICO	S/N
6	CLASSIFICAZIONE_DPR	Testo
7	NUOVA_COSTRUZIONE	S/N
8	PASSAGGIO_PROPRIETA	S/N
9	LOCAZIONE	S/N
10	RISTRUTTURAZIONE_IMPORTANTE	S/N
11	RIQUALIFICAZIONE_ENERGETICA	S/N
12	OGGETTO_ALTRO	S/N

13	INDIRIZZO	Testo
14	WGS84_X	Numero
15	WGS84_Y	Numero
16	ANNO_COSTRUZIONE	Numero
17	SUPERF_UTILE_RISCALDATA	Numero [m ²]
18	SUPERF_UTILE_RAFFRESCATA	Numero [m ²]
19	VOLUME_LORDO_RISCALDATO	Numero [m ³]
20	VOLUME_LORDO_RAFFRESCATO	Numero [m ³]
21	RAPPORTO_SV	Numero [/]
22	CLIMATIZZAZIONE_INVERNALE	S/N
23	CLIMATIZZAZIONE_ESTIVA	S/N
24	VENTILAZIONE_MECCANICA	S/N
25	PROD_ACQUA_CALDA_SANITARIA	S/N
26	ILLUMINAZIONE	S/N
27	TRASPORTO_PERSONE_COSE	S/N
28	EDIFICIO_ENERGIA_QUASI_ZERO	S/N
29	CLASSE_ENERGETICA	Testo
30	EP_GL_NREN	Numero [kWh/m ² anno]
31	EP_GL_REN	Numero [kWh/m ² anno]
32	EP_H_ND	Numero [kWh/m ² anno]
33	EMISSIONI_CO2	Numero [kg/m ² anno]
34	CONSUMI_ENERGIA_ELETRICA	Numero [kWh]
35	CONSUMI_GAS_NATURALE	Numero [m ³]
36	CONSUMI_GPL	Numero [m ³]
37	CONSUMI_GASOLIO	Numero [kg]
38	CONSUMI_BIOMASSE	Numero [kg]
39	CONSUMI_SOLARE_FOTOVOLTAICO	Numero [kWh]
40	CONSUMI_SOLARE_TERMICO	Numero [kWh]
41	CONSUMI_ALTRO	Numero [kWh]
42	ENERGIA_ESPORTATA	Numero [kWh]
43	VETTORE_ENERGETICO	Testo
44	CI_TIPO_IMPIANTO	Testo
45	CI_VETTORE_ENERGETICO	Testo
46	CI_POTENZA_NOMINALE	Numero [kW]
47	CI_EFFICIENZA_GL	Numero [/]
48	CE_TIPO_IMPIANTO	Testo
49	CE_VETTORE_ENERGETICO	Testo
50	CE_POTENZA_NOMINALE	Numero [kW]

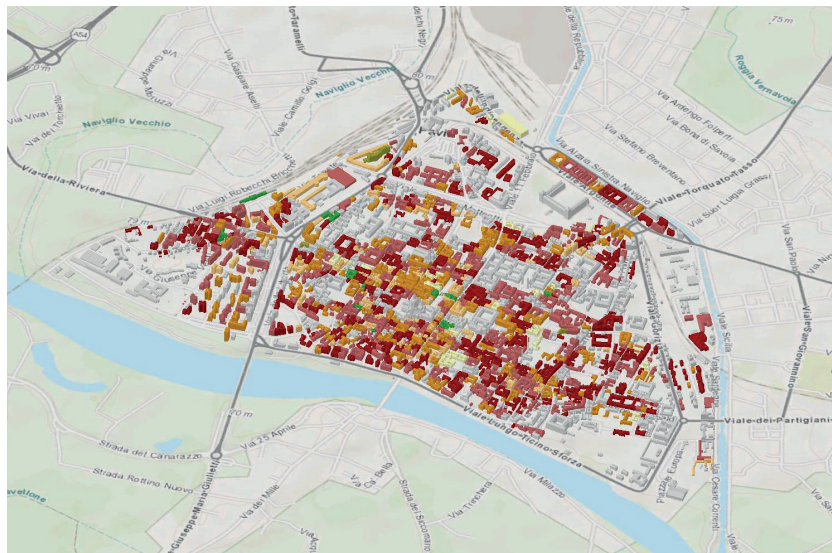
riferisce ad un'unità immobiliare, e non alla loro composizione in organismi edilizi, alcuni ragionamenti si sono resi necessari al fine di proporre un sistema di rappresentazione che mantenesse una certa coerenza informativa nella descrizione del comportamento energetico degli edifici nel loro insieme. In definitiva, si è deciso di sommare i dati metrici e sui consumi energetici, eventualmente ritardando i rapporti nei confronti delle unità di superficie, mentre in relazione alle classi energetiche si è ritenuto utile produrre dei nuovi attributi al fine di registrare il valore massimo e quello minimo corrispondente alle unità immobiliari che compongono gli edifici, oltre alla definizione e alla registrazione di una classe energetica media, ottenuta pesando i contributi provenienti da ogni APE in funzione delle superfici di pavimento. Il risultato di questa elaborazione è presentato in Fig. 81:

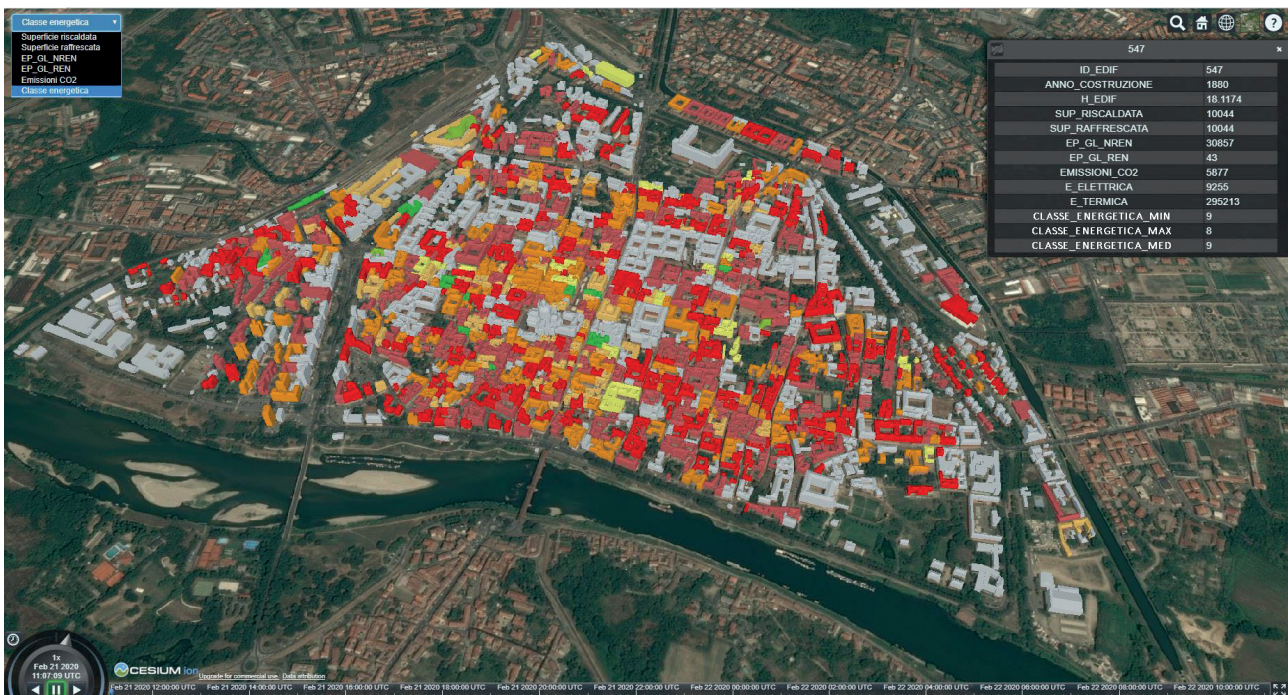
In seguito, le informazioni rappresentate in ArcGIS Pro sono state trasferite in un modello CityGML e l'esito è stato pubblicato nella piattaforma online per la visualizzazione di dati spaziali Cesium Ion. In questo ambiente, la possibilità di compilare istruzioni nel linguaggio JavaScript ha permesso di programmare delle applicazioni web-based per la visualizzazione e l'analisi dei dati attraverso il modello tridimensionale. In particolare, i codici sviluppati hanno permesso di evidenziare le proprietà degli edifici mediante l'applicazione di diversi schemi di visualizzazione in falsi colori selezionabili da menu a tendina e la definizione di tabelle valori che compaiono in seguito alla selezione dei fabbricati (Fig. 82). Il codice completo, che è stato sviluppato per il funzionamento di questa applicazione è consultabile all'Allegato 4.

In relazione al centro della città di Pavia, i 2585 APE redatti per singole unità immobiliari vengono aggregati a rappresentare la situazione di 929 edifici su un totale di 1853 modellati. Nell'area oggetto di studio, si può notare che i fabbricati sono principalmente collocati nelle classi energetiche più basse. Il

Fig. 81. Modello tridimensionale della città di Pavia con assegnazione di valori cromatici agli edifici sulla base della classe energetica media calcolata.

- CLASSE ENERGETICA
- A1
 - A2
 - A3
 - A4
 - B
 - C
 - D
 - E
 - F
 - G
 - Altro





risultato è coerente con le aspettative, in quanto la realtà urbana è caratterizzata da un'alta incidenza di edifici storici. Secondo il database CENED, infatti, la maggior parte delle certificazioni energetiche sono state effettuate su costruzioni risalenti al XIX sec. e, sulla base di dati statistici quali quelli raccolti nella base di dati realizzata con il progetto TABULA [52], è possibile affermare che tale tipologia di beni è solitamente associata a prestazioni energetiche di basso livello, sebbene l'alta inerzia termica determinata dagli importanti spessori delle pareti perimetrali in muratura ne migliori il comportamento globale. A completare il quadro complessivo, un numero ridotto di edifici, eterogeneamente distribuiti nel contesto urbano è in grado di raggiungere le classi energetiche più alte della scala. Di questi, la totalità rientra in casi di nuova costruzione, riqualificazione energetica o ristrutturazione importante. La presenza di classi di intervento che includono la trasformazione di organismi esistenti, in particolare, costituisce un segnale positivo, in quanto permette di affermare che, anche a partire dallo stato di fatto degli edifici del centro storico, è possibile raggiungere alti livelli di prestazione energetica attraverso la messa in atto di misure di miglioramento degli involucri e dei sistemi impiantistici.

Fig. 82. Modello tridimensionale della città di Pavia con assegnazione di valori cromatici agli edifici sulla base della classe energetica media calcolata, in ambiente Cesium Ion. In alto a sinistra è visibile il menu a tendina da cui scegliere lo stile di visualizzazione in falsi colori, mentre in alto a destra è presente la tabella con gli attributi corrispondenti a un'entità selezionata.

L'esperienza svolta conferma che gli Attestati di Prestazione Energetica costituiscono un'interessante fonte di dati per lo sviluppo di modelli urbani finalizzati alla conoscenza del comportamento energetico su media o vasta scala. Con lo sfruttamento delle informazioni in essi contenute, la rappresentazione grafica di dati numerici correlati alle prestazioni energetiche degli edifici permette di comprendere rapidamente

dinamiche che coinvolgo raggruppamenti di edifici di diversa estensione. Per questo motivo, l'utilizzo di modelli navigabili tridimensionali, si sta rapidamente affermando sia con lo scopo di dotare i gestori energetici e i facility manager di strumenti per la comunicazione e per il supporto alla decisione, che con quello di promuovere la conoscenza e incoraggiare usi responsabili dell'energia da parte degli utenti finali [178].

5.2.2. Visualizzazione dei dati energetici del patrimonio UNIPV

L'Università di Pavia dispone di efficaci strumenti di conoscenza e di monitoraggio del comportamento energetico dei propri edifici. In particolare, per quanto riguarda le caratteristiche energetiche dei fabbricati, intese sia come proprietà termiche degli involucri che come specifiche tecniche dei sistemi impiantistici, una serie di Audit Energetici realizzati nel 2016 fornisce un quadro approfondito. Parallelamente, l'ufficio tecnico di Ateneo incaricato della gestione del patrimonio immobiliare ha raccolto e reso disponibili i dati relativi ai fabbisogni mensili di energia elettrica e gas naturale nel periodo di fornitura 2011-2017 (circa 11000 registrazioni), più quelli corrispondenti ai consumi orari per il solo anno 2017 (circa 175000 registrazioni). Oltre a ciò, analisi approfondite sono state realizzate anche sotto il profilo scientifico grazie alle ricerche dirette della Prof. Magrini, che ha proposto una valutazione dei consumi energetici degli edifici dell'Università di Pavia attraverso l'utilizzo dell'indice normalizzato IEN (Indicatore Energia Normalizzato) [266, 267], proposto dall'ENEA-FIRE (Agenzia nazionale italiana per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile Federazione italiana per l'uso razionale dell'Energia) per l'analisi dei fabbisogni di riscaldamento degli edifici scolastici [268].

La grande mole di dati che si viene a costituire rappresenta un enorme potenziale per la costruzione di un quadro conoscitivo di grande valore, che potrebbe essere messo a disposizione di tutte le classi di utenza che gravitano intorno agli edifici dell'Università, siano essi gestori o fruitori dei servizi connessi.

Tuttavia, allo stato attuale, i set informativi si presentano separati ed eterogenei, distribuiti tra file di testo e fogli di calcolo che non comunicano tra loro. Al fine di capitalizzare il carico informativo, occorre mettere a sistema tutte i dati reperibili e connetterli in un'unica piattaforma, dalla quale deve essere possibile estrapolare quadri sinottici di tipo tematico prodotti anche dall'interrogazione simultanea di più fonti di dati.

A questo scopo, a partire dai dati disponibili e attraverso le modalità già discusse, è stata realizzata un'applicazione web-based per la navigazione e la consultazione delle informazioni energetiche che riguardano gli edifici dell'Università di Pavia. Come piattaforma di visualizzazione è stato utilizzato il servizio online di ESRI, che permette un collegamento diretto con le mappe definite o importate in ambiente ArcGIS Pro.

La mappatura ha riguardato i nove edifici dell'Ateneo collocati nel centro storico della città, ovvero quelli posti all'interno dell'area oggetto di studio. I dati inseriti sono stati ricavati dai documenti precedentemente citati e riferiti a livello dei singoli edifici, secondo quanto riportato nelle tabelle presentate di seguito. Per praticità di visualizzazione, le informazioni sono qui disposte per tema, nonostante nel modello vengano registrate congiuntamente. In particolare, in Tab. 24 sono presentati i dati generali e dimensionali, in Tab. 25 le proprietà termiche degli involucri edilizi, in Tab. 26 le informazioni tecniche sui generatori di calore installati e in Tab. 27, i consumi elettrici e termici annuali, calcolati sulla base delle medie mensili delle serie di dati sui fabbisogni nel periodo 2011-2017.

CODICE	NOME	SECOLO DI RIFERIMENTO	EDIFICIO VINCOLATO	AREA RISCALDATA	VOLUME RISCALDATO	SUPERFICIE DELL'INVOLUCRO	RAPPORTO S/V
				m ²	m ³	m ²	/
1	Palazzo Centrale	XV-XIX	Si	23576,00	111551,16	48323	0,43
2	Palazzo del Maino	XVIII	Si	2624,31	14032,63	5482	0,39
3	Palazzo S. Tommaso	XIX-XV	Si	10510,00	53029,00	17408	0,33
4	Area Ex INPS	XIX-XX	No	2247,80	9308,28	3452	0,37
5	Palazzo San Felice	VIII-XVI	Si	8091,00	42041,25	18068	0,43
6	Palazzo Botta	XV-XVIII	Si	4659,00	24818,44	6610	0,27
7	Palazzo Vistarino	XVIII	Si	3175,49	16154,79	6970	0,43
8	Orto Botanico	XVIII	Si	5835,66	29372,73	13505	0,46
9	Ex Area Ponzio	XX	No	1436,67	5502,75	3309	0,6

Tab. 24. Informazioni generali e dimensionali sugli edifici oggetto di studio.

CODICE	NOME	TRASMITTANZA PARETI PERIMETRALI	TRASMITTANZA FINESTRE	TRASMITTANZA PAVIMENTO CONTRO TERRA	TRASMITTANZA ULTIMO SOLAIO	RAPPORTO SUPERFICIE VETRATA/OPACA
		W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	/
1	Palazzo Centrale	1,07	3,5	1,39	1,7	6,3
2	Palazzo del Maino	1,03	3,15	1,39	1,7	5,4
3	Palazzo S. Tommaso	1,03	3,1	1,39	1,7	4,5
4	Area Ex INPS	1,28	4,5	1,39	1,7	7,9
5	Palazzo San Felice	0,77	3	1,39	1,7	5,3
6	Palazzo Botta	1,27	4,7	1,39	1,7	8,4
7	Palazzo Vistarino	1,03	3	1,45	1,78	5,8
8	Orto Botanico	1,09	2,5	1,84	1,84	6,2
9	Ex Area Ponzio	0,82	3,3	/	1,35	4,2

Tab. 25. Informazioni sulle proprietà termiche degli involucri edilizi degli edifici oggetto di studio.

CODICE	NOME	GENERATORE DI CALORE	ANNO	POTENZA TERMICA UTILE COMPLESSIVA	MARCATURA RENDIMENTO ENERGETICO	RENDIMENTO PIENO CARICO
				kW	/	/
1	Palazzo Centrale	RAVASIO TRS2000-N-R D5	2002	2336	1	91,3
		RAVASIO TRS1000-ND. 4N	2004	1167	1	91,3
2	Palazzo del Maino	UNICAL Supermodulex 550	2009	550	4	99,3
3	Palazzo S. Tommaso	BLOWTHERM PACK P/AR900	1996	900	/	95,3
4	Area Ex INPS	UNICAL Modulex 290	2009	282	4	97
5	Palazzo San Felice	ERRETIESSE WESSEXC ABY	2005	880	2	93,2
		YGNIS VARBLOC K250c	/	245	4	99
		UNICAL ALKON 90	2009	87,5	4	97,2
6	Palazzo Botta	RAVASIO TRS1000	2000	1000	2	91
		HOVAL STP1000	1992	1000	1	/
7	Palazzo Vistarino	ELCO TRIMAX 600	2012	600	3	95,2
		ELCO TRIMAX 600	2012	600	3	95,2
8	Orto Botanico	UNICAL Tristar 860	2009	870	3	95,3
		UNICAL Tristar 860	2009	870	3	95,3
9	Ex Area Ponzio	UNICAL Tristar 260	2009	260	3	94,9

Tab. 26. Informazioni sui generatori di calore degli edifici oggetto di studio.

CODICE	NOME	FABBISOGNO ENERGIA TERMICA ANNUALE	FABBISOGNO ENERGIA TERMICA ANNUALE/ m ³	FABBISOGNO ENERGIA ELETTRICA ANNUALE	FABBISOGNO ENERGIA ELETTRICA ANNUALE/ m ³
		kWh	kWh/m ³	kWh	kWh/m ³
1	Palazzo Centrale	2498689,3	22,40	889241,9	7,97
2	Palazzo del Maino	329162,7	23,46	180470,83	12,86
3	Palazzo S. Tommaso	905314,99	17,07	418084,88	7,88
4	Area Ex INPS	240975,66	25,89	/	/
5	Palazzo San Felice	869562,65	20,68	151695,36	3,61
6	Palazzo Botta	751953,05	30,30	174959,67	7,05
7	Palazzo Vistarino	498510	30,86	129822,88	8,04
8	Orto Botanico	868807,75	29,58	228668,00	7,79
9	Ex Area Ponzio	148535,44	26,99	/	/

Tab. 27. Informazioni sui consumi termici ed elettrici degli edifici oggetto di studio.

In seguito alla realizzazione e al popolamento modello, la pubblicazione nella web app di ArcGIS consente di rappresentare i layer informativi in un ambiente tridimensionale navigabile e di visualizzare i dati correlati mediante rappresentazioni in falsi colori o, in alternativa, accedendo alle tabelle collegate a ciascuna entità spaziale. In Fig. 83 si riportano due possibili esempi di mappe tematiche, che rappresentano i consumi termici ed elettrici degli edifici dell'Ateneo pavese su base annuale e per unità di volume. Com'è facile notare, la visualizzazione nella piattaforma navigabile tridimensionale consente di collocare visivamente le informazioni nel contesto a cui si riferiscono, correlandole agli edifici di pertinenza, con riferimento al posizionamento nello spazio e alle caratteristiche morfologiche primarie, quali l'estensione, la compattezza della forma o l'altezza fuori terra.



Fig. 83. Rappresentazione nel modello tridimensionale (sinistra) e mediante diagramma a barre (destra) del Fabbisogno termico (sopra) ed elettrico (sotto) annuale per unità di volume relativo ai 9 edifici oggetto di indagine.

Nel caso in esame, dal punto di vista del consumo di energia termica, gli edifici più critici risultano Palazzo Botta, Palazzo Vistarino e l'Orto Botanico. Si tratta di tre costruzioni che condividono alcune caratteristiche: sono state edificate, o comunque trasformate in modo importante, nel corso del XVIII sec., fanno parte del centro storico della città, pur sorgendo ai suoi margini, e si configurano in adiacenza a dei vuoti urbani. Queste considerazioni, alcune delle quali sono leggibili solo ponendo gli edifici in relazione al loro intorno, possono aiutare a comprendere le ragioni di prestazioni scarsamente efficienti. Si può ad esempio ipotizzare che, oltre alle caratteristiche degli involucri edilizi e dei sistemi impiantisti, anche la specifica collocazione, che vede questi edifici solo parzialmente immersi nel denso tessuto della città antica, contribuisca a determinare il maggior fabbisogno di energia termica, in confronto a fabbricati simili posti in contesti differenziati. Lo stesso aspetto, inoltre, può suggerire l'adozione di strategie di riqualificazione, che potrebbero sfruttare parte degli spazi lasciati vuoti per edificare nuove centrali termiche o per migliorare il comportamento degli involucri attraverso strutture poste in continuità. Naturalmente, a questa scala di dettaglio si tratta di ragionamenti di carattere puramente strategico, che vanno valutati e progettati con riferimento a livelli di indagine più approfonditi.

Per quanto riguarda i consumi elettrici, invece, l'edificio che richiede la maggior quantità di energia per unità di volume è Palazzo del Maino, sede dell'Area Servizi Tecnici dell'Università di Pavia, che si stacca in modo importante dalla media. In questo caso, la differenza nel fabbisogno può essere ricercata nella destinazione d'uso dell'edificio, unico nell'insieme considerato ad ospitare esclusivamente funzioni di tipo amministrativo.

Guardando in parallelo le due finestre di visualizzazione, poi, si può notare che non vi è coincidenza fra gli edifici che consumano il maggior livello di energia elettrica e termica, evidenziando un'importante discrepanza che consente di comprendere come le esigenze di aggiornamento di ciascun edificio siano uniche e difficilmente riconducibili a casi standard.

5.3. Conclusioni

Nel complesso, lo strumento proposto permette di riportare in ambienti di facile consultazione set di dati che hanno a che fare con il comportamento energetico degli edifici, consentendo di attivare ragionamenti sui consumi termici ed elettrici e di avanzare ipotesi preliminari su possibili scenari di riqualificazione. Più in generale, si può affermare che le opportunità derivanti dall'implementazione di modelli tridimensionali a servizio della comunicazione di dati energetici sugli edifici esistenti comporta quattro classi di vantaggi:

- La possibilità di combinare informazioni provenienti da più fonti dati in un'unica piattaforma, consentendo di porre in relazione e confrontare anche aspetti appartenenti a diversi domini della conoscenza;
- L'utilità di apportare leggibilità e di sintetizzare efficacemente grandi moli di dati, altrimenti difficili da comunicare e diffondere;
- La possibilità di rappresentare le relazioni che intercorrono fra le informazioni e le entità fisiche a cui esse si riferiscono, rendendo così più concreti i dati numerici e garantendo una maggiore contestualizzazione delle informazioni;
- La garanzia di inclusività nei confronti dei diversi profili di utenza coinvolti nella gestione e nell'uso degli edifici, grazie all'utilizzo di piattaforme user-friendly, che possono essere consultate e condivise per mezzo di strumenti online anche promossi dai canali dell'Università.

PARTE 2

UNO STRUMENTO DI SUPPORTO ALLA DECISIONE PER IL
MIGLIORAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI ESISTENTI

1. Il decision-making nelle fasi preliminari del processo edilizio

Le prime fasi del processo edilizio sono caratterizzate da un elevato numero di scelte, che risultano avere una forte influenza sulle prestazioni dell'edificio nel corso del suo intero ciclo di vita [10]. Per questo motivo, nel delicato momento in cui i soggetti coinvolti sono chiamati ad esprimersi per le prime volte in relazione agli interventi di trasformazione che costituiscono il progetto, è essenziale disporre di strumenti di sintesi efficaci, capaci di supportare decisioni informate e di tenerne traccia, così da agevolare la definizione un processo scorrevole e trasparente, privo di errori e ridondanze, che possono presentarsi in assenza di comunicazione e coordinamento. Con la finalità di sostenere il decision-making nelle fasi preliminari dei processi edilizi, infatti, non è importante manipolare grandi moli di dati o informazioni particolarmente accurate, in quanto le valutazioni prestazionali proprie di questa fase devono essere principalmente finalizzate a direzionare le impostazioni strategiche del progetto attraverso la messa in relazione delle ipotesi con gli impatti complessivi che esse generano [11]. Ciò risulta particolarmente importante in un'ottica di progettazione orientata alla prestazione (performance based building design) [269], una logica di lavoro in cui il processo edilizio è descritto come un'azione iterativa di esplorazione di alternative, la cui forza motrice consiste nella volontà di ottenere soluzioni atte a soddisfare particolari requisiti prestazionali, definiti in contesti specifici. In questo frangente, la qualità del progetto e del processo può essere raggiunta solo attraverso valutazioni multi-criteriali e multidisciplinari, che comprendano la considerazione simultanea di più funzioni di comportamento associate all'edificio.

Nel contesto della riqualificazione energetica del costruito, una strategia efficace deve basarsi sulla valutazione preliminare degli effetti di possibili scelte progettuali, con ricadute che agiscono su tutto il ciclo di vita degli organismi edilizi considerati. Ciò implica la necessità di predeterminare con sufficiente attendibilità la compatibilità tecnico-economica delle alternative progettuali, oltre che l'applicabilità delle stesse con relazione all'unicità degli edifici e dei loro sistemi identitari. Appare chiaro che questa valutazione non può che avvenire negli stadi iniziali del processo edilizio, in quanto solo l'esito positivo di questa fase potrà far scaturire ipotesi progettuali che siano perseguibili, in quanto consapevoli dei loro impatti. Si rende, quindi, necessario arrivare a definire un prodotto preprogettuale che supporti e guidi i processi decisionali, derivando gli indirizzi progettuali da una mappatura concettuale e analitica delle risorse residue e dei vincoli che gli edifici presentano allo stato di fatto [270].



Fig. 84. Il processo edilizio iterativo della progettazione orientata alla prestazione. Rielaborazione da [269].

Tuttavia, nella comune pratica di lavoro, le analisi prestazionali non vengono integrate nel processo edilizio fin dal suo inizio, ma, al contrario, sono eseguite a valle della progettazione architettonica e utilizzate come strumento di verifica più che di programmazione. Inoltre, tali analisi sono solitamente processate da figure professionali altamente specializzate, che non si occupano della gestione delle commesse nel loro insieme e, perciò, non ne conoscono le dinamiche complessive. Per questo motivo, anche i software messi a disposizione per l'analisi e la simulazione delle prestazioni degli edifici non sono pensati per un utilizzo nelle fasi preliminari del processo, richiedendo competenze specifiche avanzate e moli di dati che difficilmente sono disponibili all'inizio della fase progettuale. Eppure, per supportare decisioni informate nelle fasi iniziali della progettazione, non è richiesto un alto livello di accuratezza e precisione nei dati in ingresso, poiché l'analisi del rapporto fra requisiti e prestazioni non deve fornire output quantitativi dettagliati, ma, piuttosto, mostrare gli impatti generali ed evidenziare le relazioni che esistono fra diverse ipotesi trasformative [11].

La curva di Paulson (Fig. 85), diffusa nel 1976 come parte di uno studio sulla contrazione dei costi di costruzione [271], dà chiara evidenza del problema associato alla pratica corrente, mettendo in relazione il livello di influenza e l'impatto in termini di costi che ciascuna scelta progettuale può causare durante il processo edilizio. Nel corso della fase di progettazione, le decisioni che vengono prese hanno un costo che è vicino allo zero, nonostante siano in grado di influenzare in modo determinante la qualità dei prodotti del processo edilizio. In fase di costruzione, crescono i costi associati alle modifiche progettuali mentre si riduce l'effetto che esse possono determinare, finché, in fase di esercizio ogni alterazione risulta estremamente costosa e poco efficace. Da ciò deriva che è essenziale spostare verso gli stadi iniziali del processo gli sforzi progettuali rivolti all'analisi prestazionale, come indicato dalla curva di MacLeamy [272] (Fig. 86). Questa, partendo dal grafico precedente, aggiunge due tracce, che sono riconducibili al processo edilizio tradizionale, il quale tende a prendere le decisioni più importanti in uno stadio avanzato della fase progettuale, e ad una nuova proposta, più auspicabile, che suggerisce un'anticipazione della fase decisoria in un momento in cui sussistono meno dati certi, ma si ha anche più possibilità di modifica in associazione a minori impatti sui costi. A ciò segue la necessità di dotare i soggetti incaricati della progettazione a livello preliminare di strumenti capaci di rappresentare i risultati di possibili scenari progettuali, senza la necessità di eseguire analisi di dettaglio.

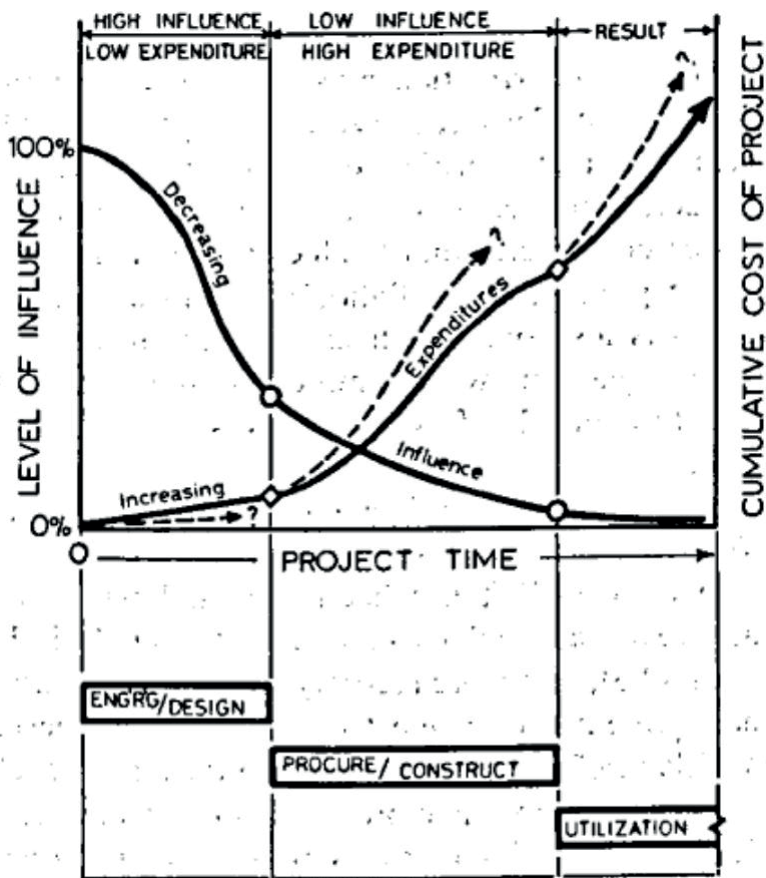


Fig. 85. Curva di Paulson [271].

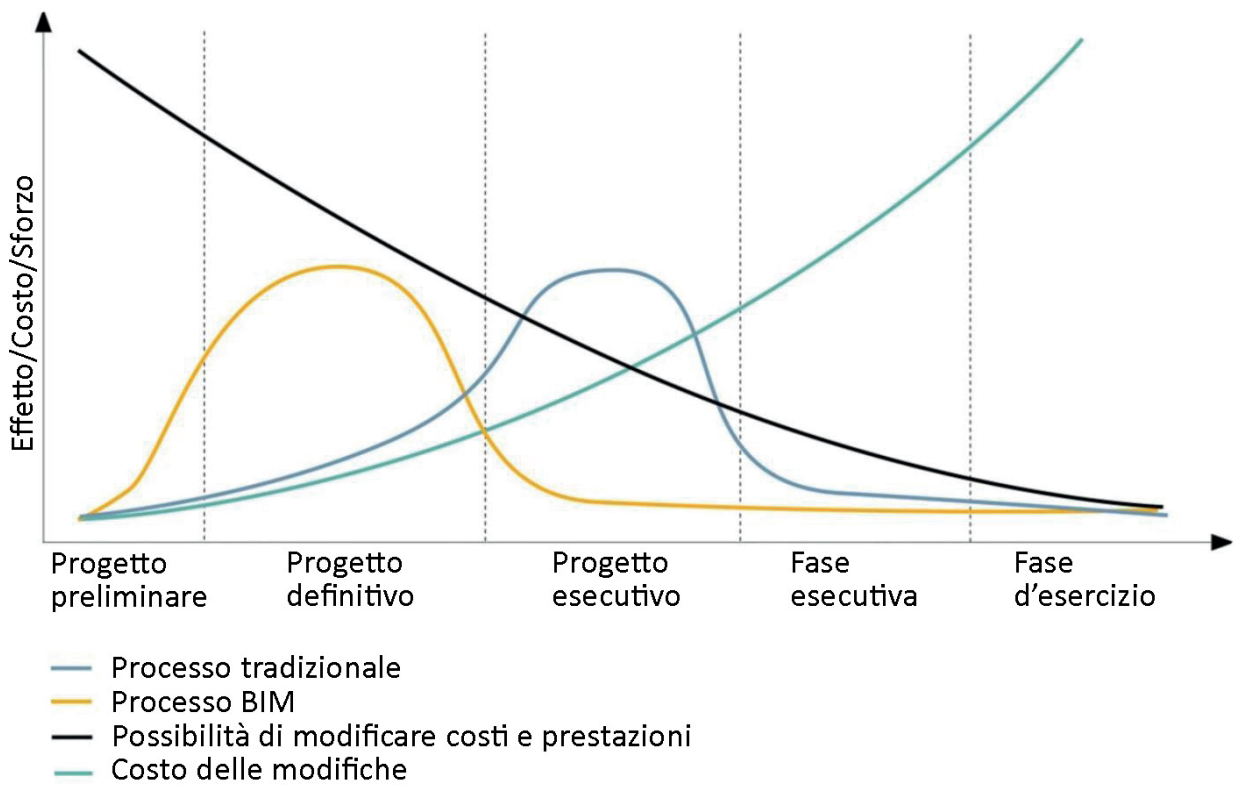


Fig. 86. Grafico di MacLeamy. Rielaborazione da [272].

1.1. I sistemi di supporto alla decisione

L'analisi dei requisiti prestazionali tende a generare problemi complessi. L'attività di progettazione, nell'ambito AEC, è già di per sé caratterizzata da un processo decisionale che coinvolge una pluralità di soggetti, è fortemente multidisciplinare e si protrae lungamente nel tempo, con la finalità di raggiungere una moltitudine di obiettivi, che possono essere anche parzialmente contraddittori. Così, allo stesso modo, i criteri per valutare la qualità del processo sono molteplici e possono essere rappresentati da un insieme eterogeneo di parametri qualitativi e di caratteristiche numeriche, a loro volta associate a diverse unità di misura e scale di valori [273].

In questo contesto, l'attivazione di metodologie valutative può essere utile al fine di generare resoconti sintetici che evidenzino i parametri maggiormente determinanti per la buona riuscita dei processi edilizi, rappresentando efficacemente i rapporti che esistono fra requisiti e prestazioni, in funzione di diverse scelte progettuali. A questo scopo, l'idea di utilizzare metodi matematici per supportare i processi decisionali in ambiti complessi non è sicuramente nuova, e anzi, già dagli anni '50 del secolo scorso, gruppi di ricerca indipendenti hanno affrontato il tema, suggerendo approcci tratti dagli studi sull'ottimizzazione o sulla teoria dei giochi [273].

Per la natura del settore edilizio e dei flussi di lavoro che lo caratterizzano, fra le possibili proposte, quelle più adatte appaiono le tecniche di ottimizzazione multi-criteriale basate sulla simulazione, che si occupano di razionalizzare il processo decisionale mediante l'ottimizzazione di un vettore formato da più criteri, dove per criterio si intende un singolo elemento di giudizio volto a testare la desiderabilità delle proposte alternative [274], i cui valori vengono calcolati attraverso cicli di simulazione. In particolare, si ritiene sensato adoperare metodi multi-attributo, che, in opposizione a quelli multi-obiettivo, si occupano di indagare uno spazio caratterizzato da un numero finito di alternative discrete. Tali tipologie di processi si articolano in tre fasi principali [275]:

- Determinazione dei criteri e delle alternative rilevanti;
- Pesatura dei criteri e degli impatti nelle alternative in termini dei criteri stessi;
- Elaborazione numerica e determinazione della graduatoria delle alternative.

Seguendo questo schema, le procedure portano all'individuazione di una classifica che ordina le alternative progettuali dalla maggiormente preferibile alla meno consigliata, giungendo a una soluzione deterministica del problema di partenza. In alternativa, è possibile procedere considerando che tutti gli attributi abbiano la stessa importanza, e fermarsi

al riconoscimento di uno spazio n-dimensionale (dove n corrisponde al numero di criteri selezionati), all'interno del quale è possibile scegliere la soluzione più adeguata alle esigenze, procedendo, di fatto, a valutare la preferenza dei criteri in seguito al processo di calcolo, anche sulla base di considerazioni non strettamente analitiche. Come appare evidente, è possibile trarre vantaggio dalla definizione di un tale output solo nel caso della gestione di un numero ridotto di attributi, cosicché il risultato possa essere facilmente rappresentato e compreso in uno spazio definito al massimo da tre dimensioni [276]. Questa modalità risulta qui preferibile, in quanto evita che la metodologia numerica si sostituisca integralmente agli attori coinvolti nel processo decisionario. Il supporto alla decisione non avviene, dunque, attraverso l'individuazione della soluzione migliore, ma mediante la fornitura di un sostrato informativo che favorisce la presa di coscienza sulle caratteristiche del problema ed agevola la costruzione di un dialogo inclusivo finalizzato alla presa di decisione.

Nella categoria di metodi di valutazione senza pesatura dei criteri a monte, un approccio interessante è quello dell'efficienza Pareto (Fig. 87), che viene spesso utilizzato nell'ambito di problemi di ottimizzazione applicati alla sostenibilità in edilizia [278]. La procedura prevede di individuare in un insieme di soluzioni proposte, quelle caratterizzate dall'allocatione più efficiente delle risorse, le quali vanno a definire la cosiddetta Frontiera di Pareto. In questo spazio, che assume la forma di una curva nel caso di problemi costituiti da due funzioni obiettivo,

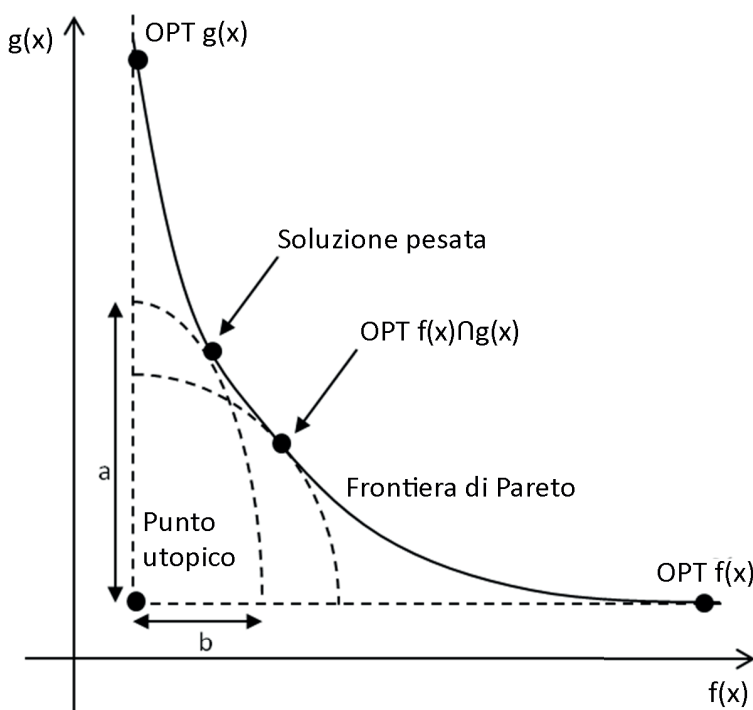


Fig. 87. Descrizione sintetica delle caratteristiche dell'ottimizzazione paretoiana nel caso di due funzioni obiettivo [277].

di una superficie per problemi caratterizzati da tre funzioni obiettivo e così via, sono collocati tutti i punti che risultano parimenti ottimali sotto il profilo dei criteri selezionati [279]. Ciò significa che, presa una soluzione appartenente alla Frontiera di Pareto, un miglioramento di uno degli attributi non può che provocare un peggioramento degli altri. La costruzione della Frontiera di Pareto è a propria volta un problema matematico, in cui la valutazione di un numero contenuto di strategie progettuali consente di procedere ad una risoluzione analitica, mentre, al crescere della complessità occorre attivare tecniche più sofisticate, che mettono in gioco algoritmi stocastici capaci di ridurre le iterazioni, e quindi il tempo di calcolo, nella determinazione della Frontiera.

A prescindere dal tipo di metodologia applicata per la risoluzione dei problemi di ottimizzazione, risulta chiaro che il loro funzionamento non può prescindere da un supporto computerizzato. A questo scopo, a partire dagli anni '70 [280], vengono sviluppati i sistemi di supporto alla decisione (DSS - decision support system), ovvero strumenti informatici, che implementano modelli matematici con lo scopo di supportare i processi decisionali. Si tratta di soluzioni software fondate su basi di dati, il cui scopo principale è quello di estrarre ed elaborare in tempi rapidi le informazioni utili ai processi decisionali.

1.2. Le applicazioni in ambito energetico

Le Direttive europee emanate a partire dal 2010 hanno spostato il focus delle analisi energetiche dai singoli componenti al funzionamento dell'edificio nella sua globalità. In questo contesto, scegliere l'insieme più efficace fra le possibili soluzioni progettuali è un'attività complessa e costosa, ma centrale per la buona riuscita del processo edilizio. Poter simulare l'effetto di scenari alternativi di progetto e dei loro effetti sulle prestazioni dell'edificio è, infatti, fondamentale per assicurarsi di non tralasciare opportunità che possono essere vincenti o, peggio, di non ottenere effetti indesiderabili a causa di un processo decisionale troppo superficiale [11].

Anche nell'ambito specifico, si conferma quanto visto in generale: prendere decisioni ponderate sulla sostenibilità è un'attività che richiede la gestione di un grande insieme di informazioni, da considerarsi in modo integrato nella rete di mutue relazioni che generano, che può trarre vantaggio dalla possibilità di simulare scenari trasformativi alternativi, al fine di valutarne gli effetti. Gli strumenti di simulazione delle prestazioni degli edifici basati sulle tecnologie informatiche sono perfetti per questi scopi, tuttavia, al fine di eseguire calcoli accurati, essi richiedono spesso input informativi molto specifici, che si adattano male alle fasi preliminari dei processi edilizi. Occorre,

quindi, pensare allo sviluppo di nuove soluzioni, che non si occupino di determinare con esattezza il comportamento degli organismi edilizi, ma, invece, cerchino di stimare gli impatti di diverse strategie progettuali e di evidenziarne le conseguenze in un'ottica multidisciplinare.

La lettura congiunta di un insieme di pubblicazioni che hanno esaminato l'uso di metodologie di supporto alla decisione in ambito energetico, ha permesso di individuare le caratteristiche più ricorrenti dei sistemi impiegati in letteratura e, in particolare, di determinare quali possano essere considerati i parametri più rappresentativi per la gestione e la soluzione dei problemi di ottimizzazione connessi.

A livello generale, trattando di decisioni finalizzate alla sostenibilità delle scelte energetiche, Wang et al. [281] scompongono il processo di analisi multicriteriale nelle sue parti, per comprendere la distribuzione degli strumenti utilizzati in ciascuna fase. Per quanto riguarda la scelta dei criteri, lo studio raccomanda innanzitutto di avvalersi di un insieme contenuto, i cui componenti vanno selezionati sulla base di cinque principi fondamentali:

- Sistemicità: Capacità di rappresentare l'organizzazione nel suo insieme;
- Consistenza: Allineamento fra i criteri e gli obiettivi;
- Indipendenza: Autonomia e non sovrapposizione dei criteri;
- Misurabilità: Possibilità di valutazione oggettiva preferibilmente quantitativa;
- Comparabilità: Facilità di confronto e normalizzazione delle quantità coinvolte.

Nell'analisi di letteratura, gli attributi che più frequentemente vengono presi in considerazione risultano l'efficienza dei sistemi impiantistici, ossia il rapporto fra l'energia prodotta e quella utile, il costo dell'investimento iniziale e l'emissione di CO₂.

Nell'ampio studio condotto dal Kolokotsa et al. e presentato in [282], gli autori analizzano in modo approfondito la questione del supporto alla decisione finalizzato all'efficienza energetica nella gestione degli edifici esistenti, generando un excursus completo che attraversa tutto il processo edilizio: a partire dagli scopi e dalle fasi che caratterizzano la riqualificazione energetica degli edifici esistenti, per arrivare all'analisi delle metodologie utilizzate nel decision-making. Anche in questo caso, i criteri che vengono identificati come maggiormente utilizzati per le categorie di impatto energetico, economico e ambientale sono, rispettivamente, fabbisogno energetico invernale e/o estivo per il condizionamento degli spazi, costi diretti e costo di investimento e potenziale di riscaldamento globale annuo (GWP - Global Warming Potential).

Infine, restringendo il campo al tema della sola riqualificazione energetica degli edifici, Ferreira et al. [283] individuando cinque

gruppi di strategie che possono essere utilizzate al fine di fornire un supporto alla decisione. Queste, si discostano dalla tipica classificazione di tipo matematico puntando, invece, a una distinzione in funzione degli obiettivi dell'analisi:

- Metodi generali adattati in funzione delle esigenze degli utenti;
- Miglioramento delle prestazioni energetiche/Riduzione delle emissioni di CO₂;
- Analisi puramente economiche;
- Metodi orientati al ciclo di vita (LCA);
- Valutazioni di sostenibilità.

Pur adoperando metodologie differenziate e richiamando sottoinsiemi non perfettamente allineati di attributi di calcolo, nella loro applicazione, i diversi approcci dimostrano comunque di condividere le stesse finalità, impiegando approcci multicriteriali volti a minimizzare due gruppi di obiettivi che si trovano tra loro in contrasto, ovvero gli impatti ambientali e i costi economici associati. Nel fare ciò, i criteri più diffusamente utilizzati sono il fabbisogno energetico nel settore tecnico/ambientale e il costo di investimento iniziale in relazione all'ambito economico.

Ciò che si può evidenziare in modo critico, invece, è che ciascuno studio procede in maniera del tutto autonoma, riferendosi ai precedenti, ma proponendo metodologie che cambiano di volta in volta. Se si sommano le pubblicazioni analizzate dalle tre review appena discusse, infatti, si possono contare circa trecento proposte formulate in venti anni, ciascuna delle quali differisce dalle altre in funzione della combinazione di scelte che vengono attuate per quanto riguarda i criteri, i metodi di pesatura e le procedure di calcolo per la soluzione del problema.

Nonostante aiuti a definire un quadro in costante miglioramento, questo aspetto non concorre a realizzare risultati confrontabili, che permettano di paragonare efficacemente gli studi disponibili e di comprendere quali siano realmente le misure più efficaci. Per ovviare a questa problematica, la proposta che viene qui formulata, in linea con quanto già visto nei passaggi precedenti della ricerca, è quella di riferirsi a strumenti standardizzati e condivisi a livello comunitario. Si tratta, quindi, di andare a rintracciare metodologie e buone pratiche che sono state diffuse attraverso Raccomandazioni o Direttive emanate dall'Unione Europea. Tali strumenti potranno essere meno completi o accurati di altri riscontrabili in letteratura, ma avranno certamente il vantaggio di una vasta diffusione nel contesto comunitario, e quindi della possibilità di confronto diretto degli esiti.

2. La metodologia cost-optimal

Si è già avuto modo di sottolineare come la Direttiva Europea 2010/31/EU [13] costituisca un documento chiave nello sviluppo delle politiche comunitarie e nazionali per l'efficienza energetica degli edifici. Scopo principale della Direttiva è quello di dotare gli Stati membri di strumenti comuni, così da poter definire obiettivi allineati da perseguirsi attraverso processi condivisi. Fra le altre cose, il testo normativo introduce il concetto di "livello ottimale in funzione dei costi", definito come il livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita stimato, e il corrispondente quadro metodologico per l'individuazione dei suddetti livelli ottimali in relazione ai requisiti di prestazione energetica per edifici ed elementi edilizi, comprendendo sia le nuove costruzioni che gli interventi sull'esistente. Nello studio qui presentato, la metodologia cost-optimal viene adottata come strumento di valutazione delle alternative progettuali volte alla riqualificazione energetica degli edifici. La scelta di riferirsi a un sistema normato e diffuso a livello europeo si propone di superare la grande eterogeneità di metodi presentati nelle pubblicazioni degli ultimi venti anni. Infatti, se è certamente possibile individuare delle criticità nella metodologia proposta, che può apparire superficiale rispetto a esempi più complessi rinvenuti in letteratura, si ritiene che la sua forza risieda, invece, nella standardizzazione e nella promozione a livello istituzionale. Nel contesto europeo, chiunque implementi questa metodologia dovrà confrontarsi con gli stessi criteri di valutazione e gli stessi metodi di calcolo, mentre a livello nazionale verranno applicati anche i medesimi parametri economici ed energetici. Ciò comporta il vantaggio di ottenere risultati altamente controllabili, riproducibili e confrontabili, determinando la sicurezza e la trasparenza dei processi associati.

La metodologia è composta da una valutazione energetica e da una stima economica, che vengono congiunte con la finalità di individuare scenari trasformativi capaci di ridurre i costi associati all'utilizzo degli edifici con riferimento al ciclo di vita e di realizzare benefici a livello ambientale/sociale [284]. Il calcolo energetico è volto alla determinazione del fabbisogno di energia primaria dell'edificio, è attuato secondo lo schema della norma internazionale UNI EN 15603:2008 [285] (recentemente sostituita dalla UNI EN ISO 52000-1:2018 [286]) e considera il consumo di energia per ciascun uso finale (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, illuminazione e ventilazione) e per ogni vettore energetico, tenendo conto delle efficienze di tutti i sottosistemi impiantistici e dell'eventuale produzione in loco di energia da sorgenti rinnovabili. La stima economica, invece, mira alla valutazione del costo globale di gestione energetica

(global cost) nel periodo di calcolo, è eseguito secondo la procedura indicata nella norma UNI EN 15459:2017 [287] e stimato in termini di Valore Attuale Netto (VAN), che impone l'attualizzazione all'anno zero di tutti i flussi di cassa previsti. Il calcolo può seguire due diverse procedure in funzione di un orizzonte finanziario, attuato secondo il punto di vista dei soggetti privato, o macroeconomico, nella prospettiva degli enti pubblici, che differiscono in relazione ai parametri da includere. Nello scenario macroeconomico, che andremo qui a considerare, si considerano l'investimento iniziale, il costo energetico, la monetizzazione delle emissioni di CO₂, i costi legati ai componenti edilizi coinvolti nelle misure di miglioramento energetico (manutenzione, sostituzione, smaltimento e il valore residuo) e i guadagni derivanti dalla vendita di energia prodotta in loco per mezzo di sorgenti rinnovabili.

L'analisi, guidata in questo modo da due criteri fondamentali che raggruppano una serie di parametri disciplinari, porta all'individuazione di due indicatori di prestazione per ciascuno scenario progettuale, e quindi alla possibilità di rappresentazione in un grafico sul piano cartesiano (Fig. 88), dove le soluzioni vengono posizionate in relazione al loro costo in termini economici ed energetici. Da tale esito, si può identificare il luogo dei punti in cui sono allocate le soluzioni parimenti ottimali (la Frontiera di Pareto), fra cui è possibile scegliere in funzione di considerazioni sul peso relativo dei criteri. In questo modo, la procedura non conduce all'identificazione di un'unica soluzione da intendersi come la migliore, ma, al contrario, presenta graficamente la relazione fra tutte, costituendo la base di partenza per un ragionamento finalizzato alla decisione.

Da parte dell'ente normatore, l'obiettivo primario della metodologia era quello di fornire un metro di giudizio per l'individuazione dei requisiti minimi prestazionali, che gli Stati membri sono stati chiamati a definire negli anni successivi

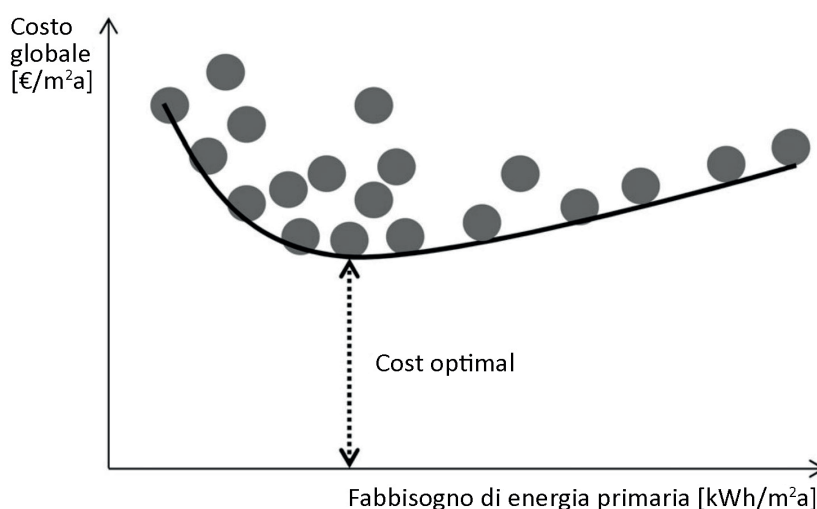


Fig. 88. Schema di grafico risultante dall'applicazione della metodologia cost-optimal. Si noti il significato dei due assi, che rappresentano il costo in termini energetici ed economici, riportando rispettivamente il fabbisogno energetico primario [kWh/m²a] e il costo globale [€/m²]. Rielaborazione da [288].

all'emanazione della Direttiva del 2010, per delineare le proprietà termiche ed energetiche minime che sono richieste agli edifici e ai loro componenti. Tuttavia, la versatilità dello strumento ha fatto sì che lo si impiegasse presto anche per la valutazione comparativa di soluzioni progettuali per l'efficientamento energetico, declinate sia nell'ambito delle nuove costruzioni che in quello del miglioramento delle prestazioni degli edifici esistenti [289].

Nel contesto italiano, ciò si inserisce bene anche in considerazione del nuovo Codice dei contratti pubblici (D.lgs. 50/2016) [290], il quale, nell'ambito della fase di fattibilità tecnica ed economica, indica la necessità di procedere all'identificazione e all'analisi di possibili alternative progettuali da esplicitare in un apposito documento (il DOCFAP - documento di fattibilità delle alternative progettuali). In particolare, ciò che il legislatore richiede è specificato nel successivo "Schema di Decreto Ministeriale recante definizione dei contenuti della progettazione nei tre livelli progettuali ai sensi dell'articolo 23, comma 3 del decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50" [291], in cui si fa esplicito riferimento all'implementazione di metodologie valutative multi-criteriali, fondate su attributi di carattere ambientale, tecnico ed economico e definite sulla base di analisi costi-benefici [292]. Nel caso di interventi che abbiano a che fare con l'efficienza energetica, la metodologia cost-optimal soddisfa tutti i requisiti indicati dal Codice dei contratti pubblici per costituire uno strumento di riferimento atto alla valutazione comparata delle alternative progettuali in fase preliminare.

In ambito scientifico, l'impiego della metodologia cost-optimal si è diffuso rapidamente, producendo una serie di pubblicazioni che hanno utilizzato lo strumento per testare e confrontare grandi insiemi di soluzioni progettuali, aggregate a formare combinazioni di scenari trasformativi. La maggior parte degli studi rinvenuti si è occupato dell'analisi di edifici ad alta efficienza energetica, quali le costruzioni a energia quasi zero (nZEB - nearly Zero Energy Building), proponendo applicazioni sia nell'ambito della progettazione di nuovi edifici che nella riqualificazione di quelli esistenti [293].

In parallelo, alcune ricerche si sono dedicate all'applicazione a edifici di carattere storico [294, 295, 296], per i quali il focus principale si sposta dall'interesse spinto al risparmio energetico verso un'esigenza di bilancio fra riduzione dei consumi e conservazione degli elementi. In questi esempi, si rivolge grande attenzione alla scelta delle misure di efficientamento energetico ammissibili che possono essere comprese nel processo di calcolo. In generale, i criteri rinvenuti per la selezione degli interventi applicabili sono identificati con quelli del restauro architettonico e, per ciascun caso studio, si suggerisce di attenersi alla logica della valutazione caso per caso.

Su un altro frangente, dal punto di vista metodologico, alcuni studi si focalizzano sull'estensione della procedura, implementando algoritmi di ottimizzazione di natura stocastica per la riduzione dei tempi di calcolo nella soluzione di scenari caratterizzati da un numero elevato di alternative progettuali [297] o approfondendo il tema della connessione automatica fra software di simulazione energetica e procedure di ottimizzazione [298].

2.1. Procedura di calcolo

In seguito alla sua presentazione nella Direttiva 2010/31/EU, la procedura è stata dettagliata con l'emanazione del Regolamento Delegato (UE) N. 244/2012 [40] e dei relativi orientamenti di accompagnamento [299], che si sono occupati di specificare i meccanismi del metodo di calcolo. Va sottolineato che, nell'intenzione originale, non tutti gli elementi del calcolo sono esplicitati a livello Europeo, in quanto la metodologia punta a combinare regole comuni con dati che sono specificati a scala nazionale, così da assicurare un trattamento equo in considerazione delle caratteristiche individuali di ciascuno Stato Membro [284]. Per l'Italia, il documento che dettaglia la procedura nel contesto nazionale è stato emesso nel 2013 a cura dall'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) [300].

2.1.1. Dati input

Per quanto riguarda i dati in ingresso, poiché la metodologia coinvolge aspetti multidisciplinari, occorrono informazioni provenienti da diversi ambiti, spesso caratterizzate da forme di rappresentazione eterogenee. Volendo proporre una schematizzazione che agevoli la comprensione dei raggruppamenti disciplinari dei dati input necessari all'attivazione della metodologia cost-optimal, è possibile individuare quattro gruppi tematici, in cui classificare le informazioni da reperire per il funzionamento della procedura cost-optimal (Fig. 89):

- Dati sul sistema edificio-impianto: Caratteristiche dell'edificio sotto il profilo dimensionale e funzionale, proprietà dell'involucro termico e rendimenti dei sistemi impiantistici. Sono costituiti dall'insieme delle informazioni necessarie al calcolo dei fabbisogni energetici secondo le normative tecniche europee e nazionali. Nel caso di processi orientati all'interoperabilità, questi dati possono trovarsi incorporati in modelli informativi degli edifici;
- Dati climatici: Qualità dell'ambiente esterno e durata della stagione di riscaldamento/raffrescamento. Si tratta di dati a forte carattere locale, contenuti nelle normative tecniche nazionali o distribuiti da agenzie con competenze in ambito energetico;
- Dati economici: Periodo di calcolo, tasso di sconto, costo



Fig. 89. Classi di dati input per l'attivazione della metodologia cost-optimal.

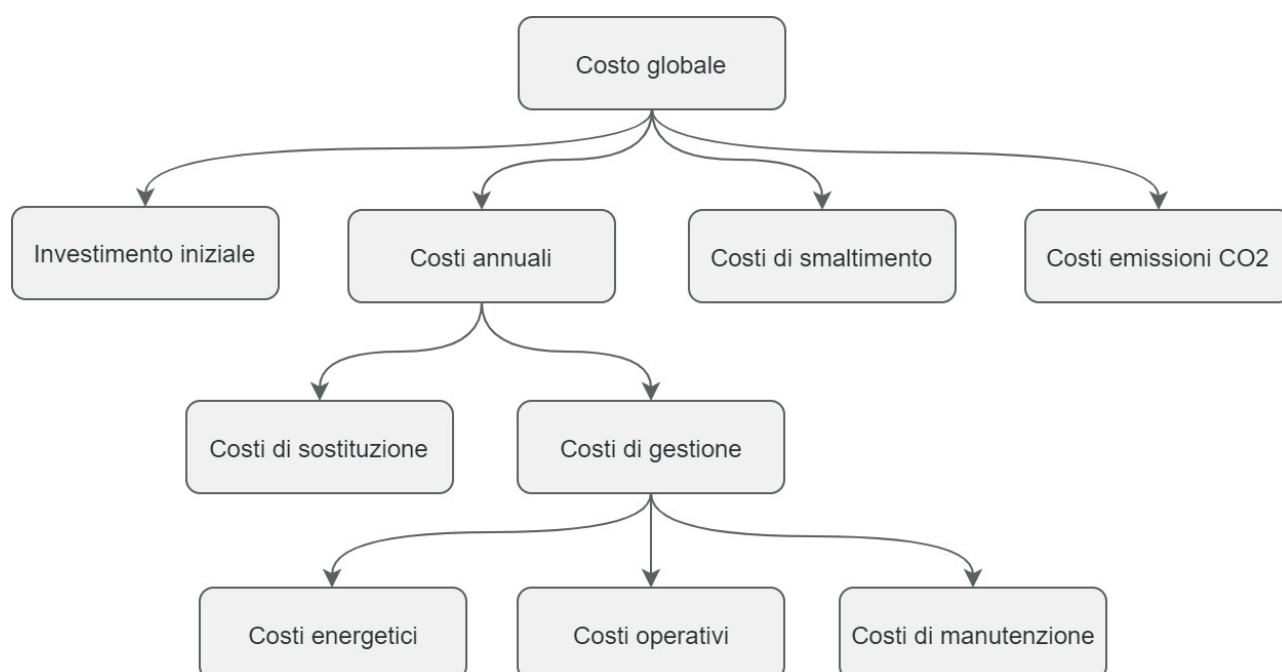
dei vettori energetici e relativo aggiornamento nell'orizzonte temporale considerato. Sono dati a valenza nazionale, la cui determinazione dei valori è demandata ai report dei singoli Stati membri;

- Dati sulle misure di efficientamento energetico: Caratteristiche economiche, energetiche e sul ciclo di vita delle soluzioni progettuali considerate. Tali informazioni sono generalmente confezionate in una lista di misure di efficientamento, che viene realizzata dal soggetto incaricato della valutazione, tuttavia, una traccia è presente nel documento di specificazione della metodologia per il contesto nazionale.

2.1.2. Stima economica

Il calcolo economico procede secondo la norma UNI EN 15459:2017 (Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici) [287], che conduce all'identificazione del Costo Globale delle misure di miglioramento energetico applicate agli edifici oggetto di studio. Poiché la metodologia assume uno scopo principalmente comparativo, non vengono presi in considerazione i flussi di cassa che compongono in generale le spese di gestione e manutenzione dei fabbricati, ma solamente quelli correlati agli elementi che influenzano l'efficienza energetica. Il calcolo punta, infatti, alla determinazione del Valore Attuale Netto (VAN) di ciascuna misura messa in atto allo scopo di migliorare la prestazione energetica degli edifici, ovvero alla stima della quotazione dell'investimento attualizzato all'istante iniziale del periodo di calcolo che si vuole simulare.

Fig. 90. Scomposizione delle voci di costo per la formazione del Costo Globale.



Con questa finalità, le voci di prezzo da considerare sono (Fig. 90):

- Investimento iniziale per la progettazione, l'acquisto del materiale, e la realizzazione degli interventi di efficientamento energetico;
- Costi annuali di manutenzione, relativi ai materiali coinvolti negli interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche, con riferimento ai valori tabellari espressi nell'allegato D dello standard UNI EN 15459:2017;
- Valore residuo della misura, calcolato per differenza in funzione del costo di investimento e della durabilità attesa, se la vita utile eccede il periodo di calcolo;
- Eventuale costo di sostituzione al termine della vita utile della misura, se questa è inferiore al periodo di calcolo, in relazione a quanto indicato all'allegato D dello standard UNI EN 15459:2017;
- Eventuali costi di smaltimento, associati al raggiungimento del termine della vita utile delle misure, secondo quanto riportato nell'allegato D dello standard UNI EN 15459:2017;
- Monetizzazione delle emissioni di CO₂, considerata solo nella prospettiva macroeconomica, nell'idea che il danno ambientale correlato al consumo energetico costituisca un costo diretto per le pubbliche amministrazioni;

Le voci sopra citate si compongono nella costruzione del Costo Globale secondo la formula:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j)R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

dove:

- τ è il periodo di calcolo in anni;
- $C_g(\tau)$ è il costo globale nell'arco del periodo di calcolo;
- C_I è il costo iniziale dell'investimento per la misura o l'insieme di misure j ;
- $C_{a,i}(j)$ è il costo annuale nell'anno i -esimo per la misura o l'insieme di misure j ;
- $C_{c,i}(j)$ è il costo delle emissioni di carbonio per la misura o l'insieme di misure j durante nell'anno i -esimo.
- $V_{f,\tau}(j)$ è il valore residuo della misura o dell'insieme di misure j alla fine del periodo di calcolo;
- $R_d(i)$ è il fattore di sconto per l'anno i -esimo sulla base del tasso di sconto r da calcolare con:

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^p$$

in cui p rappresenta il numero di anni a partire dal periodo iniziale e r rappresenta il tasso di sconto reale.

L'applicazione del processo di attualizzazione al calcolo del

Costo globale fa sì che tutti i flussi di cassa siano considerati come se avvenissero all'inizio dell'anno zero del periodo considerato, applicando un fattore di sconto ad ogni anno. Ciò rende particolarmente importante la scelta del tasso di sconto (r) da applicare al calcolo per simulare realisticamente l'andamento del mercato nel tempo. La determinazione dei tassi di sconto da impiegare nel calcolo macroeconomico viene affidata agli Stati membri, in funzione di un'analisi di sensibilità svolta su almeno due valori diversi, di cui uno imposto al 3 % in termini reali. A tal proposito, è importante sottolineare che tassi di attualizzazione bassi tendono a valorizzare gli investimenti di riqualificazione, in quanto valori minori attribuiscono maggior valore a flussi di cassa lontani nel tempo, come i costi energetici, riducendo così il peso relativo degli investimenti iniziali (Fig. 91) 300].

Nel bilancio complessivo, poi, giocano un ruolo importante anche i flussi di cassa legati all'approvvigionamento di energia, che vengono computati secondo le categorie:

- Costi energetici, legati al consumo di qualsiasi vettore energetico coinvolto nel condizionamento e nell'illuminazione degli ambienti, nella produzione di acqua calda sanitaria e nella movimentazione di cose e persone;
- Eventuali ricavi derivanti dalla vendita di energia elettrica prodotta in loco attraverso impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Per queste voci, l'attualizzazione avviene su un doppio binario che implica sia l'impiego del tasso e del fattore di sconto che l'applicazione di un aggiornamento dei prezzi determinato secondo stime sull'evoluzione del costo dei vettori energetici, che sono demandate ai singoli Stati membri.

2.1.3. Valutazione energetica

In ambito energetico, la valutazione avviene mediante il calcolo del fabbisogno globale annuo dell'edificio in termini di energia primaria e considera i contributi per riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria e movimentazione di persone e cose (solo per gli edifici ad uso pubblico). Il processo è attuato secondo lo standard internazionale EN 15603:2008 [285], che fornisce un flusso di lavoro per la redazione del calcolo (Fig. 92). Seguendo tale schema, a partire dalla stima dell'energia utile necessaria al soddisfacimento delle necessità dell'edificio (energy need), si procede a ritroso, incorporando gli apporti e le perdite di energia fino al raggiungimento del valore corrispondente all'energia primaria (primary energy). Nel contesto nazionale, per l'Italia la norma quadro viene ulteriormente specificata dalla serie di standard UNI/TS 11300, che si spartiscono gli ambiti di applicazione secondo quanto rappresentato in Fig. 93.

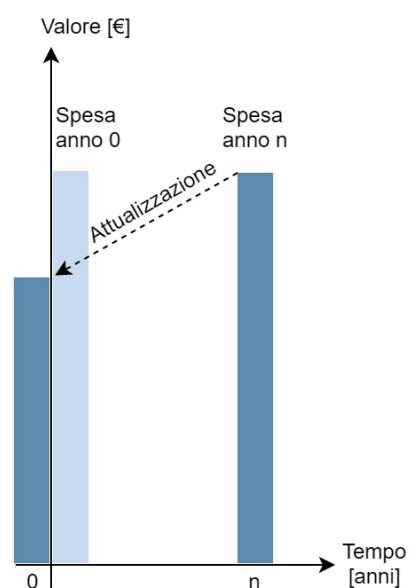


Fig. 91. Esempificazione del processo di attualizzazione per una spesa effettuata in un anno n-essimo e confronto con un'uscita equivalente in corrispondenza dell'anno 0.

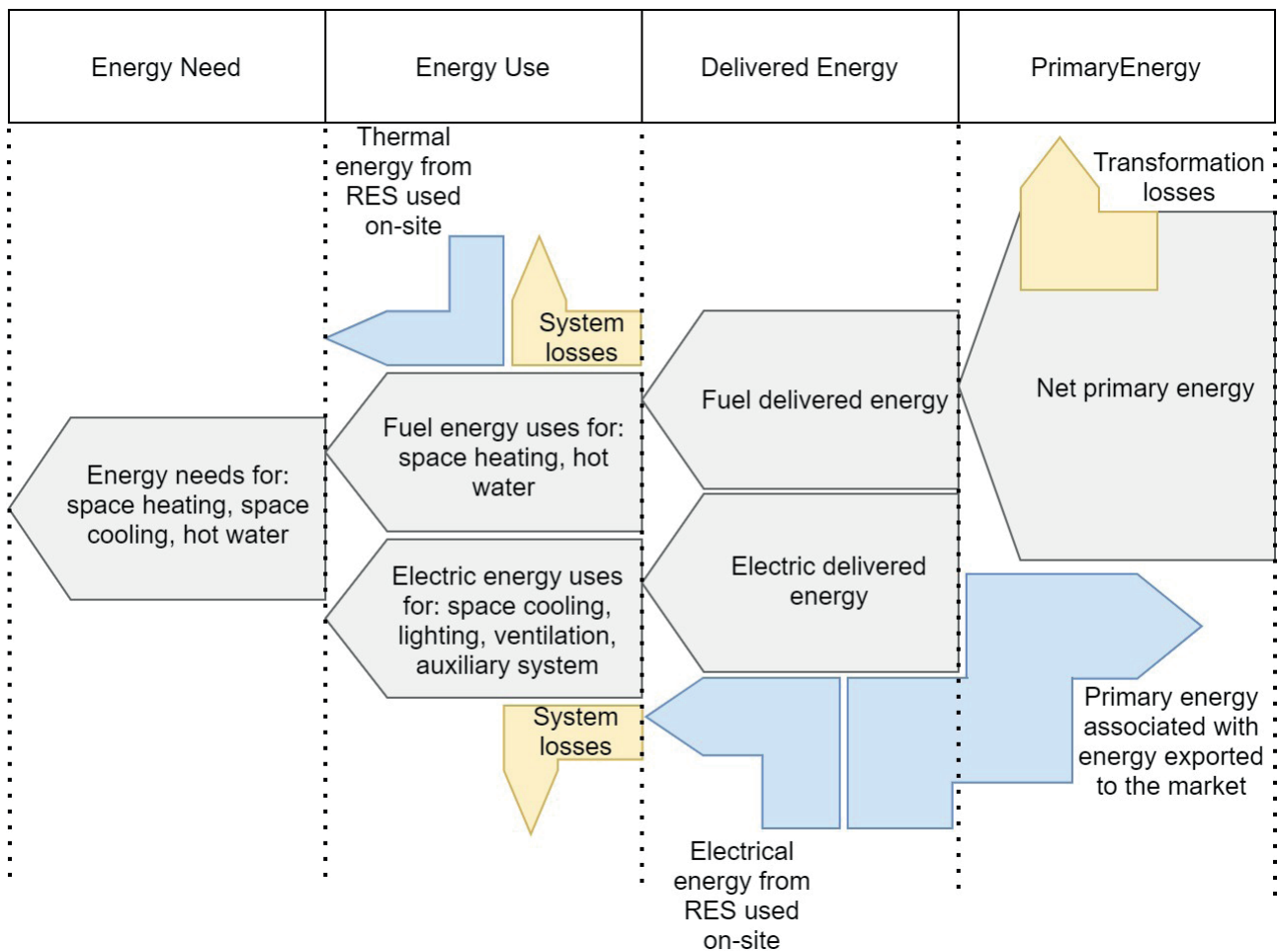


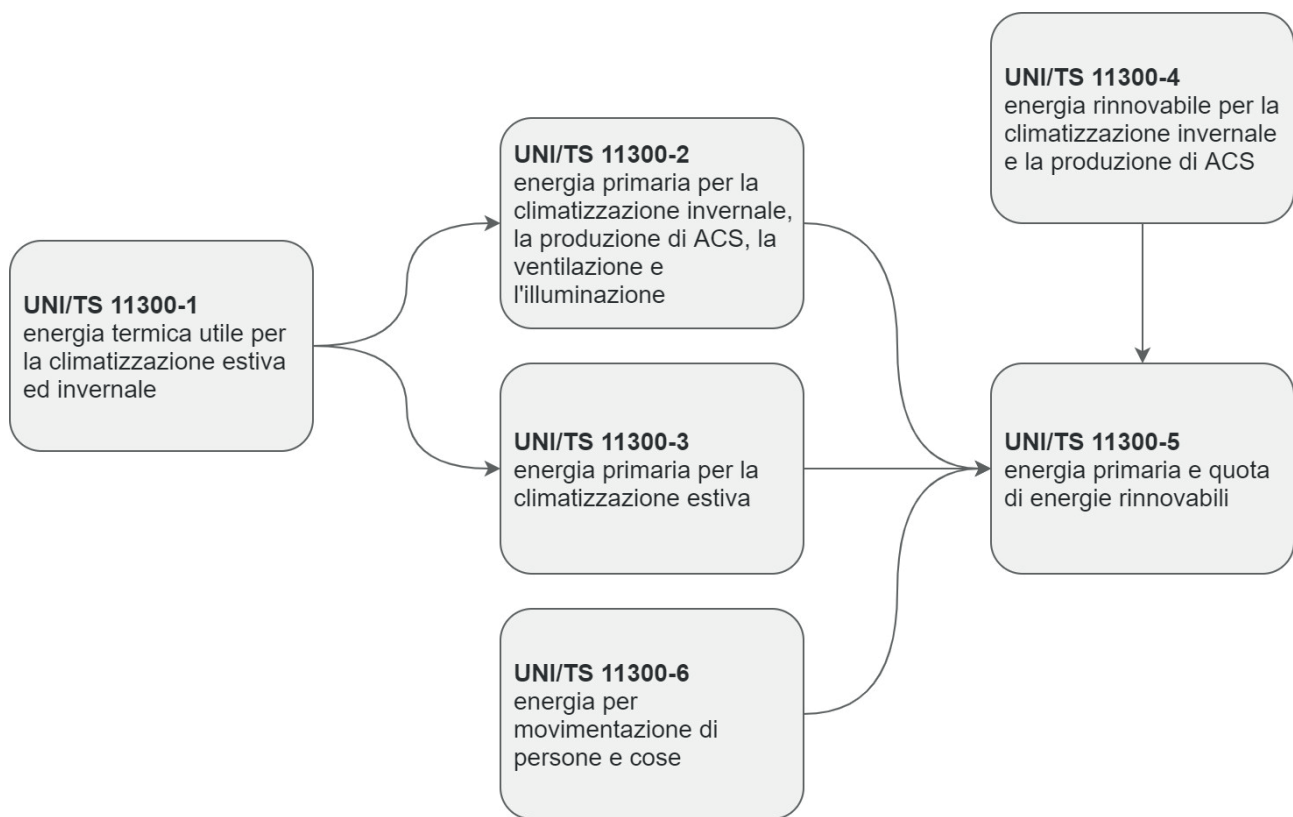
Fig. 92. Diagramma di flusso per la determinazione dell'energia primaria necessaria al funzionamento di un edificio. Rielaborazione da [299].

In relazione alla stima del fabbisogno energetico netto per il riscaldamento e il raffrescamento, il riferimento a livello internazionale è la norma tecnica EN ISO 13790:2008, che indica la possibilità di procedere secondo tre diverse modalità di calcolo, caratterizzate da accuratezza crescente:

- Metodo di calcolo quasi stazionario mensile;
- Metodo di calcolo dinamico orario semplificato;
- Procedure di calcolo per metodi di simulazione dinamica.

In coerenza con l'ambito di applicazione alle fasi preliminari del processo edilizio, si applica il primo metodo, ovvero un calcolo che integra per la durata dei periodi di condizionamento i dati medi rinvenuti su base mensile. Poiché si tratta di una procedura quasi stazionaria, gli effetti dinamici presenti nel comportamento energetico degli edifici vengono approssimati per mezzo di fattori di utilizzazione che intervengono sugli apporti e/o sulle dispersioni. Come indicato nella normativa che lo descrive, il calcolo si articola nelle seguenti fasi:

- Definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio;
- Definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richiesta;



- Definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
- Calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni ideali di energia termica per riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$);
- Calcolo della stagione di riscaldamento e di raffrescamento;
- Per i mesi estremi della stagione di riscaldamento e di raffrescamento, eventuale ricalcolo dei fabbisogni di energia sulle frazioni di mese comprese rispettivamente nelle stagioni di riscaldamento e di raffrescamento;
- Eventuale calcolo, per ogni mese o frazione di mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni di energia termica per umidificazione ($Q_{H,hum,nd}$) e per deumidificazione ($Q_{C,dhum,nd}$);
- Aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi e alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

In seguito alla determinazione del fabbisogno netto per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti dell'edificio, seguono le fasi che riguardano gli altri utilizzi dell'energia (ACS, illuminazione, ventilazione e movimentazione di persone e cose) e le caratteristiche dei sistemi impiantistici e dei vettori energetici che vengono impiegati nel processo, così da costruire il valore corrispondente al fabbisogno di energia primaria.

Fig. 93. Campi di applicazione delle norme tecniche della serie UNI/TS 11300.

2.1.4. Applicazione al contesto italiano

Come si è già avuto modo di discutere, le normative emanate a livello europeo per definire e dettagliare la procedura cost-optimal lasciano un discreto spazio di azione agli Stati membri, che sono chiamati a specificare ulteriormente la metodologia, in considerazione delle peculiarità dei contesti nazionali. Per l'Italia, la redazione di questo report è stata affidata all'ENEA, che nel 2013 ha pubblicato un documento dal titolo "Sviluppo della metodologia comparativa cost-optimal secondo Direttiva 2010/31/UE" [300]. Il rapporto si suddivide in quattro sezioni:

- A.1. Descrizione degli edifici di riferimento, in cui si individuano, con riferimento al progetto europeo TABULA, i modelli tipologici a cui applicare la metodologia, per la determinazione dei requisiti energetici minimi che verranno formalizzati nel Decreto interministeriale 26 giugno 2015;
- A.2. Strumenti di calcolo per l'applicazione della Cost Optimal Methodology al caso italiano, in cui si esplicita la metodologia di calcolo secondo la serie di standard nazionali UNI/TS 11300 e s definiscono i valori dei tassi di attualizzazione da utilizzare;
- A.3. Metodologia di ottimizzazione: descrizione e applicazione ad edifici di riferimento italiani, in cui si presenta una libreria di soluzioni di efficientamento energetico con le rispettive caratteristiche energetiche e di costo, classificate in funzione della tipologia edilizia e del periodo di costruzione degli edifici a cui possono essere applicate e si tratta dei costi legati ai vettori energetici più diffusi e della loro evoluzione nel tempo.
- A.4. La simulazione dinamica, in cui si tratta della possibilità di applicazione in abbinamento a metodi di calcolo svolti in regime dinamico.

Come appare evidente, nella presente ricerca hanno svolto un ruolo fondamentale i capitoli A.2 e A.3, che hanno consentito di estrapolare una serie di parametri economici per il calcolo, specificamente tarati sul mercato italiano. Tuttavia, vista la distanza temporale che già ci separa dal momento dell'emanazione del report di ENEA, nell'applicazione pratica è risultato necessario aggiornare le voci di prezzo, per renderle maggiormente realistiche in considerazione delle dinamiche del mercato attuale. Questa operazione è stata svolta con riferimento al manuale DEI (Tipografia del Genio Civile) "Recupero Ristrutturazione Manutenzione" [301] nell'edizione dell'ottobre 2018 per quanto riguarda gli elementi tecnici e consultando i database dell'Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambiente (ARERA) in relazione ai prezzi dei vettori energetici.

2.2. Metodo ERS/ES

La procedura cost-optimal permette la valutazione comparata

dell'effetto di numerose misure di riqualificazione energetica, tuttavia, ciò che risulta più interessante è la possibilità di analizzare le conseguenze dell'applicazione di gruppi di soluzioni tecniche, al fine di individuare sinergie vincenti. Nel Regolamento Delegato (UE) N. 244/2012, tale possibilità è contemplata e citata esplicitamente nel testo, che riporta: "le misure possono essere accorpate in pacchetti di misure o varianti", anche se a livello istituzionale non si arriva alla definizione di un metodo per l'aggregazione delle soluzioni elementari.

Al contrario, questo tema è stato affrontato dalla letteratura scientifica, in cui è possibile notare una convergenza verso una procedura univoca per il trattamento delle singole misure e per il loro accorpamento. In particolare, come è possibile leggere chiaramente nel contributo di Guazzi et al. [303], si tratta di un metodo di classificazione semplice ma determinante, che mette ordine nel processo distinguendo le soluzioni elementari (identificate univocamente dall'acronimo ERS - Energy Refurbishment Solution - seguito da un numero progressivo), dagli scenari aggregati, composti dalla combinazione di ERS (determinati con dalla sigla ES - Energy Scenario - anch'essa seguita da un numero crescente). Naturalmente, seguendo studi guidati da diversi gruppi di ricerca, è possibile riscontrare variazioni nella nomenclatura dei due casi, la più diffusa delle quali riporta l'acronimo EEM (Energy Efficiency Measure) per l'individuazione delle misure elementari di efficientamento, proponendo, così, una definizione che si adatta bene sia alle analisi per la riqualificazione energetica [304] che a quelle applicate ai nuovi edifici [305]. Tuttavia, la scelta del nome, e quindi dell'acronimo corrispondente, non muta l'obiettivo della classificazione, che intende differenziare nettamente le soluzioni progettuali costituite da un'unica misura elementare di efficientamento energetico da quelle che vedono aggregati più interventi. Tale operazione, infatti, oltre a determinare uno svolgimento più esplicito e tracciabile del processo, consente di formulare ragionamenti preliminari in relazione all'effetto delle singole operazioni e di comprendere più efficacemente le interdipendenze positive e negative che sussistono fra le misure quando esse vengono applicate simultaneamente.

3. Applicazione al progetto

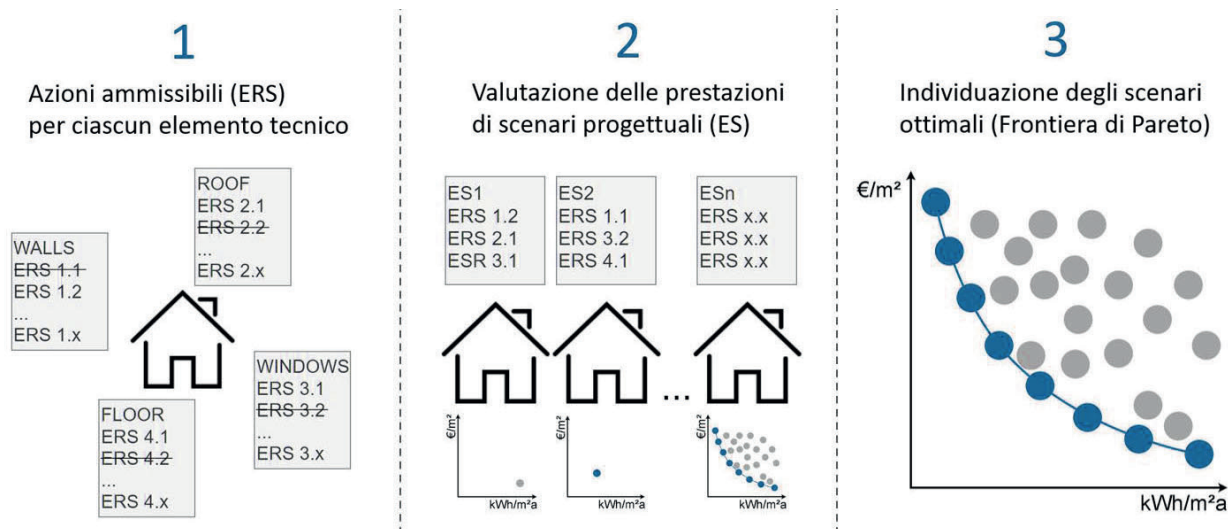
L'applicazione della metodologia di supporto alla decisione costituisce l'ultimo tassello di una lunga filiera di strumenti interoperabili, finalizzati alla conoscenza e alla comunicazione del comportamento energetico di edifici singoli e di loro raggruppamenti. Mettendo insieme quanto trattato ai capitoli precedenti, in particolare con riferimento alla lettura tecnologica dell'organismo edilizio e al metodo ERS/ES, lo svolgimento della metodologia cost-optimal può essere schematizzato secondo tre fasi principali (Fig. 94):

Fase 1: Individuazione delle soluzioni elementari (ERS) ammissibili per ciascun elemento tecnico

A partire da un catalogo di misure di efficientamento, dettagliate per quanto riguarda gli aspetti energetici, economici e su ciclo di vita, occorre selezionare preliminarmente quelle ritenute idonee all'applicazione specifica che si sta progettando. In particolare, si tratta di comprendere quali interventi siano ammissibili in relazione alle caratteristiche di gruppi di elementi tecnici omogenei per proprietà energetiche o formali. La decisione in merito all'applicabilità deve essere presa sulla base di ragionamenti multidisciplinari, che tengano in considerazione le opportunità e i vincoli di trasformazione legati alle entità che costituiscono l'edificio.

A tal proposito, il tema del giudizio in merito alla trasformabilità degli organismi edilizi esistenti è ampiamente dibattuto dalla comunità scientifica e costituisce tuttora un problema aperto, in particolar modo quando viene riferito al caso di fabbricati dal connotato valore storico/culturale. Nello specifico, gli studi che hanno affrontato la questione dell'efficientamento energetico degli edifici storici da un punto di vista applicativo, riportano tre approcci al problema, come evidenziato dalla

Fig. 94. Sviluppo complessivo della metodologia cost-optimal, con riferimento al metodo ERS/ES.



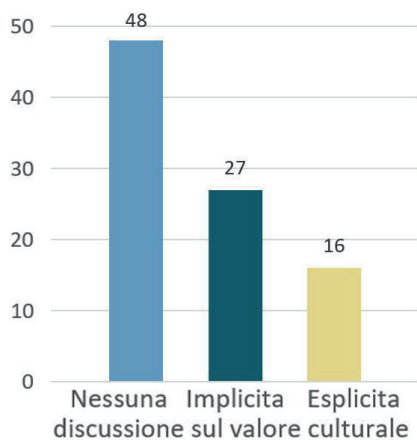


Fig. 95. Numero di articoli che trattano dell'efficientamento energetico degli edifici storici senza nessuna discussione in merito alla trasformabilità o con discussioni implicite o esplicite sull'influenza del valore culturale nell'azione trasformativa. Rielaborazione da [306].

review proposta da Lidelöw et al. [306]. Dei quasi cento articoli analizzati nel periodo 2005-2016 gli autori distinguono fra quelli che non hanno affrontato il tema del giudizio di trasformabilità e quelli che lo hanno trattato in modo implicito, ad esempio facendo ricorso a principi stabiliti a priori, o in modo esplicito, proponendo approcci di valutazione approfonditi, notando che le analisi più dettagliate sono le più rare. Nel terzo gruppo, che risulta il meno diffuso (Fig. 95), alcune ricerche sono giunte alla definizione di quadri metodologici e di sistemi analitici orientati a una soluzione deterministica del problema [307], che viene sviluppato mediante l'utilizzo di sistemi di supporto alla decisione multicriteriali basati su attributi qualitativi [308, 309]. Tuttavia, nonostante tali procedure possano dimostrarsi utili in applicazioni specifiche, il dialogo è ancora in atto e, allo stato attuale, non si è giunti alla definizione di una strategia che possa ritenersi standardizzata e normativa. Nel panorama complessivo, occorre anche sottolineare che alcuni autori ritengono non sia possibile formalizzare un approccio univoco e che l'unica via attuabile sia quella di procedere mediante valutazioni soggettive valide "caso per caso", basate sulle competenze culturali, sociali e tecniche dei soggetti attivi nel processo [310, 311]. In definitiva, si ritiene che l'implementazione di un metodo analitico per il supporto alla decisione nell'ambito del giudizio di trasformabilità alla presente ricerca sarebbe rischioso e difficilmente giustificabile, considerando anche che lo scenario di attuazione è quello delle fasi preliminari del processo edilizio, e si preferisce procedere con un approccio non deterministico, fondato sull'esperienza professionale degli attori coinvolti.

Fase 2: Applicazione della metodologia cost-optimal e simulazione degli scenari progettuali (ES)

In seguito all'individuazione delle misure elementari ammissibili in riferimento all'edificio oggetto di studio, è possibile dare avvio alla simulazione numerica. Innanzitutto, questa si occupa di comporre gli scenari progettuali, aggregando le ERS in raggruppamenti coerenti, in cui non compaiano operazioni ritenute fra loro incompatibili, quali, ad esempio, quelle che insistono sugli stessi componenti edilizi. Successivamente, gli scenari vengono applicati agli elementi tecnici che costituiscono il sistema edificio-impianto, simulando una trasformazione che ne modifica le caratteristiche. Per ciascuno scenario progettuale, l'analisi porta all'identificazione di una coppia di valori, che rappresenta le sue prestazioni in termini economici ed energetici. Ogni risultato così determinato, va a costituire un punto nel grafico cartesiano Fabbisogno energetico-Costo globale, componendo progressivamente una nuvola di punti più o meno densa che permette di visualizzare lo spazio delle possibili soluzioni, comprendendo le relazioni che intercorrono tra di esse.

Nel caso presente, procedendo per gradi al fine di agevolare la comprensione degli eventi e permettere una più interessante formulazione di considerazioni, si è scelto di mantenere separata la soluzione del problema allo stato di fatto, che determina il punto di origine da cui misurare gli effetti delle strategie progettuali, dall'applicazione delle singole misure di efficientamento (ERS) e degli scenari energetici composti (ES).

Per analisi che coinvolgono un numero ragionevolmente basso di ES, è possibile procedere con un calcolo di tipo deterministico, che esegue la valutazione energetica ed economica di ogni scenario e restituisce una quantità di punti corrispondente. Tuttavia, all'aumentare delle ERS, o nel caso in cui si vogliano eseguire simulazioni che coinvolgono più edifici contemporaneamente, è necessario introdurre nella procedura di calcolo algoritmi di ottimizzazione, capaci di ridurre l'onere di calcolo individuando lo spazio delle soluzioni ottimali mediante approcci euristici.

In letteratura, è possibile individuare numerosi studi che fanno uso di algoritmi di ottimizzazione per la soluzione di problemi di supporto alla decisione multicriteriali e, fra le varie possibilità offerte dagli strumenti matematici, gli algoritmi genetici risultano quelli più spesso implementati nel caso di metodi di ottimizzazione basati sulla simulazione e applicati all'analisi delle prestazioni dell'edificio [276]. Si tratta della tipologia più semplice degli algoritmi evolutivi [312], che si basano sulla modellazione matematica della teoria dell'evoluzione, costruendo generazioni di soluzioni progressivamente migliori sulla base della combinazione degli elementi di una popolazione generata casualmente all'inizio del processo.

Fase 3: Identificazione degli scenari ottimali attraverso l'analisi del grafico Fabbisogno energetico-Costo globale e l'individuazione della Frontiera di Pareto.

Al termine dell'analisi numerica, l'output è costituito da un elenco di punti di lunghezza minore o uguale al numero di ES che sono stati simulati, a seconda che sia stato impiegato un metodo di calcolo deterministico o euristico. Nel grafico cartesiano si viene così a costituire una nuvola di punti più o meno densa, che rappresenta le prestazioni delle soluzioni, poste in relazione fra loro. Come si è già avuto modo di sottolineare, allo stato finale della simulazione, i due criteri sono ancora considerati equivalenti sotto il profilo dell'importanza, ovvero non sono state avanzate considerazioni in merito alla prioritizzazione degli attributi, né sono stati posti vincoli in termini di obiettivi minimi o di risorse economiche. La tipologia di strumenti scelti, infatti, lascia volutamente spazio in quest'ultima fase al processo decisionale vero e proprio, fornendo come strumento di supporto il grafico stesso, a partire dal quale è possibile sviluppare diversi tipi di considerazioni.

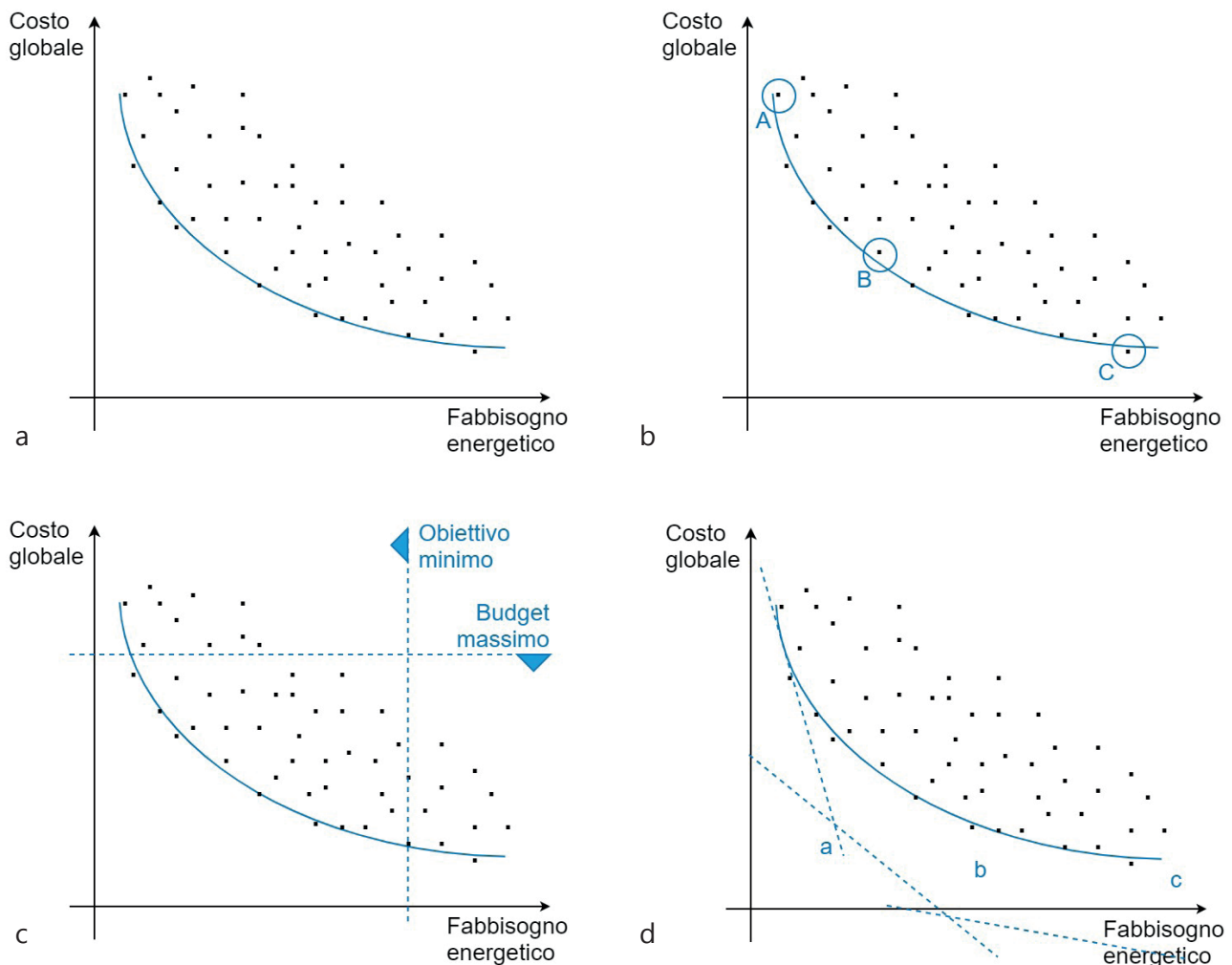


Fig. 96. Rappresentazione schematiche di un possibile risultato della procedura cost-optimal e proposta di lettura critica del grafico.

Ponendo di ottenere il risultato schematizzato in Fig. 96.a, è possibile individuare graficamente o per interpolazione la Frontiera di Pareto, in prossimità della quale sono presenti le soluzioni parimenti ottimali sotto il profilo dei costi in termini energetici ed economici. In funzione della definizione del problema, che vede competere due obiettivi contrapposti, è comune riscontrare una distribuzione analoga a quella presentata in figura, che evidenzia come a prestazioni migliori sono solitamente associati costi maggiori e viceversa. Naturalmente, ciò non può dirsi valido in assoluto, ma risulta quantomeno legato a due considerazioni:

- Le caratteristiche del mercato in cui ci troviamo ad affrontare il calcolo, ovvero lo stato di avanzamento tecnologico e i parametri economici correlati, che potrebbero mutare anche sensibilmente in futuro;
- La lunghezza del periodo in cui avviene la simulazione, che, secondo normativa, va calcolata su un lasso di tempo relativamente breve, entro il quale non è scontato riuscire ad ammortizzare i costi di investimento iniziale degli interventi di riqualificazione energetica.

La lettura critica del grafico può cominciare dall'individuazione di tre punti singolari, ovvero le soluzioni localizzate all'estremità e al centro della Frontiera di Pareto (Fig. 96.b). Com'è facile intuire, in corrispondenza del punto A si trova il risultato che determina il maggior costo globale e il minor fabbisogno energetico, ovvero quello scenario progettuale che dà assoluta precedenza al criterio energetico su quello economico. Analogamente, al punto C, è collocata la soluzione associata al minor costo globale e al maggior consumo di risorse, ossia quella che massimizza l'efficienza dell'attributo economico, a scapito di quello energetico. Infine, il punto identificato con la lettera B rappresenta uno scenario che bilancia quasi perfettamente le esigenze legate al risparmio energetico con quelle di contenimento dei costi di gestione, ovvero la soluzione che risulterebbe ottimale se si decretasse l'equivalenza dei pesi dei due criteri. Le soluzioni determinate in corrispondenza dei punti A, B e C non sono necessariamente le migliori, ma conoscerle costituisce un buon punto di partenza per attivare una discussione finalizzata alla decisione.

In seconda istanza, se lo spettro delle soluzioni è troppo ampio, arrivando a rappresentare situazioni che possono essere identificate fin da subito come inaccettabili, è possibile ritagliare lo spazio del grafico, definendo dei limiti, che vengono identificati da linee orizzontali e verticali sul piano cartesiano (Fig. 96.c). Nello sviluppo delle analisi, infatti, è frequente trovarsi nella situazione di introdurre vincoli in relazione al budget massimo di progetto oppure, al contrario, può accadere di porsi obiettivi minimi sul fronte energetico, fissando una soglia massima di fabbisogno. Una volta riproporzionata l'area del grafico, secondo quanto soddisfa i criteri del progetto, è possibile riconoscere nuovamente i punti estremi A e C e il punto medio B, le cui posizioni potranno essere variate rispetto allo step precedente. Come appare scontato, la determinazione dei vincoli del progetto può essere attuata con gli stessi risultati anche in una fase che precede il calcolo, escludendo a priori l'identificazione di soluzioni non conformi. Tuttavia, si ritiene che una presa di coscienza in relazione allo spettro complessivo delle possibilità resti utile al fine di sviluppare un processo decisionale più consapevole e informato.

In ultima, è possibile svolgere una considerazione in merito all'andamento della curva di Pareto, che può essere generalmente suddivisa in tre settori in funzione della giacenza delle sue rette tangente. Dal punto di vista della variazione dei valori dei due criteri, infatti, percorrere la stessa distanza lungo la Frontiera di Pareto non è sempre indifferente (Fig. 96.d). Nella parte alta della curva, dove la retta tangente è molto ripida, accade che a variazioni significative del Costo Globale corrispondano piccole alterazioni del comportamento energetico. Più al centro, dove

il coefficiente angolare della retta tangente si attesta intorno al valore -1, si assiste a mutamenti che sono omogenei sotto il profilo dei costi in termini economici ed energetici, mentre nella parte terminale della curva, dove la retta tangente si approssima all'orizzontale, piccole variazioni del Costo Globale possono determinare grandi effetti sul fronte del fabbisogno energetico. Ciò risulta coerente con quanto emerge dalla pratica progettuale, ovvero che per migliorare, anche significativamente, prestazioni energetiche di basso livello occorrono piccoli sforzi economici, ma, al contrario, per incrementare ulteriormente prestazioni che sono già alte è necessario disporre di importanti risorse economiche.

L'insieme degli strumenti di lettura critica del grafico appena presentati non porta a compimento il processo decisionale attraverso l'individuazione inequivocabile della soluzione da preferire, ma stimola un dialogo tra le parti coinvolte al fine di identificare l'ottimo compromesso fra i criteri che determinano il problema [313], in considerazione della rosa di possibilità che il contesto ammette, alla luce di un insieme di condizioni sia quantitative che qualitative che possono spaziare al di fuori dei limiti dell'analisi numerica.

3.1. Inserimento nel processo

Perché l'introduzione del modulo di decision-making risulti proficuo, si deve porre in continuità nei confronti del processo già delineato, senza infrangerne i principi fondamentali e rispondendo adeguatamente al sistema di requisiti già discusso. In questa direzione, è quindi di primaria importanza assicurarsi che tutti i dati utili alla simulazione provengano dal database informativo, così da completare il flusso di lavoro facendo uso delle informazioni armonizzate e coerenti, che sono già state organizzate all'interno di un unico sistema informativo. Al fine di raggiungere questo scopo, occorre completare quanto sviluppato fin qui attraverso tre operazioni, che agiscono in relazione all'integrazione, all'estrazione e all'elaborazione dei dati (Fig. 97).

3.1.1. Limiti e applicabilità

La metodologia cost-optimal prevede una valutazione onnicomprensiva del comportamento energetico del sistema edificio impianto, che include tutti gli usi finali dell'energia (riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione, ventilazione, movimentazione di persone e cose). Questa tipologia di calcolo è molto onerosa e richiede l'impiego di parametri che sono difficilmente reperibili nelle fasi preliminari dei processi edilizi. Per questo motivo, nell'esperienza qui presentata il processo di calcolo

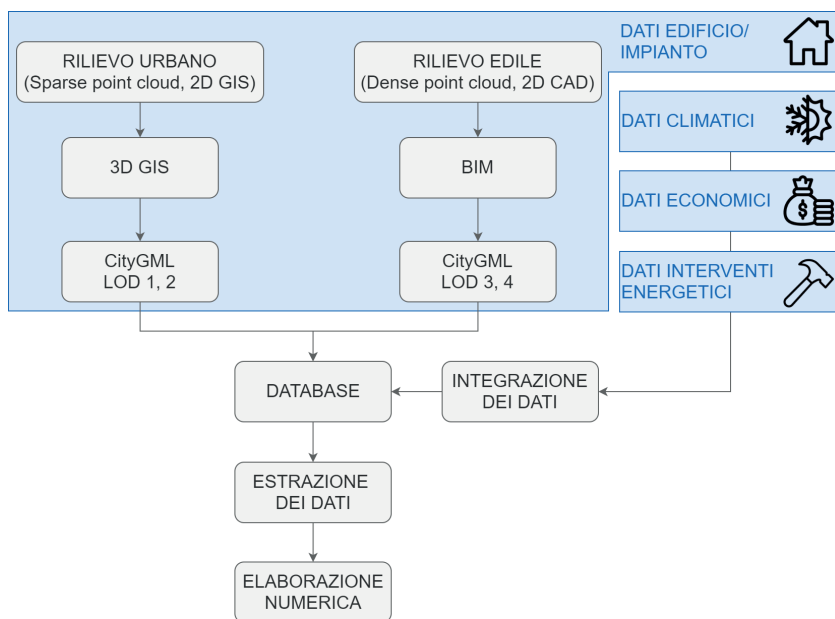


Fig. 97. Integrazione del flusso di lavoro con aggiunta del modulo di supporto alla decisione.

viene sviluppato solo in parte, giungendo alla determinazione del contributo energetico necessario per il condizionamento invernale degli ambienti. In particolare, la procedura qui implementata porta all'individuazione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento $Q_{p,H}$ [kWh], che viene derivato dal fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ [kWh], in considerazione del rendimento medio stagionale dell'impianto di riscaldamento η_g . A propria volta, il valore di $Q_{H,nd}$ è composto dalla somma delle dispersioni di scambio termico per trasmissione ($Q_{H,tr}$) e ventilazione ($Q_{H,ve}$) a cui vengono sottratti gli apporti termici interni (Q_{int}) e solari (Q_{sol}), pesati sulla base del fattore di utilizzazione ($\eta_{H,gn}$) (Fig. 98).

La semplificazione, sebbene importante, non intacca in alcun modo l'approccio metodologico al problema, ma comporta una minore necessità di dati in ingresso e una riduzione dell'onere di calcolo, permettendo così una riduzione di complessità nella redazione dello script di programmazione per l'elaborazione numerica. Tuttavia, i risultati ottenuti restano validi e determinanti al fine di valutare e confrontare gli effetti di interventi sul sistema edificio-impianto per quanto riguarda il contenimento dei consumi energetici in relazione alla stagione invernale. In aggiunta, va considerato che al momento attuale resta strategica la scelta di concentrare le risorse sulla riduzione del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento in quanto, secondo uno studio pubblicato nell'ambito del progetto europeo iNSPiRe [314], allo stato presente il condizionamento invernale risulta l'uso finale dell'energia più critico in relazione al contesto comunitario, a prescindere dalla destinazione d'uso dei fabbricati civili (Tab. 28).

In ultima, per il caso studio selezionato, il riferimento al fabbisogno globale di energia primaria per il riscaldamento

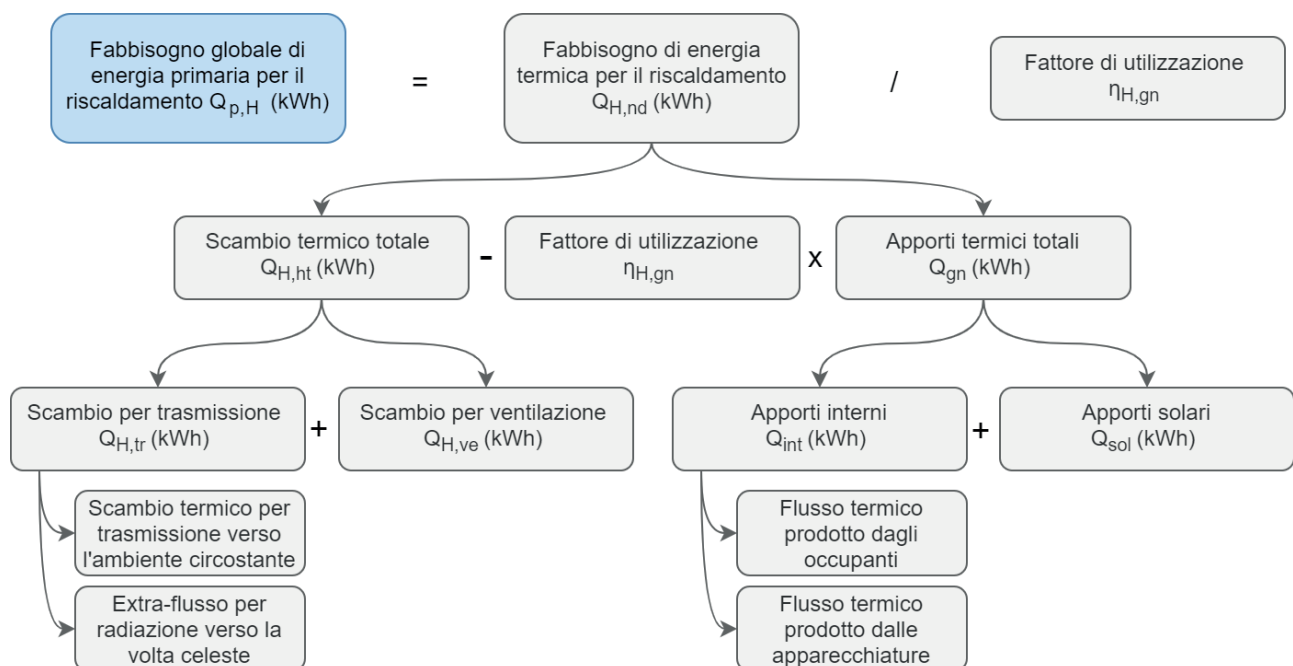


Fig. 98. Schema di calcolo per la determinazione del fabbisogno globale di energia primaria per il riscaldamento, in rosso.

consente di confrontare i risultati analitici con i dati sui consumi effettivi raccolti mediante le bollette e con le analisi svolte nell'ambito degli audit energetici sui fabbricati oggetto di studio.

3.1.2. Integrazione dei dati

Ripercorrendo le quattro categorie di dati necessari all'utilizzo della metodologia cost-optimal (Dati sul sistema edificio-impianto, Dati climatici, Dati economici e Dati sulle misure di efficientamento energetico), è facile notare che non tutte risultano disponibili allo stato di sviluppo della base di dati a cui ci si è arrestati al termine della parte precedente. Infatti, tutto quanto derivato dal modello CityGML, in considerazione sia dei livelli di dettaglio che dell'ADE dedicata al tema della riqualificazione energetica, è sufficiente a delineare le caratteristiche dell'edificio, ma non comprende le informazioni non direttamente correlate agli organismi edilizi, ma comunque indispensabili all'attivazione della procedura di simulazione economica ed energetica su cui si basa lo strumento di supporto alla decisione. E', quindi, necessario progettare nuove tabelle del database, che vengono definite al di fuori del modello CityGML, ma che sono in grado di comunicare con esso attraverso la definizione di relazioni fra gli oggetti.

Tab. 28. Consumi energetici per uso finale in Europa, edifici residenziali e uffici. Rielaborazione da [314].

USO FINALE	EDIFICI RESIDENZIALI		UFFICI	
	CONSUMO SPECIFICO	CONSUMO TOTALE	CONSUMO SPECIFICO	CONSUMO TOTALE
	kWh/m2a	TWh/a	kWh/m2a	TWh/a
Riscaldamento	152	2299	161	159
Raffrescamento	16	26	10	7
ACS	26	459	22	18
Illuminazione	5	97	39	42

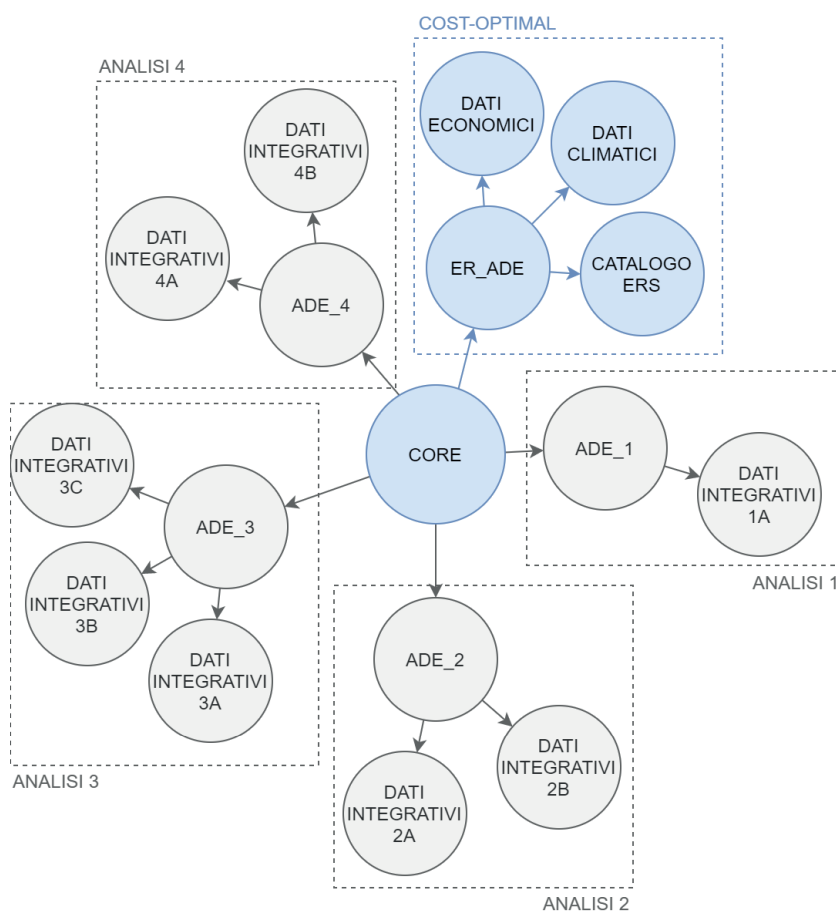


Fig. 99. Schema modulare del sistema informativo, in centro il Core con le informazioni sugli edifici derivate dal modello CityGML, nel primo anello lo sviluppo di possibili ADE e nello strato più esterno la presenza di eventuali set di dati integrativi. In azzurro la struttura del database che conduce all'attivazione della metodologia cost-optimal.

Con questa operazione si concretizza ulteriormente la volontà di proporre un approccio modulare, in cui le informazioni definite a diverse scale di dettaglio sugli asset immobiliari restano inalterate al centro del sistema informativo e possono essere additate per mezzo di estensioni dello schema ben codificate, le Application Domain Extension, mentre, a un livello più esterno e meno rigido, vengono definiti ulteriori nuclei informativi, contenenti informazioni di supporto finalizzate allo svolgimento di analisi o simulazioni specifiche (Fig. 99).

Nel caso presente, i dati integrativi devono rispecchiare tre aree tematiche: Dati climatici, Dati economici e Dati sulle misure di efficientamento energetico. La strutturazione delle informazioni sulle prime due è piuttosto elementare, in quanto prevede la riproposizione di dati che si trovano nativamente in forma tabellare, e si attua mettendo insieme i dati input necessari allo svolgimento della metodologia cost-optimal a partire dagli strumenti normativi.

Per quanto riguarda i dati climatici, l'utilizzo del metodo di calcolo mensile quasi-stazionario richiede l'esplicitazione di una serie di grandezze che è possibile raccogliere in tre tabelle:

- Dati mensili (Tab. 29): Si tratta delle temperature medie mensili e della durata del periodo di esercizio degli impianti termici,

Tab. 29. Tabella integrativa del database per la raccolta dei dati climatici, da utilizzarsi con il metodo di calcolo mensile quasi stazionario.

Monthly_data		
id	varchar(50)	primary key
month	varchar(20)	
t_mean	real	
day_heating	int	

Tab. 30. Tabella integrativa del database per la raccolta dei dati economici per il calcolo del Costo Globale.

Economic_data		
id	varchar(50)	primary key
description	varchar(100)	
value	real	
measure_unit	varchar(10)	

come indicato nel D.P.R. n. 412/1993 in relazione alle Zone Climatiche in cui è suddiviso il territorio nazionale;

- Fattori di ombreggiatura: Sono i fattori di correzione degli apporti solari relativi ad ostruzioni esterne (Fhor), ad aggetti orizzontali (Fov) e verticali (Ffin), variano a seconda dalla latitudine, dall'orientamento dell'elemento ombreggiato, dal clima, dal periodo considerato e dalle caratteristiche geometriche degli elementi ombreggianti, secondo quanto indicato dalla UNI TS 11300-1, che li raccoglie in una serie di tabelle in appendice;
- Radiazione solare media mensile: Per il calcolo degli apporti solari, si tratta di dati tabulari sull'irradianza solare media mensile, incidente sulle superfici in relazione all'orientamento e all'angolo di inclinazione sul piano orizzontale.

I dati economici per il calcolo del Costo Globale risultano, invece, più eterogenei e vengono raccolti in una tabella dalla forma piuttosto generale, che permette l'inserimento di una serie di record identificati da una descrizione, associata al valore e all'unità di misura corrispondenti (Tab. 30). Nello specifico, occorre individuare:

- Lunghezza del periodo di calcolo [anni];
- Tasso di attualizzazione [/];
- Costo unitario di ciascun vettore energetico coinvolto nel calcolo [€/kWh];
- Tasso di crescita annuale del costo unitario per ciascun vettore energetico coinvolto nel calcolo [/];
- Monetizzazione delle emissioni di CO₂ per ciascun vettore energetico coinvolto nel calcolo [€/kWh].
- Infine, il passaggio più articolato riguarda la definizione del contenitore di informazioni sulle misure di efficientamento energetico, in quanto a monte è richiesta la formazione di un Catalogo delle ERS, ovvero di una lista di interventi elementari che possono essere applicati agli elementi tecnici degli organismi edilizi per migliorarne le prestazioni energetiche (Tab. 31). Ciascuna di esse va individuata e dettagliata per mezzo di una serie di parametri che afferiscono a tre categorie tematiche:
- Inquadramento: identificazione della strategia (gml_id,

ERS		
id	varchar(50)	primary key
group	int	
number	int	
technical_element	varchar(20)	
position	varchar(10)	
description	varchar(100)	
material	varchar(20)	
conductivity	real	
thickness	real	
transmittance_w	real	
solar_factor	real	
emissivity	real	
efficiency	real	
unit_cost	real	
lifespan	int	
maintenance_cost	real	
disposal_cost	real	

Tab. 31. Tabella integrativa del database contenente il catalogo delle ERS.

description, material, thickness) e riferimento all'elemento tecnico a cui si riferisce (tec_element, omniclass_code, position);

- Caratteristiche energetiche: dettaglio del comportamento energetico delle soluzioni, differenziato per le componenti opache (conductivity, emissivity), le superfici vetrate (transmittance_w, solar_factor) e gli elementi del sistema impiantistico (efficiency);
- Caratteristiche economiche: proprietà collegate al ciclo di vita dei componenti coinvolti nella misura di riqualificazione (lifespan, unit_cost, maintenance_cost, disposal_cost).

Per la costruzione dell'elenco, ci si è riferiti primariamente al documento pubblicato da ENEA per l'applicazione della metodologia cost-optimal al contesto italiano [300], integrando ed aggiornando le soluzioni proposte secondo il prezzario dedicato alle opere di recupero, ristrutturazione e manutenzione edito dalla Tipografia del Genio Civile, nella sua edizione dell'ottobre 2018 [301].

3.1.3. Estrazione dei dati

Con l'integrazione degli ultimi set informativi, il database contiene tutte i dati necessari allo svolgimento della metodologia cost-optimal, ovvero alla simulazione energetica ed economica degli scenari progettuali sul ciclo di vita individuato. Tuttavia, la fase computazionale vera e propria avviene per mezzo di applicativi esterni alla piattaforma di gestione del database, ed è quindi necessario procedere all'estrazione dei dati, in riferimento ai requisiti che impone il motore di calcolo. Nell'esperienza qui presentata, per l'elaborazione numerica viene utilizzato

SDF	
id	
technical_element	
area	A
transmittance	U
solar_factor	g
emissivity	ϵ
absorption	α
shading_reduction	$F_{sh,gl}$
tb_correction	
exposition	
shading_angle_hor	α_{hor}
shading_angle_ov	α_{ov}
shading_angle_fin	α_{fin}
shading_factor_hor	F_{hor}
shading_factor_ov	F_{ov}
shading_factor_fin	F_{fin}
adj_correction	
adj_temperature	
distribution_efficiency	η_d
emission_efficiency	η_e
generator_efficiency	η_g
regulation_efficiency	η_r

Tab. 32. Parametri che specificano le caratteristiche degli elementi tecnici dell'edificio allo Stato di Fatto.

il software MathWorks Matlab R2019a, per il quale occorre formattare i dati ingresso secondo matrici numeriche, che possono essere richiamate in qualsiasi punto del codice per mezzo di un identificativo univoco.

Il passaggio dal DBMS all'ambiente di simulazione si svolge attraverso l'uso del linguaggio SQL ed avviene concettualmente in due fasi, ovvero l'esportazione delle informazioni dal database e l'importazione delle stesse nel programma di calcolo. Tuttavia, per ottimizzare il flusso di lavoro, si è scelto di impiegare un'applicazione aggiuntiva per Matlab (Database Explorer), che consente l'attivazione di link diretti con i database, permettendo l'accesso diretto ai dati per mezzo di una finestra di interrogazione SQL. In questo modo è possibile formattare e convogliare le variabili nello spazio di lavoro dell'ambiente di calcolo, senza dover coinvolgere un software terzo o convertire le informazioni in un ulteriore modello dati.

Per il modo in cui è stato sviluppato l'intero script di calcolo, di cui si avrà modo di discutere dettagliatamente nel seguito, i dati input necessari possono essere raggruppati in cinque matrici:

- Dati climatici: Matrice contenente le temperature medie mensili e il numero di giorni che costituiscono il periodo di riscaldamento;
- Dati economici: Matrice contenente le indicazioni sul periodo di calcolo, sul tasso di attualizzazione, sui costi dell'energia con i rispettivi tassi di aggiornamento e sulla monetizzazione delle emissioni di anidride carbonica;
- Dati edificio: Matrice contenente i valori della superficie e del volume riscaldato e dei codici numerici identificativi del tipo di costruzione, della classe occupazionale e della destinazione d'uso;
- ERS (Energy Refurbishment Solution): Matrice contenente l'elenco delle misure elementari di riqualificazione, dettagliate secondo parametri identificativi, sul comportamento energetico ed economico, in linea con quanto illustrato precedentemente in Tab. 31.
- SDF (Stato Di Fatto): Matrice contenente l'elenco degli elementi tecnici che compongono l'organismo edilizio oggetto di studio, di cui si specificano le caratteristiche come indicato in Tab. 32.

Al fine di consentire una migliore comprensione dei passaggi che hanno condotto alla definizione della matrice dello Stato di Fatto, si ritiene utile esplicitare alcune considerazioni. Innanzitutto, va osservato che, a differenza di quanto accade all'interno del database, tutti i componenti dell'involucro vengono registrati nella stessa tabella, dove la distinzione fra le categorie è garantita da un codice alfanumerico fondato sul sistema di classificazione Omniclass (technical_element). Ciò comporta la fusione degli attributi che caratterizzano le varie classi, e, inevitabilmente, il fatto che non tutti i campi siano compilati. A titolo di esempio,

Maggiorazioni percentuali relative alla presenza di ponti termici (prospetto 4 UNI/TS 11300-1:2008)	
Pareti con isolamento dall'esterno senza aggetti/balconi e ponti termici corretti	0,05
Pareti con isolamento dall'esterno con aggetti/balconi	0,15
Parete omogenea in mattoni o pietra (senza isolante)	0,05
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)	0,1
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)	0,1
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)	0,2
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno	0,3
Altro	0

Tab. 33. Maggiorazione percentuale del flusso di calore dovuta alla presenza di ponti termici. Approccio semplificato per le analisi preliminari. Rielaborazione da [302].

Fattore di correzione btr,u (prospetto 7 UNI TS 11300-1:2014)	
Esterno	1
Ambiente riscaldato alla stessa temperatura	0
Ambiente riscaldato ad altra temperatura	*
Ambiente con una parete esterna	0,4
Ambiente senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne	0,5
Ambiente con serramenti esterni e almeno due pareti esterne	0,6
Ambiente con tre pareti esterne	0,8
Piano interrato o seminterrato senza finestre e serramenti esterni	0,5
Piano interrato o seminterrato con finestre e serramenti esterni	0,8
Sottotetto tasso di ventilazione elevato	1
Sottotetto altro tetto non isolato	0,9
Sottotetto tetto isolato	0,7
Aree interne di circolazione senza muri esterni	0
Aree interne di circolazione liberamente ventilate	1
Solette sopra vespaio	0,8
Pavimento o parete contro terra	0,45

Tab. 34. Fattori di correzione del flusso termico per diverse condizioni al contorno. Rielaborazione da [86]

verrà certamente indicato il fattore solare per le superfici vetrate e il fattore di assorbimento per quelle opache, mentre nel caso contrario i campi restano vuoti.

Inoltre, fra le classi del sistema edilizio, figurano anche i componenti impiantistici, i cui unici parametri di caratterizzazione hanno a che fare con i rendimenti dei relativi sottosistemi, che vengono raggruppati sotto l'attributo efficiency.

Oltre a ciò, è possibile notare che alcuni dei parametri riportati in Tab. 32, sono frutto di elaborazioni a partire dalle grandezze che possono essere estratte direttamente dalla base di dati. E' questo il caso, ad esempio, dei tre fattori di ombreggiamento F_{hor} , F_{ov} e F_{fin} , che vengono calcolati per ciascuna superficie combinando i valori di esposizione e di inclinazione delle superfici pertinenti

secondo quanto riportato nelle tabelle in appendice alla norma tecnica UNI/TS 11300-1 [254]. Un discorso analogo vale per il fattore di correzione per la presenza di ponti termici nel caso delle strutture opache verticali, che può essere determinato in via preliminare in funzione del tipo di costruzione della parete (Tab. 33), e per il fattore di correzione del flusso termico in considerazione della tipologia di condizione al contorno a cui le superfici dell'involucro termico sono sottoposte (Tab. 34).

L'insieme di queste elaborazioni per la determinazione della versione finale della tabella SDF, che intervengono a partire dal risultato delle query sul database, avvengono prima della fase di simulazione vera e propria, mediante operazioni che agiscono preliminarmente sui dati estratti dalla base informativa. In ultima, i valori testuali che caratterizzavano alcuni campi dati nel database, vengono convertiti in codici numerici corrispondenti, per consentire la manipolazione delle informazioni da parte del programma di calcolo. Nel dettaglio, per l'elaborazione preliminare dei dati, è stato sviluppato uno script Matlab che fa uso di oggetti tipo Map Containers, ossia dizionari che permettono di collegare in modo univoco liste di valori (Allegato 5).

Secondo quanto visto, si procede quindi all'estrazione dei dati per mezzo di query, che vengono scritte nella shell SQL, offerta dall'applicativo Database Explorer di Matlab.

3.1.4. Elaborazione numerica

Lo svolgimento del calcolo avviene per intero all'interno del software Matlab, nel quale sono stati definiti tre script distinti per la valutazione dello stato di fatto (SDF) (Allegato 6), l'analisi degli effetti delle singole misure di riqualificazione energetica (ERS) (Allegato 7) e la simulazione degli scenari progettuali più complessi (ES) (Allegato 8). In tutti i casi, i dati input del calcolo sono quelli illustrati al paragrafo precedente, mentre i risultati vengono restituiti sotto forma di elenco le cui coordinate rappresentano il Costo Globale (GC), il fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e il corrispondente fabbisogno di energia primaria ($Q_{p,H}$). Contestualmente, viene costruito il grafico delle soluzioni su un piano cartesiano definito dagli assi "Costo Globale unitario", calcolato in relazione all'unità di volume [$\text{€}/\text{m}^3$] e "Fabbisogno energetico unitario", valutato annualmente per unità di volume [$\text{kWh}/\text{m}^3\text{a}$]. La scelta di normalizzare i valori in relazione al volume e non alla superficie, nell'ambito di un'indagine volta principalmente agli edifici ad uso pubblico, è giustificata dalla volontà di porre in relazione fabbricati caratterizzati da organizzazioni spaziali eterogenee, tenendo conto dell'incidenza che hanno i locali con grandi altezze sui consumi complessivi.

Partendo dall'analisi del livello più semplice, lo script che si occupa della valutazione delle condizioni dello stato di fatto dell'edificio segue lo svolgimento della metodologia cost-optimal senza applicare nessun intervento di miglioramento energetico, calcolando il fabbisogno di energia e il costo di gestione nel periodo di calcolo per l'edificio così come si presenta all'origine del processo edilizio. A questo scopo, all'inizio del codice, la matrice SDF viene copiata senza alterazioni in una nuova matrice denominata SDP (Stato di Progetto), sulla quale verranno eseguiti tutti i passaggi del calcolo.

Per la valutazione energetica, il processo calcola in sequenza lo scambio termico per trasmissione ($Q_{H,tr}$) composto dal flusso di calore per trasmissione che passa attraverso l'involucro termico e dall'extra-flusso scambiato per radiazione con la volta celeste, lo scambio termico per ventilazione ($Q_{H,ve}$), gli apporti interni (Q_{int}), realizzati dai contributi di flusso prodotto dagli occupanti e dalle apparecchiature, gli apporti solari (Q_{sol}) sulle superfici opache e trasparenti e infine il fattore di utilizzazione ($\eta_{H,gn}$). Da queste quantità viene determinato il fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e successivamente il corrispondente fabbisogno primario ($Q_{H,p}$), calcolato in considerazione dei rendimenti dei sottosistemi impiantistici installati.

Successivamente, si costruisce il valore del Costo Globale, definito in assenza di interventi migliorativi e quindi senza costi di investimento iniziale, di manutenzione, di sostituzione né valori residui delle misure di efficientamento, ma come somma del costo energetico attualizzato nel periodo di calcolo e della corrispondente monetizzazione delle emissioni di CO_2 . Il risultato dell'elaborazione produce una lista di lunghezza unitaria e un punto corrispondente sul piano cartesiano, in rappresentazione del costo in termini energetici ed economici per la gestione energetica dell'edificio allo stato inalterato. Nonostante questo primo step di calcolo sia di fondamentale importanza per comprendere le specifiche del problema, è facile intuire come il risultato ottenuto non dia un riscontro affidabile sull'effettivo comportamento dell'edificio allo stato di fatto. Va sottolineato, infatti, che la metodologia cost-optimal assume valore nella comparazione di più soluzioni progettuali, di cui si prendono in considerazione solo alcuni aspetti, ignorando quelli che rimangono comuni a tutti gli scenari. In questo senso, la determinazione di un unico punto non può ritenersi rappresentativa di un bilancio energetico ed economico complesso che va al di là delle regole della metodologia implementata, considerando un sistema di attributi che qui vengono volutamente tralasciati.

Procedendo oltre, si analizza il funzionamento del secondo script, finalizzato alla simulazione dell'applicazione delle singole misure di riqualificazione energetica considerate singolarmente. In questo caso, all'inizio della procedura di calcolo viene attivato

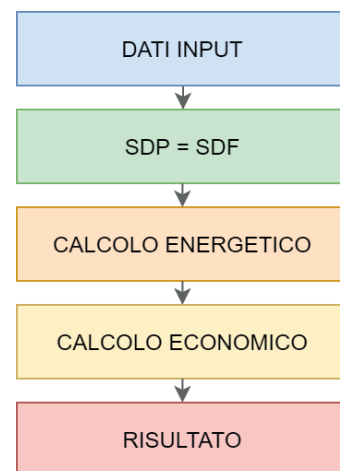


Fig. 100. Schema di funzionamento dello script SDF.

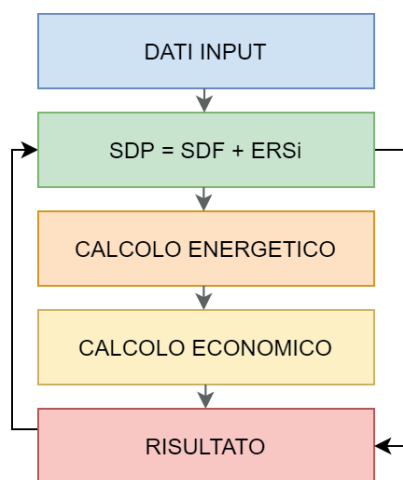


Fig. 101. Schema di funzionamento dello script ERS.

un ciclo che determina, per ciascuna misura di riqualificazione presente nella matrice ERS, la scrittura di una nuova matrice ES, che contiene la singola ERS selezionata, e di una matrice SDP, creata a partire dalla matrice SDF per mezzo della sostituzione degli elementi tecnici coinvolti nell'intervento trasformativo determinato dalla matrice ES ad ogni iterazione. In particolare, la modifica virtuale degli elementi tecnici coinvolti nella misura di riqualificazione avviene sostituendo o ricalcolando gli attributi delle singole istanze. Per le strutture opache, la trasmittanza viene ricalcolata in funzione di quella esistente, aggiungendo il contributo dei nuovi componenti, determinato per mezzo delle conducibilità dei materiali e degli spessori degli strati, mentre l'emissività e il fattore di assorbimento vengono sostituiti con quelli dei nuovi elementi, se questi modificano gli originali. Analogamente, per gli interventi che coinvolgono le superfici finestrate, vengono sovrascritti i valori di trasmittanza, di emissività e del fattore solare e le misure di efficientamento che agiscono sui componenti impiantistici vengono simulate per sostituzione dei rendimenti dei rispettivi sottosistemi.

In questo modo, si ottiene un numero di stati di progetto pari a quello delle soluzioni elementari di riqualificazione. Per ciascuno di questi, il calcolo energetico procede analogamente a quanto visto per lo script di simulazione dello stato di fatto, con l'aggiunta delle voci di costo corrispondenti all'investimento iniziale, alla manutenzione e all'eventuale sostituzione degli elementi coinvolti nelle misure di riqualificazione e al valore residuo degli stessi, qualora non abbiano raggiunto la fine vita nel periodo di calcolo considerato. Per quanto concerne i criteri economici direttamente collegati agli elementi tecnici introdotti con l'intervento di efficientamento (costo di investimento, costo di manutenzione, costo di sostituzione e valore residuo), questi non sono riportati nella matrice SDP, ma rimangono nella matrice ES, da cui vengono richiamati per il calcolo delle relative voci di costo. Infine, il calcolo del costo energetico nel periodo di riferimento viene effettuato utilizzando associando le voci di prezzo e i relativi tassi di attualizzazione al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento ($Q_{p,H}$).

Come risultato, si produce una lista di lunghezza pari al numero di ERS, che genera sul piano cartesiano la stessa quantità di punti. Questo livello di simulazione, pur non essendo completo nella sua attuazione in relazione agli obiettivi dello studio, permette già di formulare alcune considerazioni, identificando le soluzioni elementari che, già singolarmente, risultano particolarmente efficaci o, al contrario, per nulla convenienti. Ciò consente, qualora lo si ritenga utile, di sfoltire la lista delle misure elementari di riqualificazione conducendo, nella fase successiva, a un calcolo meno oneroso e a un risultato più espressivo. Tuttavia, non è possibile considerare l'analisi conclusa a questo stadio, ipotizzando di poter dedurre il risultato dell'applicazione contemporanea di più soluzioni dal loro comportamento preso

singolarmente in quanto, così facendo, non si tengono in considerazione i possibili effetti sinergici che si vanno a creare negli scenari più complessi [315].

Si giunge così alla necessità di delineare un terzo script, che sia capace di valutare anche gli esiti dell'applicazione di più misure di efficientamento energetico nell'ambito di un singolo intervento edilizio. Dal punto di vista della programmazione, ciò introduce un grado di complessità ulteriore, in quanto occorre descrivere le regole che determinano la compatibilità dell'impiego simultaneo di più soluzioni elementari, per escludere scenari progettuali incoerenti. Si pensi, ad esempio, di disporre nel catalogo delle ERS di più soluzioni tecniche per la realizzazione di una misura di efficientamento energetico, determinate dall'impiego di materiali diversi, come nel caso dell'isolamento dell'ultimo solaio verso gli ambienti non riscaldati, che può essere realizzato, fra le molte possibilità, mediante il posizionamento di pannelli coibenti in EPS o in lana di roccia. La scelta della strategia da attuare può dipendere da numerosi fattori, ma ciò che appare chiaro è che non è ragionevole pensare di combinare insieme i due interventi. Prima di procedere alla simulazione energetica ed economica occorre, quindi, stilare una lista di scenari progettuali coerenti, determinati combinando le voci del catalogo delle ERS senza che si realizzino incongruenze logiche. Al fine di tradurre in codice questo vincolo logico, si è scelto di sfruttare il parametro `technical_element` della matrice ERS, che indica a quale elemento tecnico si riferiscono le misure di efficientamento energetico e di escludere la possibilità di mettere in atto, nell'ambito dello stesso scenario progettuale, due interventi diversi sulle medesime entità dell'organismo edilizio. Seguendo questa regola, si genera la matrice ES che contiene le combinazioni ammissibili delle ERS e rappresenta tutti gli scenari progettuali che è possibile applicare. A questo punto, le valutazioni energetiche ed economiche avvengono mediante un ciclo applicato alla matrice ES, dove per ogni iterazione si determina una nuova matrice SDP che risulta dall'applicazione di un set di ERS agli elementi tecnici del sistema edificio/impianto.

Il numero delle soluzioni determinate in questo modo è maggiore o uguale a quello della fase precedente e al massimo corrispondente a:

$$\sum_{k=1}^n \frac{n!}{k! (n-k)!}$$

dove:

- n è il numero complessivo di ERS;
- k è il numero di elementi nella serie considerata per ciascun raggruppamento, che permette di considerare le misure prima singolarmente, poi a coppie, fino ad arrivare alla definizione di uno scenario che comprenda tutte le possibilità di intervento

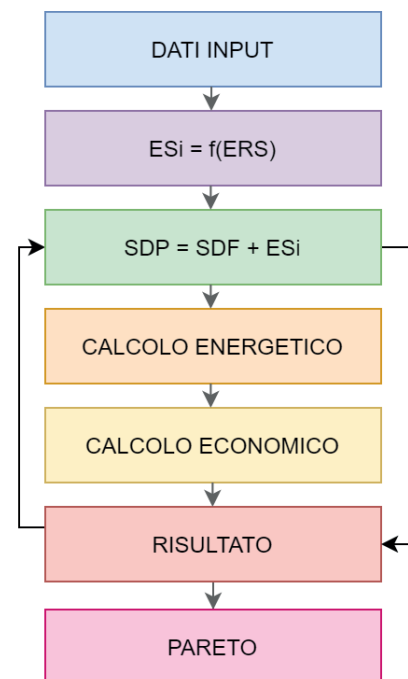


Fig. 102. Schema di funzionamento dello script ES.

ammissibili, considerate simultaneamente. Nel caso in cui si voglia evitare la sovrapposizione con le soluzioni determinate con lo script precedente, il valore di k può essere assunto a partire dal numero 2, ovvero dalla considerazione di coppie di misure di efficientamento elementari.

I tre script portano all'identificazione di un elenco progressivamente più popoloso e, conseguentemente, a una nuvola di punti più densa nel grafico corrispondente. Come ultimo passaggio, per rendere gli esiti dell'analisi più facilmente intellegibili, appare opportuno aggiungere una porzione di codice finalizzata all'isolamento dei punti che costituiscono la Frontiera di Pareto. L'attuazione sfrutta la definizione di punti dominanti nell'ambito dell'ottimo paretiano, individuando tutti gli elementi per i quali non è possibile determinare un miglioramento in relazione a un criterio, senza provocare un peggioramento delle prestazioni per quanto riguarda l'altro. Ovvero:

$$A \in P \iff \forall x < x_A \exists B: y_B < y_A$$

dove:

- A e B sono due punti generici appartenenti all'insieme delle soluzioni e identificati dalle relative coordinate x e y;
- P è l'insieme dei punti che soddisfano la condizione di ottimo paretiano.

In questo modo, la procedura viene portata a compimento ed è possibile dare avvio alla fase di lettura critica del grafico, che costituisce lo strumento principale del processo decisionale.

3.2. Conclusioni

Giunti al termine della trattazione teorica dell'intero processo oggetto della presente ricerca, è possibile mettere in evidenza la sua complessità, notando che per il suo compimento occorre passare per numerosi software, modelli dati e linguaggi di programmazione. La metodologia così formulata si avvale, infatti, delle potenzialità di interoperabilità degli strumenti per tracciare una filiera che permette l'attuazione di un modello virtuoso all'interno di strutture informative standard. I dati organizzati nel database informativo, grazie alla strutturazione di un modello multiscalarare compilato in CityGML, possono essere letti da piattaforme esterne sia per la visualizzazione e l'interrogazione, come mostrato con le applicazioni alla scala urbana, che per attivare analisi più approfondite, quali la metodologia cost-optimal per la simulazione di scenari progettuali e il supporto alla decisione.

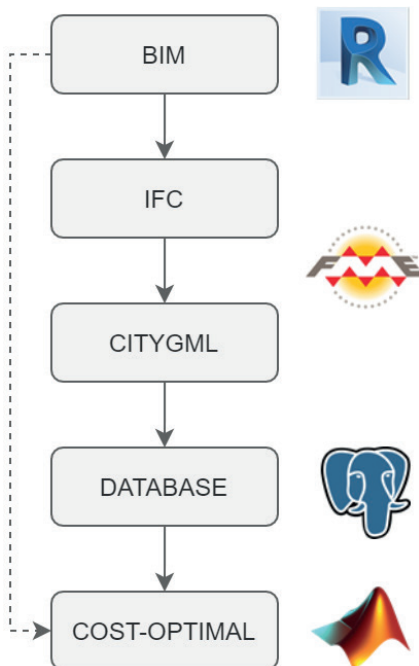


Fig. 103. Processo per l'attivazione della procedura cost-optimal a partire dal modello BIM. Le frecce piene indicano il flusso di lavoro completo, mentre la linea tratteggiata indica la possibilità di collegamento diretto fra il BIM e la piattaforma di calcolo.

Nonostante il presente lavoro di ricerca punti alla creazione di un sistema informativo integrato, e quindi sostenga primariamente il valore del processo nel suo complesso, è interessante valutare anche le opportunità che possono derivare anche da un'attuazione per parti, che può essere realizzata portando a compimento un numero ridotto di passaggi finalizzati al raggiungimento di risultati specifici (Fig. 103). Ciò può condurre, ad esempio, alla definizione di una procedura per l'attivazione della metodologia cost-optimal in diretto collegamento con i modelli BIM, lavorando attraverso la definizione di abachi rappresentativi degli elementi dell'organismo edilizio e delle loro proprietà, che possono essere facilmente elaborati nella forma delle matrici input per la fase computazionale. In questo modo, si realizzerà uno strumento di decisione incorporato in un processo BIM-based, pur perdendo i vantaggi derivanti dalla standardizzazione di informazioni e procedure.

4. Caso studio

Con l'obiettivo di testare e validare la metodologia nel suo complesso, si sono sviluppati alcuni casi studio, per i quali è stato svolto l'intero flusso di lavoro, con riferimento a quanto descritto per la scala edile nel diagramma presentato in Fig. 50. In particolare, il processo può essere sintetizzato nelle seguenti fasi operative:

- Modellazione informativa schematica dell'edificio, attuata mediante il software Autodesk Revit;
- Caricamento e popolamento dei parametri condivisi per la descrizione dell'organismo edilizio finalizzata ai processi di riqualificazione energetica;
- Esportazione del modello in IFC 4.0;
- Conversione da IFC a CityGML LOD3, realizzata attraverso script di programmazione visuale in ambiente Safe FME;
- Trasferimento delle informazioni nel database informativo definito secondo lo schema logico di CityGML con aggiunta della EM_ADE, effettuata, anche in questo caso per mezzo di script VPL programmati in Safe FME;
- Estrazione dei dati dal database a Mathworks Matlab R2019a, messa in atto attraverso script SQL definiti nell'applicativo aggiuntivo per Matlab Database Explorer;
- Predisposizione delle matrici SDF e ERS, contenenti i dati input per la simulazione numerica, in relazione alla descrizione del sistema edificio-impianto e all'elenco di soluzioni progettuali da testare;
- Esecuzione delle procedure di calcolo denominate SDF, ERS ed ES, per l'attuazione della metodologia cost-optimal rispettivamente allo stato di fatto, in considerazione delle singole strategie di riqualificazione energetica e per la simulazione di scenari progettuali complessi.

4.1. Catalogo delle ERS

Uno dei dataset fondamentali per l'attuazione della procedura cost-optimal è il catalogo delle ERS, ovvero l'elenco delle soluzioni elementari di riqualificazione energetica che è possibile applicare al sistema edificio-impianto. Risulta evidente che tale lista può arrivare ad ospitare un numero vastissimo di opzioni e che, in tal senso, può assumere un'infinità di forme. Tuttavia, al fine di ottimizzare le risorse di calcolo e di restituire risultati delle analisi che siano significativi, occorre arrivare ad individuare un insieme di strategie limitato, rappresentativo delle reali possibilità di intervento sugli edifici esistenti. Assumendo questa prospettiva, il problema legato alla redazione del catalogo delle ERS si sposta dalla necessità di individuare quante più alternative progettuali possibili a quello di selezionarne un numero contenuto, che sia

esemplare delle strategie che è possibile attuare in relazione a un determinato contesto. Infatti, non è pensabile stilare un elenco di interventi di riqualificazione energetica generalmente valido a livello nazionale o sovranazionale, in quanto le particolarità locali che il settore AEC assume nei diversi ambiti territoriali risulta determinante sia per la comprensione delle caratteristiche degli organismi edilizi esistenti che per la scelta delle possibili strategie volte al miglioramento delle loro prestazioni. A tale proposito, un riferimento importante è stato individuato nei progetti europei TABULA ed EPISCOPE, che hanno svolto uno sforzo finalizzato alla catalogazione delle tipologie edilizie ricorrenti nei diversi contesti nazionali dell'Unione Europea e all'individuazione di possibili scenari trasformativi per la riqualificazione energetica. Tuttavia, mentre queste ricerche miravano all'identificazione di edifici di riferimento per lo sviluppo di analisi preliminari svolte a livello territoriale, qui l'attenzione viene diretta ai singoli edifici, necessitando di un grado di approfondimento maggiore.

Nel caso presente, per la redazione del catalogo delle ERS, è stato preso come riferimento principale il documento emesso dall'ENEA sull'applicazione nazionale della metodologia cost-optimal [300], che a sua volta riprende il lavoro svolto dai progetti europei sopracitati, per stilare un elenco di misure di riqualificazione energetica adatto alle tipologie edilizie e al mercato delle costruzioni italiano. A partire da questo spunto, un lavoro di lettura critica e di aggiornamento ha portato alla definizione del catalogo che viene qui utilizzato per l'analisi dei casi studio. Seguendo la logica della scomposizione tecnologica dell'organismo edilizio, le misure di riqualificazione sono state suddivise in funzione degli elementi tecnici su cui insistono. Questo passaggio, utile alla descrizione logica del processo in relazione ai suoi fondamenti teorici, risulta fondamentale in fase di calcolo per il confezionamento degli scenari progettuali (ES), che vengono definiti per aggregazione di singole ERS in modo che non si manifestino interferenze fra gli interventi di riqualificazione. Ciascuna soluzione elementare è dotata di un codice identificativo univoco (ID) composto di due parti: la prima in riferimento al gruppo a cui la misura appartiene e la seconda costituita da un numero progressivo, in modo che ERS identificate dal medesimo codice di gruppo non possono essere applicate simultaneamente agli stessi elementi del sistema edificio-impianto.

Per quanto riguarda gli aspetti economici delle misure di riqualificazione, l'associazione delle lavorazioni alle voci di capitolato e ai costi unitari è stata effettuata con riferimento al prezzario del genio civile "Recupero Ristrutturazione Manutenzione" nell'edizione dell'ottobre 2018 [315], di cui sono stati trascritti i codici identificativi. Infine, le informazioni sul ciclo di vita dei materiali (lunghezza della via utile, costo di manutenzione e smaltimento) sono stati determinati secondo

quanto indicato all'allegato D dello standard UNI EN 15459:2017 [287].

L'elenco delle soluzioni elementari per la riqualificazione energetica degli organismi edilizi costituisce uno dei set di dati input per l'attivazione dello strumento di supporto alla decisione e, così come le altre informazioni in ingresso, va tarato in riferimento allo specifico caso studio ad ogni sua applicazione. E' infatti previsto che, prima della fase di calcolo, il catalogo delle ERS venga adattato e verificato in considerazione delle peculiarità dell'organismo edilizio oggetto di analisi. Poiché gli strumenti qui presentati sono stati progettati per essere applicabili all'intero spettro del costruito esistente, comprendendo quindi sia edifici privi di qualsiasi connotazione storico/culturale che manufatti riconosciuti come significativi in relazione al loro sistema di valori, è lecito porsi il problema di come il catalogo delle ERS debba porsi in relazione a tale varietà. Sulla base dello studio della letteratura scientifica sull'argomento e delle sperimentazioni svolte nel corso della presente ricerca, è possibile affermare che, a fronte del minor margine di azione che si rileva negli edifici storici, deve corrispondere una riduzione delle possibilità di attuazione delle strategie trasformative. In questo senso, il catalogo delle ERS agisce come un filtro, le cui maglie si stringono all'aumento delle necessità di conservazione. Come si ha già avuto modo di trattare, si ritiene che l'individuazione delle caratteristiche di questo filtro, e quindi, nello specifico, la selezione delle soluzioni progettuali da ritenersi applicabili ai manufatti, non possa essere demandata a una procedura analitica, ma debba necessariamente essere valutata per mezzo del sistema di conoscenze e competenze di cui si fanno portatori i soggetti coinvolti nel processo.

In Tab. 35 si presenta il catalogo delle ERS sviluppato per il presente progetto.

Tab. 35. Nella pagina seguente. Catalogo delle ERS per elementi opachi, trasparenti e componenti dell'impianto termico.

ID	VOCE PREZZARIO	ELEMENTO TECNICO	NOME
1.1	B15077	Muri esterni	Isolamento termico esterno - EPS 3 cm
1.2	B15078	Muri esterni	Isolamento termico esterno - XPS 4 cm
1.3	B15076	Muri esterni	Isolamento termico esterno - LV 4 cm
1.4	D15022 A75054	Muri esterni	Isolamento termico esterno - intonaco
2.1	B15080	Muri esterni	Isolamento termico interno - EPS 3 cm
2.2	B15081	Muri esterni	Isolamento termico interno - XPS 3 cm
2.3	B15079	Muri esterni	Isolamento termico interno - LV 3 cm
2.4	B15082	Muri esterni	Isolamento termico interno - PUR 3 cm
2.6	B15085	Muri esterni	Isolamento termico interno - LR 6 cm
3.1	B15101	Muri esterni	Isolamento termico in intercapedine - EPS 3 cm
3.2	B15102	Muri esterni	Isolamento termico in intercapedine - XPS 3 cm
3.3	B15104	Muri esterni	Isolamento termico in intercapedine - LV 3 cm
3.4	B15100	Muri esterni	Isolamento termico in intercapedine - S 10 cm
4.1	B15080	Muri interrati	Isolamento termico interno - EPS 3 cm
4.2	B15081	Muri interrati	Isolamento termico interno - XPS 3 cm
4.3	B15079	Muri interrati	Isolamento termico interno - LV 3 cm
4.4	B15082	Muri interrati	Isolamento termico interno - PUR 3 cm
4.5	B15085	Muri interrati	Isolamento termico interno - LR 6 cm
5.1	B15101	Muri interrati	Isolamento termico in intercapedine - EPS 3 cm
5.2	B15102	Muri interrati	Isolamento termico in intercapedine - XPS 3 cm
5.3	B15104	Muri interrati	Isolamento termico in intercapedine - LV 3 cm
5.4	B15100	Muri interrati	Isolamento termico in intercapedine - S 10 cm
6.1	B15035	Tetti inclinati	Isolamento termico estradosso tetto inclinato - XPS 3 cm
6.2	B15033	Tetti inclinati	Isolamento termico estradosso tetto inclinato - LV 3 cm
6.3	B15037	Tetti inclinati	Isolamento termico estradosso tetto inclinato - LL 2.5 cm
6.4	B15034	Tetti inclinati	Isolamento termico estradosso tetto inclinato - PUR 3 cm
7.1	B15048	Tetti inclinati	Isolamento termico intradosso tetto inclinato - EPS 3 cm
7.2	B15047	Tetti inclinati	Isolamento termico intradosso tetto inclinato - XPS 3 cm
7.3	B15045	Tetti inclinati	Isolamento termico intradosso tetto inclinato - LV 4 cm
7.4	B15046	Tetti inclinati	Isolamento termico intradosso tetto inclinato - PUR 3 cm
8.1	B15012	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - EPS 3 cm
8.2	B15009	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - XPS 3 cm
8.3	B15017	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - LR 5 cm
8.4	B15002	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - LV 3 cm
8.5	B15006	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - LL 2.5 cm
8.9	B15008	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - S 3 cm
8.7	B15014	Tetti piani	Isolamento termico estradosso tetto piano - PUR 3 cm
9.1	B15025	Tetti piani	Isolamento termico intradosso tetto piano - EPS 3 cm
9.2	B15026	Tetti piani	Isolamento termico intradosso tetto piano - XPS 4 cm
9.3	B15027	Tetti piani	Isolamento termico intradosso tetto piano - LV 3 cm

MATERIALE	λ	s	PREZZO UNITARIO	VITA UTILE	COSTO MANUTENZIONE	COSTO SMALTIMENTO
	W/mK	cm	€/m ²	a	%	%
EPS	0,034	0,03	69,29	50	0	0,01
XPS	0,034	0,04	66,76	50	0	0,01
Lana di vetro	0,032	0,04	70,34	50	0	0,01
Intonaco	0,47	0,02	60,05	50	0	0,01
EPS	0,034	0,03	46,61	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	39,97	50	0	0,01
Lana di vetro	0,035	0,03	39,73	50	0	0,01
Poliuretano	0,028	0,03	46,14	50	0	0,01
Lana di roccia	0,039	0,06	79,89	50	0	0,01
EPS	0,034	0,03	18,31	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	12,01	50	0	0,01
Lana di vetro	0,032	0,03	11,76	50	0	0,01
Sughero	0,043	0,1	30,90	50	0	0,01
EPS	0,034	0,03	46,61	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	39,97	50	0	0,01
Lana di vetro	0,035	0,03	39,73	50	0	0,01
Poliuretano	0,028	0,03	46,14	50	0	0,01
Lana di roccia	0,039	0,06	79,89	50	0	0,01
EPS	0,034	0,03	18,31	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	12,01	50	0	0,01
Lana di vetro	0,032	0,03	11,76	50	0	0,01
Sughero	0,043	0,1	30,90	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	19,71	50	0	0,01
Lana di vetro	0,037	0,03	13,29	50	0	0,01
Lana di legno	0,09	0,025	29,23	50	0	0,01
Poliuretano	0,028	0,03	16,13	50	0	0,01
EPS	0,033	0,03	35,17	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	28,53	50	0	0,01
Lana di legno	0,034	0,04	25,59	50	0	0,01
Poliuretano	0,028	0,03	32,65	50	0	0,01
EPS	0,034	0,03	17,52	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	10,88	50	0	0,01
Lana di roccia	0,034	0,05	26,45	50	0	0,01
Lana di vetro	0,032	0,03	17,60	50	0	0,01
Lana di legno	0,09	0,025	29,11	50	0	0,01
Sughero	0,043	0,02	23,75	50	0	0,01
Poliuretano	0,028	0,03	15,00	50	0	0,01
EPS	0,033	0,03	33,15	50	0	0,01
XPS	0,034	0,04	34,21	50	0	0,01
Lana di vetro	0,032	0,03	33,24	50	0	0,01

9.4	B15024	Tetti piani	Isolamento termico intradosso tetto piano - PUR 3 cm
10.1	B15054	Solai interpiano	Isolamento termico estradosso ultimo solaio - EPS 3 cm
10.2	B15057	Solai interpiano	Isolamento termico estradosso ultimo solaio - XPS 3 cm
10.3	B15055	Solai interpiano	Isolamento termico estradosso ultimo solaio - LR 5 cm
10.4	B15062	Solai interpiano	Isolamento termico estradosso ultimo solaio - LL 2.5 cm
11.1	B15065	Solai controterra	Isolamento termico solaio controterra - EPS 3 cm
11.2	B15064	Solai controterra	Isolamento termico solaio controterra - XPS 3 cm
11.3	B15066	Solai controterra	Isolamento termico solaio controterra - LV 2 cm
11.4	B15068	Solai controterra	Isolamento termico solaio controterra - LL 0.8 cm
11.5	B15069	Solai controterra	Isolamento termico solaio controterra - S 2 cm
11.6	A65093 A25047 B45062	Solai controterra	Massetto termico su solaio controterra - A 5 cm
11.7	A65093 A25047 B45062	Solai controterra	Massetto termico su solaio controterra - Perlite 5 cm
11.8	A65093 A25047 B45062	Solai controterra	Massetto termico su solaio controterra - Vermiculite 5 cm
11.9	A65096 A25047 B45062	Solai controterra	Massetto termico su solaio controterra - 5 cm

ID	VOCE PREZZARIO	ELEMENTO TECNICO	NOME
12.1	D15084 NPOE13	Finestre esterne	Restauro di serramenti esistenti in legno con sostituzione lastra - vetro singolo 6 mm
12.2	D15084 C45021 NP013	Finestre esterne	Restauro di serramenti esistenti in legno con sostituzione lastra - doppio vetro 4-12-4
12.3	D15084 C45021 NP013	Finestre esterne	Restauro di serramenti esistenti in legno con sostituzione lastra - doppio vetro 4-12-4 BE
12.4	D15084 C25056	Finestre esterne	Sostituzione di serramenti esistenti in legno - doppio vetro 4-12-4
12.5	D15084 C25054	Finestre esterne	Sostituzione di serramenti esistenti in legno - doppio vetro 4-12-4 BE

ID	VOCE PREZZARIO	ELEMENTO TECNICOZ	NOME
13.1	1M.01.020.0020 1M.01.050.0090	Generatori di calore	Nuovo generatore di calore ad alte prestazioni
13.2	1M.01.020.0060 1M.01.050.0100	Generatori di calore	Nuovo generatore di calore a condensazione ad alte prestazioni
14.1	NP.1M.01.010.0010	Sist. di regolazione	Valvole termostatiche con sensore a cera
14.2	NP.1M.01.010.0020	Sist. di regolazione	Valvole termostatiche con sensore a liquido
14.3	NP.1M.01.010.0030	Sist. di regolazione	Valvole termostatiche con sensore a gas

Poliuretano	0,028	0,03	27,46	50	0	0,01
EPS	0,033	0,03	17,52	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	10,88	50	0	0,01
Lana di vetro	0,034	0,05	26,45	50	0	0,01
Lana di legno	0,09	0,025	28,43	50	0	0,01
EPS	0,033	0,03	16,96	50	0	0,01
XPS	0,034	0,03	10,32	50	0	0,01
Lana di vetro	0,032	0,02	12,51	50	0	0,01
Lana di legno	0,09	0,008	13,72	50	0	0,01
Sughero	0,043	0,02	18,53	50	0	0,01
Argilla espansa	0,142	0,05	87,40	50	0	0,01
Perlite	0,088	0,05	83,72	50	0	0,01
Vermiculite		0,05	100,31	50	0	0,01
Gessofibra	0,173	0,05	117,86	50	0	0,01

Uw	ϵ	g	PREZZO UNITARIO	VITA UTILE	COSTO MANUTENZIONE	COSTO SMALTIMENTO
W/m ² K	/	/	€/m ²	a	%	%
4,9		0,92	264,67	30	0,01	0,01
2,8	0,84	0,8	276,35	30	0,01	0,01
1,58	0,2	0,6	331,42	30	0,01	0,01
2,8	0,84	0,8	598,77	30	0,01	0,01
1,58	0,2	0,6	699,77	30	0,01	0,01

η	PREZZO UNITARIO	VITA UTILE	COSTO MANUTENZIONE	COSTO SMALTIMENTO
/	€/cad	a	%	%
0,98	11179,62	20	0,015	0,05
0,995	34315,90	20	0,015	0,05
0,97	56,00	20	0,015	0,05
0,985	68,00	20	0,015	0,05
0,995	80	20	0,015	0,05

ATTRIBUTO	VALORE
Periodo di calcolo	20 anni
Tasso di sconto	3 %
Prezzo unitario gas	0.0341 €/kWh
Tasso di crescita gas	2.8 %
Prezzo unitario CO ₂	0.00632 €/kWh

Tab. 36. Parametri di calcolo economici.

4.2. Parametri di calcolo

In aggiunta alla descrizione del sistema edificio-impianto e alla definizione dell'elenco di strategie elementari per la sua riqualificazione, al fine di sviluppare la metodologia cost-optimal occorre impostare una serie di parametri di calcolo, che appartengono alla categoria dei dati input economici e climatici. Questa classe di attributi non dipende dagli edifici oggetto di indagine, ma, al contrario, si occupa di caratterizzare il contesto in cui si svolgono le analisi, descrivendo le invarianti economiche e climatiche che possono ritenersi valide all'interno di ambiti territoriali omogenei ed entro periodi di tempo definiti. Si tratta, infatti, di una serie di grandezze alquanto eterogenee, che possono variare sensibilmente in relazione alla localizzazione geografica e al periodo di riferimento in cui si svolgono le simulazioni. Per il caso presente, risulta sufficiente strutturare un unico sistema di attributi, definito per il Comune di Pavia nel periodo 2020-2040.

Nella scelta dei parametri economici (Tab. 36), occorre distinguere innanzitutto se il problema in fase di descrizione si riconduca alla prospettiva macroeconomica o a quella finanziaria, ovvero se nella simulazione si stia assumendo il punto di vista di un soggetto pubblico o privato. Lavorando sul patrimonio edilizio dell'Università di Pavia, nel caso corrente ci si colloca certamente nel primo scenario, di conseguenza nel calcolo non vanno prese in considerazione di tasse e imposte, mentre occorre incorporare la monetizzazione delle emissioni di anidride carbonica legate al consumo di energia.

Trattandosi di edifici non residenziali, il periodo di calcolo viene fissato pari a 20 anni, come indicato nel Regolamento Delegato (UE) N. 244/2012. Dalla stessa fonte proviene anche la scelta del tasso di sconto, assunto pari al 3% in termini reali.

Per quanto riguarda i costi relativi all'energia, è stato assunto un prezzo al kWh equivalente di gas naturale pari a 0.0341 €/kWh, in considerazione di un prezzo unitario di 0.3265 €/m³ e di un potere calorifico di 8250 kcal/m³. I dati numerici per questo calcolo sono stati estratti dalle condizioni economiche per i clienti del mercato tutelato pubblicate dall'ARERA (Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambiente) per l'ambito territoriale Nord-Orientale (Lombardia, Trentino Alto-Adige, Veneto, Friuli-Venezia Giulia ed Emilia-Romagna), consultate nel corso dell'anno 2019. Allo stesso modo, il tasso di crescita annuale del prezzo del gas è stato fissato pari al 2.8%, valore medio assunto per interpolazione lineare della proiezione presentata nel report della Commissione Europea del 2013, contenente le stime valide al 2050 [316].

Solo per la prospettiva macroeconomica, occorre poi considerare la monetizzazione delle emissioni di CO₂. Per la stima di questa grandezza, ci si è riferiti al documento dell'ENEA sulla

applicazione al contesto italiano della procedura cost-optimal [300], che presenta una proiezione del prezzo equivalente per tonnellata di anidride carbonica e della sua evoluzione nel tempo fino al 2050. Secondo questa stima, si può assumere che, in riferimento al gas naturale si abbia un'emissione di CO₂ pari a 201 g/kWh e che questa possa essere valutata 0.03145 €/kg, ottenendo così un valore complessivo medio di 0.00632 €/kWh.

Nella determinazione dei dati climatici per il calcolo nella stagione invernale, la città di Pavia è caratterizzata secondo quanto esposto in Tab. 37. Le temperature medie mensili sono state estratte dagli anni climatici tipo di riferimento (TRY) nazionali per applicazioni termotecniche, sviluppati dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano) come base per l'aggiornamento della norma tecnica UNI 10349-1:2016 [317], con riferimento alla stazione meteorologica di Pavia (Castello di Agogna). La durata del periodo di riscaldamento è stata impostata in conformità con il prospetto 6 della UNI/TS 11300-1 [254], che, per la zona climatica E, indica un lasso di tempo compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile Tab. 38. I dati sulle irradiazioni giornaliere medie mensili derivano, ancora una volta, dagli anni climatici tipo di riferimento, da dove vengono elaborati per ottenere dapprima i valori dell'energia radiativa incidente sull'unità di superficie per vari orientamenti (compreso l'orizzontale) e, successivamente quelli dell'irradianza connessa (Tab. 39). Infine, i dati sui fattori di ombreggiatura per ostruzioni esterne (F_{hor}), oggetti orizzontali (F_{ov}) e oggetti verticali (F_{fin}), da valutarsi in considerazione dei rispettivi angoli di ombreggiamento e dell'esposizione dei componenti edilizi a cui si riferiscono, sono stati estratti dall'Appendice D della norma tecnica UNI/TS 11300-1/2014 [254], con riferimento al 45° parallelo.

4.3. Esempi applicativi

Per lo sviluppo della fase operativa, sono stati individuati due casi studio, selezionando altrettanti edifici dall'insieme che costituisce il patrimonio immobiliare dell'Università di Pavia. Volendo analizzare in modo approfondito gli effetti della procedura, così da far emergere tutte le possibili criticità, sono

ATTRIBUTO	VALORE
Zona climatica	E
Temperatura esterna	-5 °C
Umidità relativa esterna	38.7 %
Gradi giorno	2623
Velocità del vento	1.946 m/s

Tab. 37. Dati invernali di progetto, Comune di Pavia.

MESE	Tmm [°C]	gg
Gennaio	1.5	31
Febbraio	4.6	28
Marzo	9.5	31
Aprile	12.7	15
Maggio	18.5	0
Giugno	22.5	0
Luglio	24.2	0
Agosto	22.7	0
Settembre	17.9	0
Ottobre	14.2	17
Novembre	6.5	30
Dicembre	1.6	31

Tab. 38. Temperature medie mensili e durata della stagione di riscaldamento per la città di Pavia.

MESE	IRRADIAZIONE [MJ/m ²]			
	Orizzontale	Verticale N	Verticale E/W	Verticale S
Ottobre	7.9	2.84	5.79	8.68
Novembre	6.0	1.85	4.94	7.70
Dicembre	3.8	1.33	3.16	5.79
Gennaio	5.0	1.55	4.24	10.04
Febbraio	7.8	2.38	6.14	11.15
Marzo	13.3	3.68	9.91	13.34
Aprile	13.1	5.33	11.07	10.54

Tab. 39. Irradiazioni sull'unità di area per superfici orizzontali e verticali in funzione dell'esposizione.



Fig. 104. Vista sul retro del corpo semicircolare con minareto. Fonte: Archivio fotografico dell'Università di Pavia .



Fig. 106. Volta affrescata al piano nobile. Fotografia dell'autore.

stati scelti organismi edilizi complessi, connotati da vincoli di tipo storico/architettonico e inseriti nel tessuto urbano del centro città.

4.3.1. Palazzo Botta

Situato nel quadrante nord-occidentale del centro storico di Pavia, Palazzo Botta-Adorno (Fig. 105) è un complesso architettonico costruito a partire dal 1702 come residenza signorile della famiglia di cui porta il nome [318]. A partire dal 1885 ha ospitato gli Istituti Biologici dell'Università di Pavia ed è attualmente oggetto di riqualificazione con la destinazione a Polo Museale di Ateneo. L'edificio è caratterizzato da tre piani fuori terra più una porzione interrata e si organizza in due stecche collegate da altrettanti corpi trasversali, racchiudendo tre giardini. In corrispondenza dell'elemento più lungo, aggiunto in occasione dei lavori di ristrutturazione per adattare l'edificio alla nuova funzione universitaria, si attestano due corpi sporgenti che terminano in una semicirconferenza, al centro dei quali sono collocate due alte ciminiere (Fig. 104), che fungevano da camini per i laboratori collocati all'interno. L'esterno appare ritmato da forometrie a tutto sesto al piano terra e rettangolari timpanate al piano superiore, mentre al terzo livello sono presenti piccole finestre quadrate in parte tamponate in corrispondenza dei sottotetti. Le porzioni centrali delle facciate, che alloggiavano gli ingressi principali, sono state ridisegnate nel 1887 e risultano caratterizzate da otto semicolonne trabeate di ordine dorico al pianterreno e ionico a quello superiore. Nella parte più antica, lo spazio interno è costituito dal susseguirsi di ampi saloni voltati impostati su una maglia strutturale quadrata di lato 9,5 m. Tuttavia, con la trasformazione ad uso universitario una parte degli ambienti preesistenti è stata frammentata e il ricco apparato decorativo interno è stato quasi completamente coperto [319]. Di particolare pregio risulta la "Stanza di Napoleone" ancora oggi in stato di buona conservazione con i suoi affreschi, gli stucchi rococò e l'apparato ligneo che definisce lo spazio dell'alcova.



Fig. 105. Vista del prospetto principale di Palazzo Botta-Adorno. Fonte: Wikipedia (Carolina Muscas).

L'edificazione più recente, invece, è caratterizzata in pianta da ambienti più piccoli che si attestano su un corridoio continuo, oltre che dalle due grandi aule semicircolari a doppia altezza, dedicate agli studiosi pavesi Spallanzani e Golgi (Fig. 107) [320]. Nel suo complesso, l'edificio è vincolato ai sensi della Legge 1089 del 1939, con provvedimento emanato nel 1997.

L'edificio, che risultava in stato di abbandono dal 2007, è attualmente oggetto di un progetto di riqualificazione promosso dall'Università di Pavia e volto alla costituzione di un polo museale diviso in tre settori tematici: una sezione di Storia Naturale, una di Storia della Cura dell'Uomo e una terza di storia della Fisica, tutte dedicate a docenti illustri dell'Ateneo pavese. Il primo lotto di intervento, conclusosi con l'inaugurazione del Museo Kosmos (Fig. 108) nel settembre del 2019, ha interessato una parte del piano terra, trasformando gli spazi del settore settentrionale del nucleo settecentesco e gli ambienti della stecca ottocentesca, che era già precedentemente occupata dalla collezione del museo [321].

L'involucro edilizio (Tab. 41) è costituito da pareti in laterizio pieno con finitura bugnata al piano terra e intonacata o faccia vista ai livelli superiori, di spessori variabili da 45 a 120 cm (M01-M13), con trasmittanze che oscillano fra 0.67 e 1.50 W/m²K. L'emissività è assunta pari a 0.9 considerando una superficie di finitura intonacata, mentre il fattore di assorbimento viene fissato a 0.4, in relazione al colore giallo-ocra che caratterizza i prospetti dell'edificio. Gli orizzontamenti (S01-S03) sono prevalentemente realizzati con volte in mattoni riempite di materiale incoerente e pavimenti ceramici. L'ultimo solaio dà verso un sottotetto non riscaldato, caratterizzato dalla presenza delle strutture lignee per il sostegno della copertura. Le finestre assumono diverse dimensioni (F1-F12), ma sono sempre costituite da telaio in legno e superficie vetrata a vetro singolo, che determina nel complesso cattive prestazioni termiche. Il fattore solare per la singola lastra vetrata è fissato a 0.85, mentre l'emissività è stata considerata pari a 0.84. Per quanto riguarda gli impianti termici, al momento della redazione degli audit energetici, il sottosistema di generazione era costituito da due macchine alimentate a metano installate nel 1992 e 2000, ciascuna delle quali con potenza nominale utile di 1000 kW. I terminali di emissione sono radiatori privi di valvole termostatiche. I rendimenti dei sottosistemi impiantistici sono assunti come da Tab. 40, secondo quanto indicato nell'audit energetico del 2016.

Trattandosi di un edificio storico vincolato, il margine di trasformabilità dell'involucro edilizio di Palazzo Botta è esiguo (Tab. 42). In particolare, non è pensabile intervenire sulle superfici di finitura delle pareti perimetrali fuori terra, né sui solai interpiano. La scelta delle misure di riqualificazione energetica



Fig. 107. Interno dell'Aula Golgi. Fonte: Archivio fotografico di Ateneo.

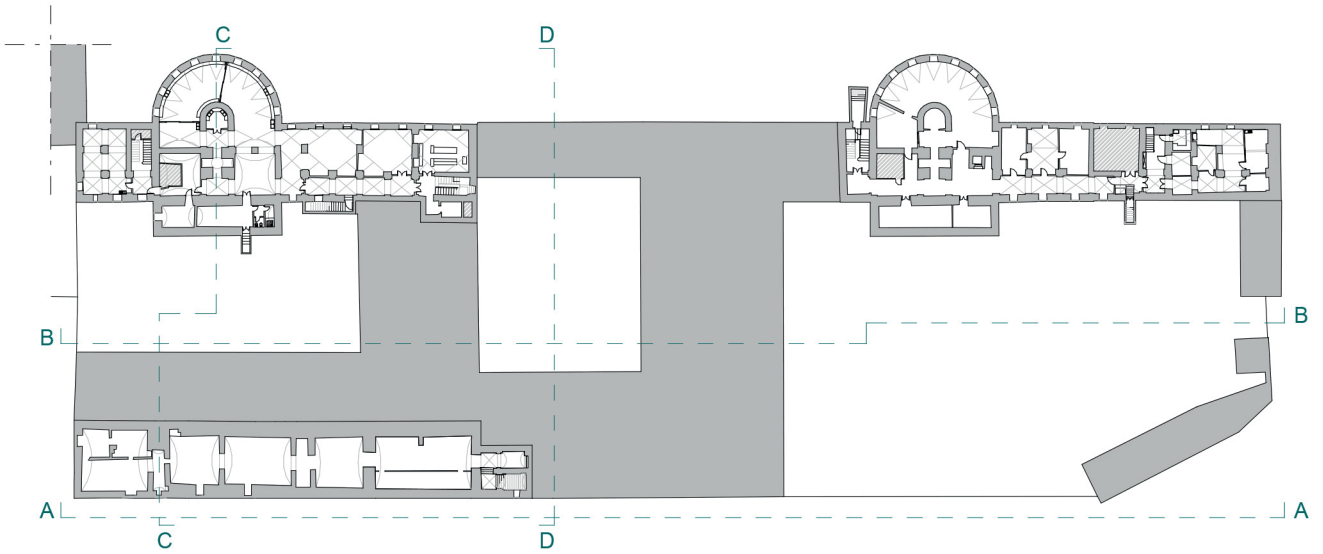


Fig. 108. Interno del Museo di Storia Naturale Kosmos. Fonte: Wikipedia.

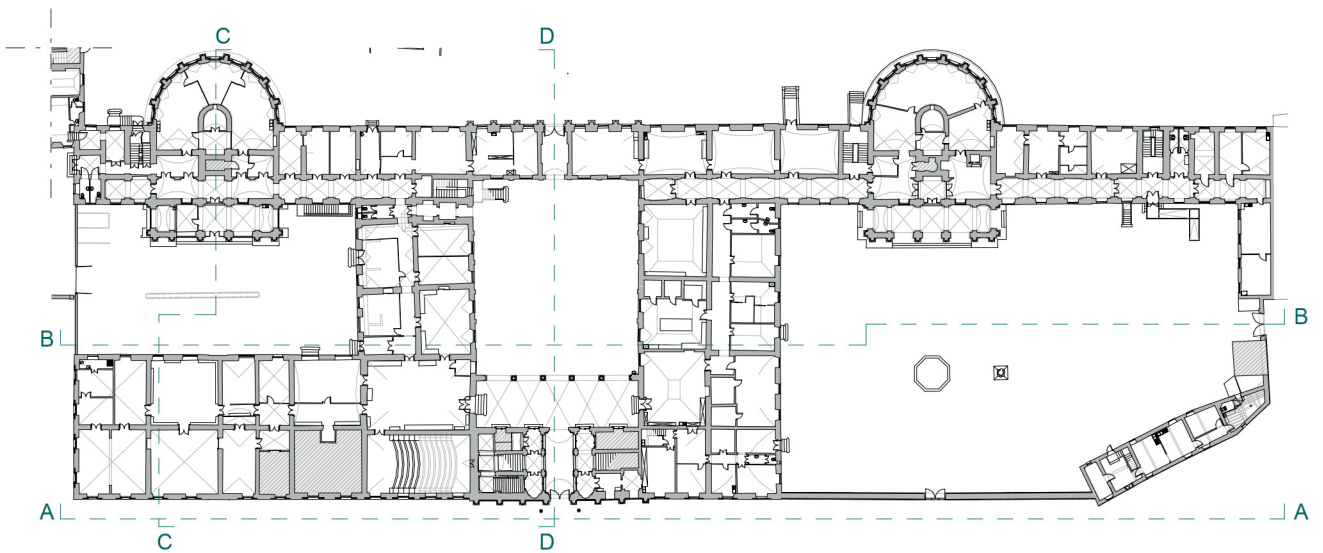
SOTTOSISTEMA	RENDIMENTO
Generazione	87,3 %
Distribuzione	92,2 %
Emissione	89,3 %
Regolazione	86,3 %

Tab. 40. Rendimenti dei sottosistemi impiantistici di Palazzo Botta.

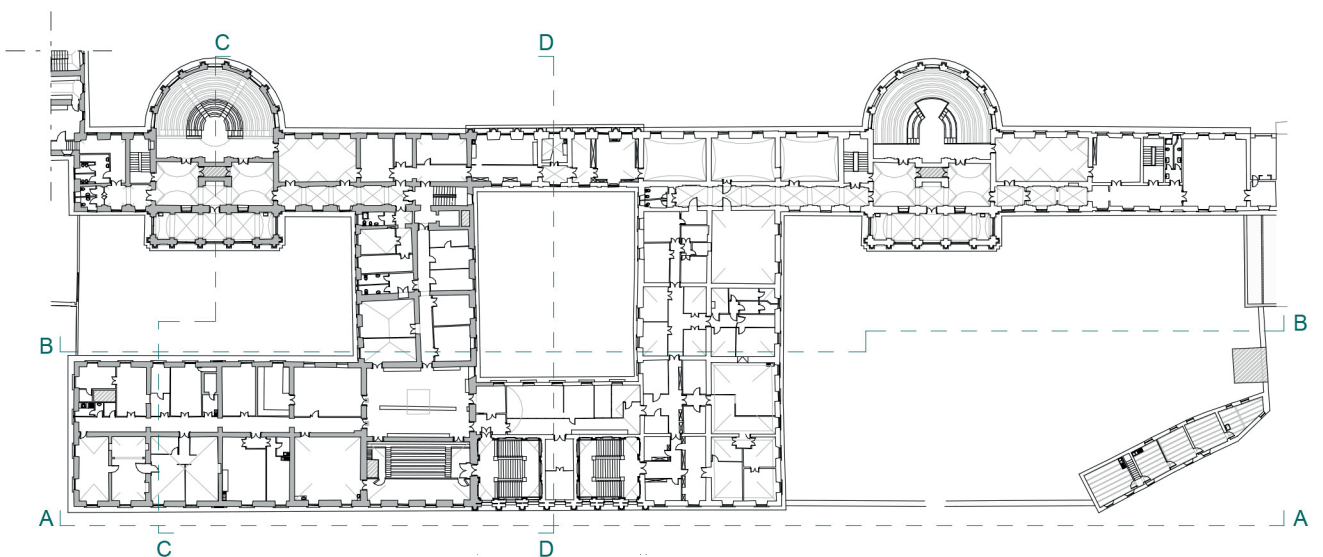
Fig. 109. Nella pagina seguente, piante e sezioni di Palazzo Botta. Elaborazione grafica a cura del Laboratorio STEP del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura.



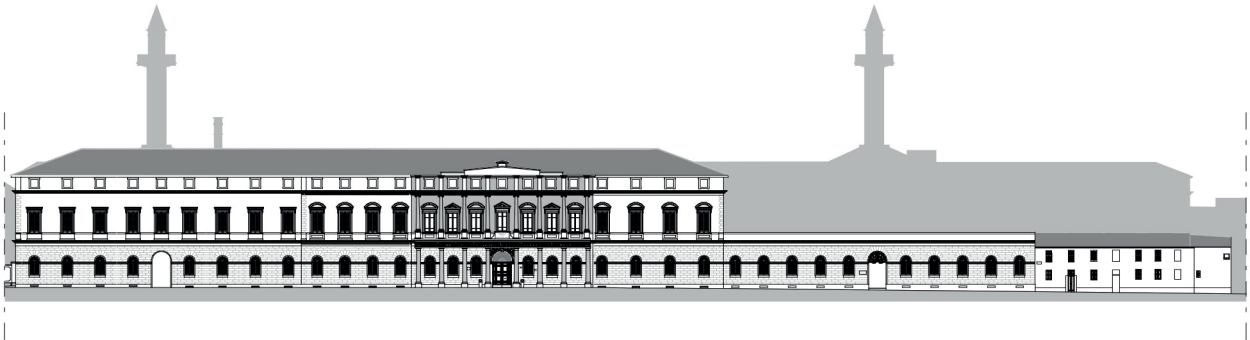
Piano interrato - Scala 1:1000



Piano terra - Scala 1:1000



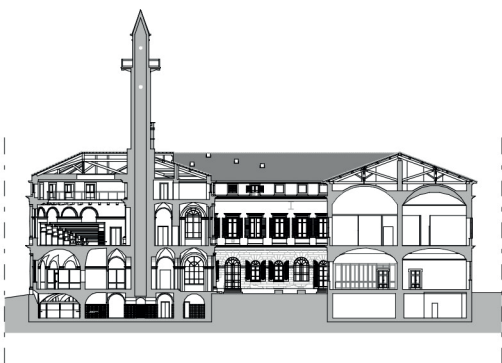
Piano primo - Scala 1:1000



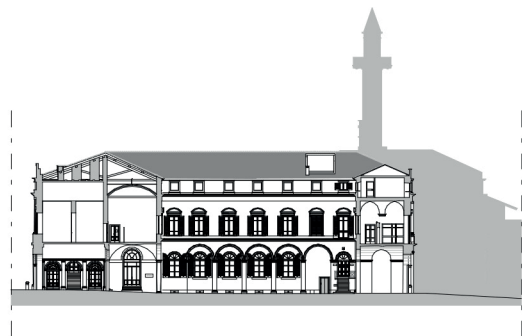
Sezione AA - Scala 1:1000



Sezione BB - Scala 1:1000



Sezione CC - Scala 1:1000



Sezione DD - Scala 1:1000

CODICE	CATEGORIA	TRASMITTANZA	FATT, SOLARE	EMISSIVITA'	FATT, ASSORBIMENTO
		W/m ² K	/	/	/
M01	Muro esterno in laterizio 45 cm	1,503		0,9	0,4
M02	Muro esterno in laterizio 50 cm	1,387		0,9	0,4
M03	Muro esterno in laterizio 55 cm	1,387		0,9	0,4
M04	Muro esterno in laterizio 60 cm	1,202		0,9	0,4
M05	Muro esterno in laterizio 65 cm	1,217		0,9	0,4
M06	Muro esterno in laterizio 70 cm	1,060		0,9	0,4
M07	Muro esterno in laterizio 75 cm	1,001		0,9	0,4
M08	Muro esterno in laterizio 80 cm	0,948		0,9	0,4
M09	Muro esterno in laterizio 85 cm	0,901		0,9	0,4
M10	Muro esterno in laterizio 100 cm	0,783		0,9	0,4
M11	Muro esterno in laterizio 105 cm	0,750		0,9	0,4
M12	Muro esterno in laterizio 110 cm	0,720		0,9	0,4
M13	Muro esterno in laterizio 120 cm	0,667		0,9	0,4
S01	Solaio controterra 32 cm	1,388			
S02	Solaio verso sottotetto 32 cm	1,695			
S03	Solaio loggiati 30 cm	1,733			
P01	Porta esterna vetrata 125x275 cm	4,8	0,75	0,84	
P02	Porta esterna in legno 125x300 cm	3,5		0,98	0,9
P03	Porta esterna in legno 125x360 cm	3,5		0,98	0,9
P04	Porta esterna in legno 125x370 cm	3,5		0,98	0,9
P05	Porta esterna in legno 130x250 cm	3,5		0,98	0,9
P06	Porta esterna in legno 140x285 cm	3,5		0,98	0,9
P07	Porta esterna vetrata 140x365 cm	4,8	0,75	0,84	
P08	Porta esterna in legno 150x370 cm	3,5		0,98	0,9
P09	Porta esterna vetrata 150x350 cm	4,8	0,75	0,84	
P10	Porta esterna in legno 200x410 cm	3,5		0,98	0,9
P11	Porta esterna in legno 215x370 cm	3,5		0,98	0,9
P12	Porta esterna in legno 250x480 cm	3,5		0,98	0,9
F01	Finestra 110x110 cm	4,68	0,85	0,84	
F02	Finestra 120x280 cm	4,83	0,85	0,84	
F03	Finestra 125x255 cm	4,80	0,85	0,84	
F04	Finestra 150x315 cm	4,85	0,85	0,84	
F05	Finestra 125x270 cm	4,83	0,85	0,84	
F06	Finestra 125x275 cm	4,83	0,85	0,84	
F07	Finestra 125x285 cm	4,83	0,85	0,84	
F08	Finestra 140x345	4,83	0,85	0,84	
F09	Finestra 180x375 cm	6,40	0,85	0,84	
F10	Finestra 195x300 cm	5,44	0,85	0,84	
F11	Finestra 220x370 cm	7,62	0,85	0,84	
F12	Finestra 260x470 cm	4,90	0,85	0,84	

può quindi ricadere solo sugli elementi che non contribuiscono alla definizione dell'immagine dell'edificio a patto che, comunque, non causino alterazioni irreversibili della materia. Per questo motivo, si è ritenuto di considerare le classi di intervento che coinvolgono lavorazioni a secco all'estradosso dell'ultimo solaio verso il sottotetto e sulle strutture del piano interrato (pavimento e pareti), il restauro dei serramenti esistenti con sostituzione dell'elemento vetrato e introduzione di sistema vetrocamera e le modifiche al sistema impiantistico, comprendendo la sostituzione dei generatori di calore e l'installazione di valvole termostatiche sui radiatori. Oltre a queste misure, si è scelto di includere altre due possibilità ritenute al limite dell'ammissibilità, nell'idea di studiarne gli effetti, pur essendo a conoscenza delle difficoltà di applicazione: si tratta della sostituzione degli infissi esistenti con modelli più performanti (12.4 e 12.5) e dell'utilizzo di un intonaco termico su tutti i prospetti dell'edificio (1.4).

Come da flusso di lavoro, l'edificio è stato modellato con Autodesk Revit 2018 (Fig. 110), esportato in IFC 4.0 e trasformato in CityGML LOD3 per mezzo dell'attivazione degli script sviluppati nell'ambiente di programmazione VPL Safe FME. Com'è possibile apprezzare dal confronto fra Fig. 110, Fig. 111 e Fig. 112, il modello iniziale, pensato per un utilizzo più generico,

Tab. 41. Nella pagina precedente, caratterizzazione degli elementi tecnici dell'involucro termico di Palazzo Botta.

Tab. 42. Elenco delle ERS considerate ammissibili per Palazzo Botta.

ERS	Descrizione	λ [W/mK]	s[m]	PU[€/m2]
1.4	Isolamento delle pareti esterne con intonaco termico	0,47	0,02	60,05
4.2	Isolamento interno delle pareti dell'interrato con controparete con pannelli in XPS	0,035	0,03	39,73
4.5	Isolamento interno delle pareti dell'interrato con pannelli in lana di roccia	0,039	0,06	78,89
10.1	Isolamento dell'ultimo solaio con pannelli in EPS	0,033	0,03	17,52
10.2	Isolamento dell'ultimo solaio con pannelli in XPS	0,034	0,03	10,88
10.3	Isolamento dell'ultimo solaio con pannelli in lana di roccia	0,034	0,05	26,45
11.6	Isolamento del solaio controterra al piano interrato con massetto isolante con argilla espansa	0,142	0,05	87,40
11.9	Isolamento del solaio controterra al piano interrato con massetto isolante a secco	0,173	0,05	117,86

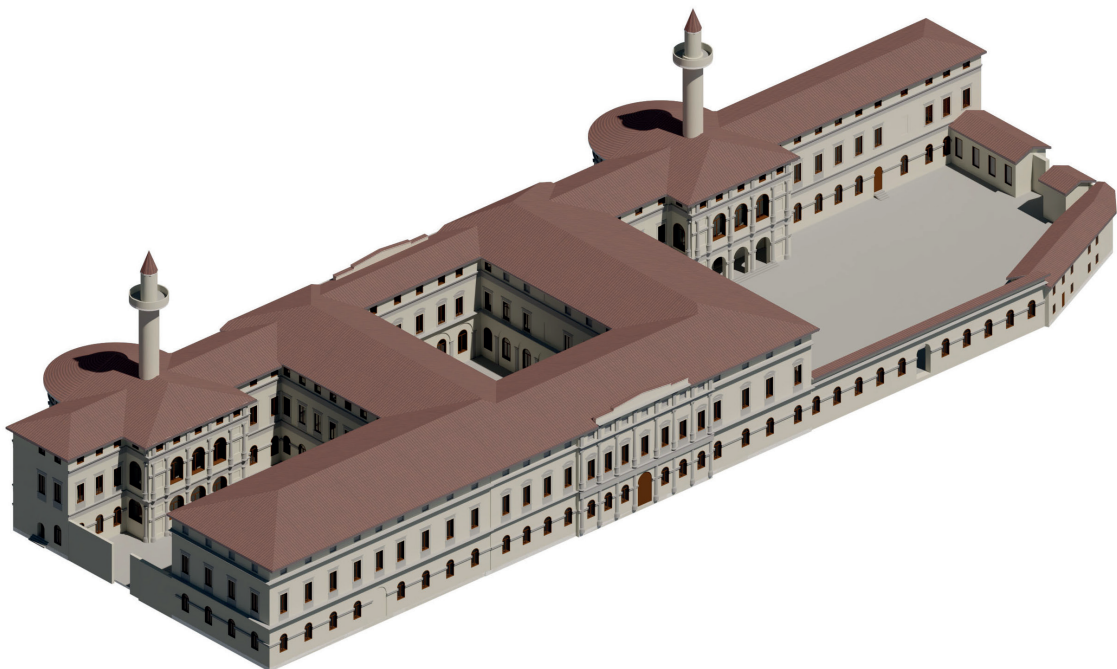
ERS	Descrizione	λ [W/mK]	s[m]	PU[€/m2]
12.2	Restauro dei serramenti esistenti con installazione di vetrocamera 4-12-4	2,8	0,8	276,35
12.3	Restauro dei serramenti esistenti con installazione di vetrocamera 4-12-4 BE	1,58	0,6	331,42
12.4	Nuovi serramenti in legno con vetrocamera 4-12-4	2,8	0,8	598,77
12.5	Nuovi serramenti in legno con vetrocamera 4-12-4 BE	1,58	0,6	699,77

ERS	Descrizione	η	PU[€/cad]
13.1	Nuovo generatore di calore ad alte prestazioni	0,98	11179,62
13.2	Nuovo generatore di calore a condensazione ad alte prestazioni	0,995	34315,90
14.1	Valvole termostatiche con sensore a cera	0,97	56,00
14.2	Valvole termostatiche con sensore a liquido	0,985	68,00
14.3	Valvole termostatiche con sensore a gas	0,995	80,00

è stato definito a con un'accuratezza maggiore rispetto a quanto necessario per la procedura di calcolo. In fase di esportazione verso IFC, il modello viene quindi semplificato, mantenendo le caratterizzazioni grafiche definite per il livello di dettaglio basso di Autodesk Revit. Si nota, inoltre che, nel caso specifico, il modello CityGML non è in grado di trasportare la geometria relativa ai tetti a falde semicircolari che coprono i corpi contenenti le aule didattiche Spallanzani e Golgi, che, invece, erano presenti nella versione IFC. Tuttavia, nella struttura del file sono presenti i riferimenti a tali elementi tecnici, di cui vengono preservate tutte le proprietà non grafiche. Fatte salve queste considerazioni, il modello può essere riversato nel database informativo, già definito sulla base dello schema logico di CityGML, arricchito della EM_ADE, di cui si è già trattato in precedenza. Dalla base di dati è quindi possibile estrarre le informazioni rilevanti per l'esecuzione della procedura di calcolo che ha luogo in Mathworks Matlab R2019a. In particolare, vengono formattate le matrici SDF (che consta di 478 righe, corrispondenti al numero di elementi che costituiscono l'edificio), ERS, Dati_economici e Dati_climatici, che servono da input per la fase di simulazione.

Poiché si tratta della prima sperimentazione completa, si è ritenuto opportuno validare i risultati relativi allo stato di fatto, attraverso il confronto con un software per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici certificato dal CTI per la conformità di calcolo alle norme UNI/TS 11300. A questo scopo, l'ala sudorientale del Palazzo (Fig. 113) è stata modellata e simulata all'interno della piattaforma Acca Software TerMus (Fig. 114), utilizzata nella sua versione 42.00. Per la porzione di edificio considerata, gli esiti del calcolo si dimostrano allineati,

Fig. 110. Modello di Palazzo Botta realizzato con Autodesk Revit 2018.



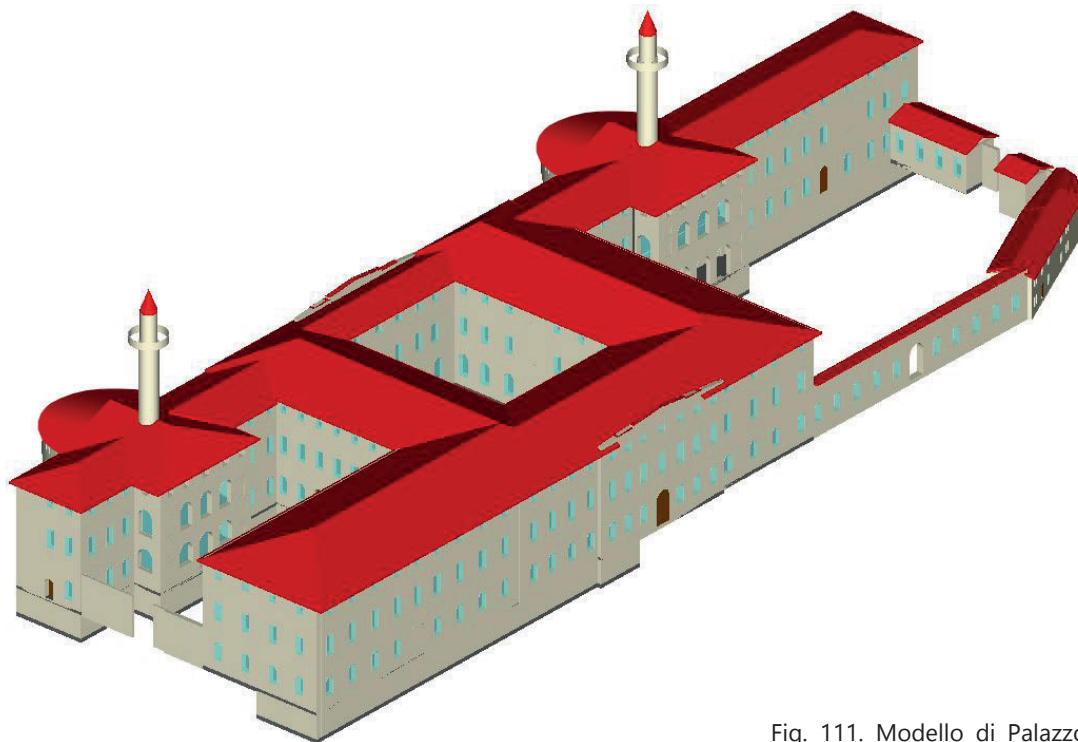


Fig. 111. Modello di Palazzo Botta in IFC 4.0, visualizzato con FZKViewer.

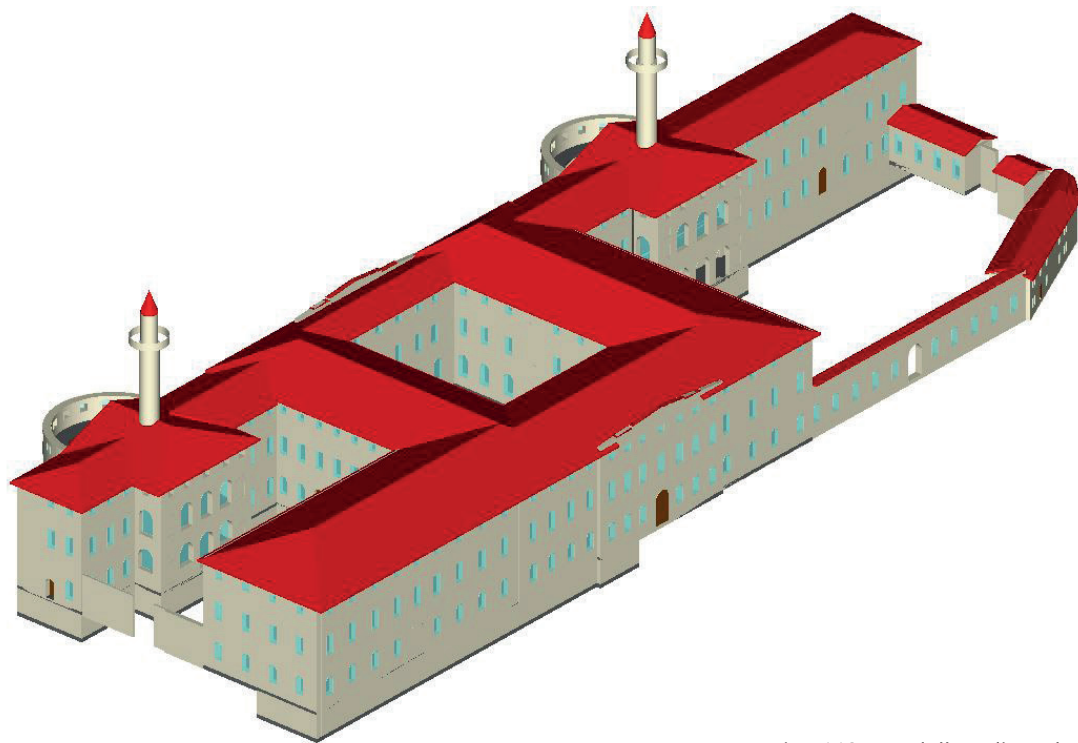


Fig. 112. Modello di Palazzo Botta in CityGML LOD3, visualizzato con FZKViewer.

sia nella determinazione globale del $Q_{H,nd}$, che nella valutazione dei valori parziali $Q_{H,ht}$ e Q_{int} . L'unica eccezione è rilevabile nel computo dei contributi riconducibili agli apporti solari incidenti sulle superfici opache e trasparenti dell'edificio, che risulta spostato del 10%. Un'indagine più approfondita ha permesso di ricondurre questa difformità al diverso modo in cui il software di calcolo e la procedura riportata in Matlab calcolano l'extraflusso termico per radiazione infrarossa verso la volta celeste, che può essere considerato come incremento delle dispersioni per trasmissione oppure come riduzione degli apporti solari complessivi.

Il calcolo in tre step arriva alla determinazione dei valori del Costo Globale unitario [€/m³] e del Fabbisogno di energia termica annuale [kWh/m³a] per lo stato di fatto (SDF), nel caso di

Fig. 113. Vista assonometrica in Autodesk Revit della porzione di Palazzo Botta considerata per la validazione del calcolo con Acca Termus.

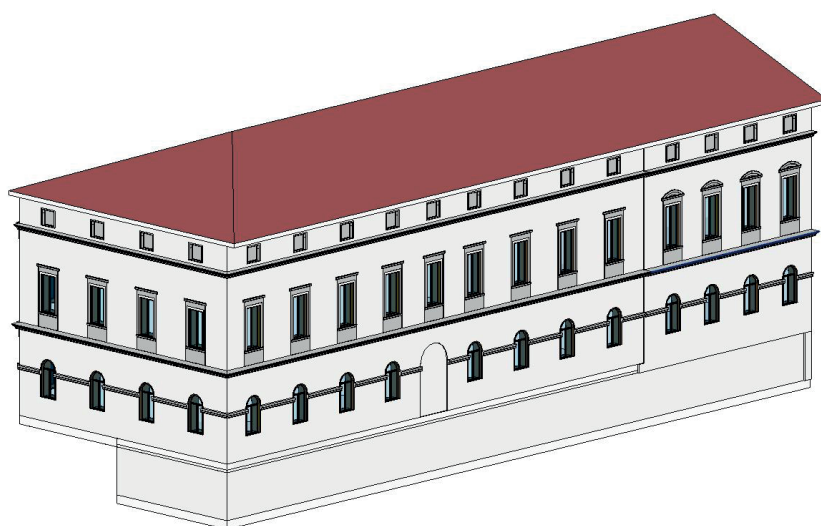


Fig. 114. Pianta del piano terra dell'ala sud est di Palazzo Botta nella piattaforma software Acca Termus.



Tab. 43. Valori ottenuti dal calcolo con il processo implementato in Matlab e mediante la simulazione con Termus.

VOCE		UdM	MATLAB	TERMUS	DIFFERENZA
Fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento	$Q_{H,nd}$	kWh	298805,71	302276,12	1,1%
Scambio termico totale	$Q_{H,ht}$	kWh	374316,93	377504,45	0,8%
Apporti termici totali	Q_{int}	kWh	76328,69	78556,58	2,8%

applicazione delle singole misure di riqualificazione energetica (ERS) e per gli scenari energetici (ES) composti, restituendo rispettivamente 1, 17 e 4302 punti sul grafico cartesiano. Di quest'ultimo gruppo, 25 soluzioni compongono la frontiera di Pareto del problema.

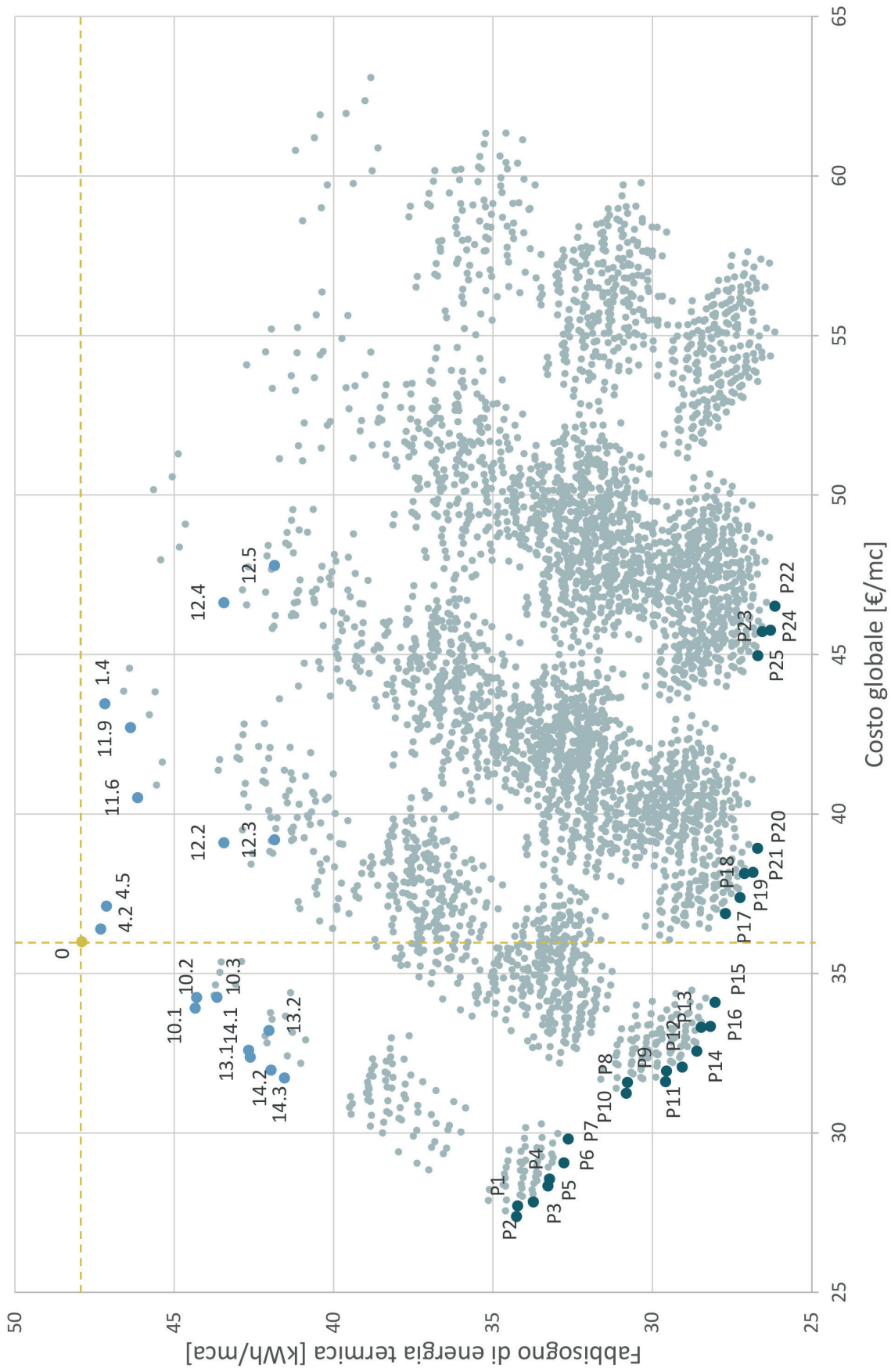
In Fig. 115 è possibile vedere il risultato complessivo dei tre processi di calcolo, in cui:

- Lo stato di fatto inalterato è rappresentato dal punto giallo numero zero, da cui partono due direttrici atte a suddividere il piano cartesiano in relazione ai valori di costo globale e fabbisogno energetico corrispondenti;
- Le analisi svolte sulle ERS sono identificate dai punti azzurri, numerati secondo il codice a due cifre riferito a Tab. 35;
- Tutte le iterazioni di calcolo corrispondenti alle ES sono visualizzate attraverso i punti grigio chiaro;
- Le soluzioni appartenenti alla frontiera di Pareto sono rappresentate da punti color petrolio e individuate da un codice numerico progressivo preceduto dalla lettera P.

Allo stato di fatto, Palazzo Botta risulta avere un costo di gestione energetica pari a 36.0 €/m³ nel periodo di calcolo e un fabbisogno energetico per il riscaldamento di 47.9 kWh/m³a. L'ultimo valore è superiore a quello indicato nell'audit energetico dell'edificio, in quanto è stato calcolato in vista della rifunzionalizzazione completa della struttura, prevedendo quindi lo sfruttamento di più di 50'000 m³ di volume riscaldato. Inoltre, occorre sottolineare che i risultati delle due elaborazioni non sono direttamente confrontabili in quanto la procedura cost-optimal è stata basata sulle condizioni di esercizio standard per la redazione degli Attestati di Prestazione Energetica, mentre gli audit hanno considerato i termini di uso reali dell'edificio, tenendo conto.

Cominciando da un'analisi generale dello spazio del grafico, è possibile notare che, rispetto allo stato di fatto, tutte le soluzioni applicate riducono il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale, mentre solo la minor parte di esse determina anche un risparmio in termini economici sul ciclo di vita. Ciò è dovuto, per il caso in esame, agli alti costi di investimento iniziali, associati alle grandi estensioni delle superfici dell'involucro termico, che difficilmente riescono a far rientrare l'investimento nel periodo di calcolo ventennale. Nel dettaglio, focalizzando l'attenzione sulle soluzioni elementari di riqualificazione energetica, una contrazione dei costi di gestione legati all'energia è apprezzabile solo nei casi di intervento sull'ultimo solaio verso il sottotetto non riscaldato (10.1, 10.2 e 10.3) e per le azioni trasformatrici che coinvolgono i componenti impiantistici (sostituzione del generatore di calore - 13.1 e 13.2 - e applicazione di valvole termostatiche ai terminali di emissione - 14.1, 14.2 e 14.3). L'intervento sulle componenti finestrate (12.2, 12.3, 12.4 e

Fig. 115. Nella pagina successiva, risultato dell'analisi cost-optimal applicata al caso studio di Palazzo Botta. In giallo, il punto zero rappresenta lo stato di fatto inalterato, i punti azzurri corrispondono alle ERS e sono identificati dal corrispettivo codice numerico, i punti grigio chiaro illustrano la totalità delle iterazioni di calcolo e, infine, i punti color petrolio individuati da un numero preceduto dalla lettera P costituiscono i risultati appartenenti alla frontiera di Pareto.



COD	GC [€/m³]	Δ	Qp,H [kWh/m³a]	Δ
1.4	43,454	20,7%	47,177	-1,5%
4.2	36,396	1,1%	47,307	-1,2%
4.5	37,114	3,1%	47,124	-1,6%
10.1	34,247	-4,9%	44,298	-7,5%
10.2	33,915	-5,8%	44,340	-7,4%
10.3	34,257	-4,8%	43,661	-8,8%
11.6	40,510	12,5%	46,146	-3,7%
11.9	42,711	18,7%	46,370	-3,2%
12.2	39,099	8,6%	43,445	-9,3%
12.3	39,190	8,9%	41,854	-12,6%
12.4	46,627	29,5%	43,445	-9,3%
12.5	47,789	32,8%	41,854	-12,6%
13.1	32,595	-9,4%	42,669	-10,9%
13.2	33,211	-7,7%	42,026	-12,3%
14.1	32,379	-10,0%	42,615	-11,0%
14.2	31,967	-11,2%	41,966	-12,4%
14.3	31,727	-11,9%	41,544	-13,3%
P1	27,717	-23,0%	34,226	-28,5%
P2	27,378	-23,9%	34,259	-28,5%
P3	27,836	-22,7%	33,734	-29,6%
P4	28,553	-20,7%	33,225	-30,6%
P5	28,338	-21,3%	33,277	-30,5%
P6	29,060	-19,3%	32,775	-31,6%
P7	29,811	-17,2%	32,636	-31,9%
P8	31,583	-12,3%	30,785	-35,7%
P9	31,945	-11,2%	29,556	-38,3%
P10	31,244	-13,2%	30,818	-35,7%
P11	31,606	-12,2%	29,589	-38,2%
P12	32,064	-10,9%	29,064	-39,3%
P13	33,341	-7,4%	28,175	-41,2%
P14	32,567	-9,5%	28,606	-40,3%
P15	34,092	-5,3%	28,036	-41,5%
P16	33,316	-7,4%	28,465	-40,6%
P17	36,879	2,5%	27,710	-42,1%
P18	38,172	6,1%	26,842	-44,0%
P19	37,382	3,9%	27,252	-43,1%
P20	38,923	8,1%	26,702	-44,3%
P21	38,131	5,9%	27,111	-43,4%
P22	46,513	29,2%	26,153	-45,4%
P23	45,715	27,0%	26,554	-44,6%
P24	45,762	27,1%	26,293	-45,1%
P25	44,966	24,9%	26,695	-44,3%

Tab. 44. Soluzioni numeriche della procedura cost-optimal in relazione alle ERS e alle ES che generano la frontiera di Pareto del problema. In verde sono evidenziati i valori associati a una contrazione dei costi in termini energetici o economici, mentre in rosso vengono segnalate le soluzioni che provocano un aumento del costo di gestione sul ciclo di vita.

Tab. 45. Combinazione di ERS per la realizzazione delle ES appartenenti alla frontiera di Pareto.

ES	N ERS	ERS
P1	3	10.1+13.1+14.3
P2	3	10.2+13.1+14.3
P3	3	10.3+13.1+14.3
P4	3	10.3+13.2+14.3
P5	4	4.2+10.3+13.1+14.3
P6	4	4.2+10.3+13.2+14.3
P7	4	4.5+10.3+13.2+14.3
P8	4	10.1+12.2+13.1+14.3
P9	4	10.1+12.3+13.1+14.3
P10	4	10.2+12.2+13.1+14.3
P11	4	10.2+12.3+13.1+14.3
P12	4	10.3+12.3+13.1+14.3
P13	5	4.2+10.3+12.3+13.2+14.3
P14	5	4.2+10.3+12.3+13.1+14.3
P15	5	4.5+10.3+12.3+13.2+14.3
P16	5	4.5+10.3+12.3+13.1+14.3
P17	5	10.3+11.6+12.3+13.1+14.3
P18	6	4.2+10.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P19	6	4.2+10.3+11.6+12.3+13.1+14.3
P20	6	4.5+10.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P21	6	4.5+10.3+11.6+12.3+13.1+14.3
P22	7	1.4+4.5+10.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P23	7	1.4+4.5+10.3+11.6+12.3+13.1+14.3
P24	7	1.4+4.2+10.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P25	7	1.4+4.2+10.3+11.6+12.3+13.1+14.3

12.5) risulta sempre molto costoso, specialmente nel caso della sostituzione, nonostante comporti risultati efficaci dal punto di vista energetico, in particolar modo quando si considera l'installazione di elementi tecnici particolarmente performanti. Un risultato interessante è, poi, quello legato alla simulazione dell'applicazione di un intonaco termico ai prospetti dell'edificio, possibilità già ritenuta difficilmente percorribile in fase di valutazione dell'ammissibilità delle ERS. Per questa ipotesi, si determina un importante incremento dei costi di gestione nel periodo di calcolo considerato (20.7%), associato a un minimo vantaggio dal punto di vista energetico, elementi che permettono di escludere questa strategia progettuale anche dal punto di vista della fattibilità tecnico-economica.

Passando all'esame della frontiera di Pareto del problema (Tab. 45), si individua una spezzata composta da 25 punti, sedici dei quali comportano un risparmio sia energetico che economico. Tra di essi, la soluzione P2 (ERS 10.2+13.1+14.3) è quella che determina il minor costo globale, provocando una riduzione dei costi di gestione del 23.9% nel periodo di

calcolo, associata a un abbassamento del consumo di energia termica per il riscaldamento del 28.5% rispetto alla situazione iniziale. All'estremo opposto, il punto P22 (ERS 1.4+4.5+10.3+11.6+12.3+13.2+14.3) individua il risultato per il quale si ha il maggiore risparmio energetico, che arriva quasi a dimezzare i consumi dell'edificio, con una riduzione pari al 45.4%, a fronte, però, di una maggiorazione della spesa di gestione del 29.2%, dovuta all'applicazione simultanea di sette diverse misure di riqualificazione energetica, che comportano un importante investimento iniziale. E' possibile notare, infatti, che gli ultimi quattro scenari progettuali, che sono associati al raggiungimento delle migliori prestazioni energetiche, utilizzano il maggior numero possibile di strategie elementari di riqualificazione, comprendendo anche l'applicazione dell'intonaco termico alle pareti perimetrali (ERS1.4), una soluzione il cui utilizzo non appare raccomandabile a partire dall'analisi effettuata sulle ERS, in quanto genera un minimo risparmio energetico comportando un grande aumento dei costi di gestione. Guardando una diversa schematizzazione esplicitiva della composizione degli ES (Tab. 46), si comprende che alcune misure elementari non

Tab. 46. Combinazione di ERS per la realizzazione delle ES appartenenti alla frontiera di Pareto. In grigio sono segnalate le misure elementari che non compaiono mai nelle soluzioni ottimali.

	1.4	4.2	4.5	10.1	10.2	10.3	11.6	11.9	12.2	12.3	12.4	12.5	13.1	13.2	14.1	14.2	14.3
P1				■				■			■	■	■		■		■
P2					■			■			■	■	■		■		■
P3						■		■			■	■	■		■		■
P4								■			■	■	■		■		■
P5		■						■			■	■	■		■		■
P6		■						■			■	■	■		■		■
P7			■					■			■	■	■		■		■
P8				■				■	■		■	■	■		■		■
P9				■				■		■	■	■	■		■		■
P10					■			■	■		■	■	■		■		■
P11					■			■		■	■	■	■		■		■
P12						■		■		■	■	■	■		■		■
P13		■						■			■	■	■		■		■
P14		■						■			■	■	■		■		■
P15			■					■			■	■	■		■		■
P16			■					■			■	■	■		■		■
P17		■					■	■		■	■	■	■		■		■
P18		■					■	■		■	■	■	■		■		■
P19		■					■	■		■	■	■	■		■		■
P20			■					■			■	■	■		■		■
P21			■					■			■	■	■		■		■
P22	■		■				■	■		■	■	■	■		■		■
P23								■			■	■	■		■		■
P24								■			■	■	■		■		■
P25	■							■			■	■	■		■		■

concorrono mai alla formazione della frontiera di Pareto. In particolare, gli scenari progettuali che includono la sostituzione dei serramenti esistenti (12.4 e 12.5) sono sempre esclusi dagli insiemi ottimali, determinando così la scarsa efficienza tecnico-economica dei relativi interventi, che va a sommarsi a una già menzionata attuazione discutibile in relazione al sistema vincolistico che caratterizza il bene in esame. Ancora, l'isolamento del solaio controterra al piano interrato con massetto isolante a secco non risulta mai competitivo rispetto allo stesso intervento attuato a umido mediante argilla espansa, anche se in funzione delle caratteristiche dell'edificio, un'operazione a più alto grado di reversibilità potrebbe risultare comunque preferibile. In ultima, con riferimento alle tre alternative proposte per il miglioramento del sottosistema di regolazione dell'impianto termico, la soluzione più costosa e più efficace, ossia quella che comprende l'installazione delle valvole termostatiche più sofisticate, appare sempre premiale rispetto alle altre due, restituendo un beneficio in termini energetici che va a colmare il relativo sovrapprezzo.

4.3.2. Palazzo San Felice

Palazzo San Felice è un ex complesso monastico attualmente sede del Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali e del Dipartimento di Psicologia, situato nella parte nordoccidentale del centro storico di Pavia, nelle immediate vicinanze di Palazzo Botta Adorno. Allo stato attuale, l'edificio si articola intorno a quattro cortili in diversi corpi di fabbrica a due livelli, costituendo un complesso che è solo apparentemente unitario, in virtù della lunga storia che ne ha caratterizzato la costruzione (Fig. 116). Le parti più antiche sono antecedenti all'anno mille e sono state riconosciute in corrispondenza della ex chiesa [322], che giace tutt'ora parallela a Via S. Felice al Monastero, inglobata nel prospetto sud della costruzione, ma ben riconoscibile per la

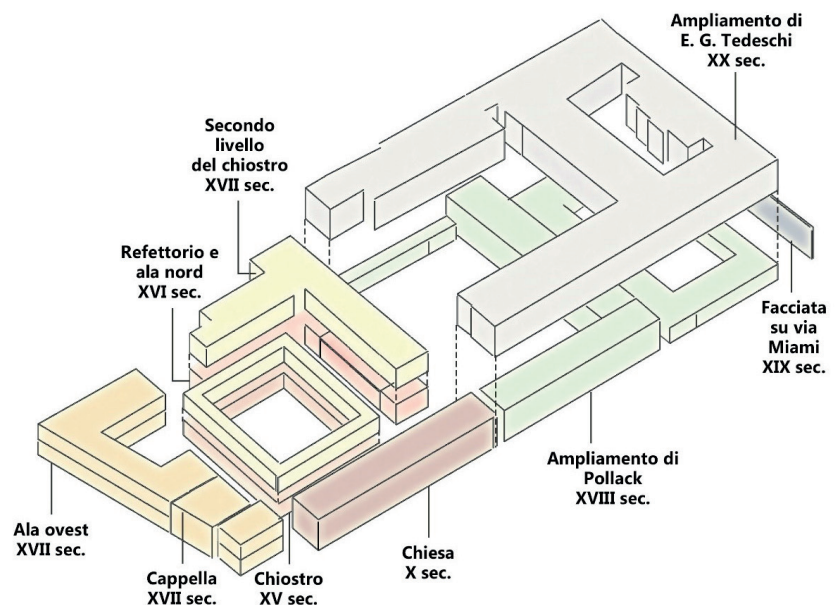


Fig. 116. Schema volumetrico della stratificazione storica che caratterizza l'edificio [323].

muratura facciavista che interrompe in lungo fronte intonacato (Fig. 117). Dopo la prima fase edificatoria, ad opera dei monaci Benedettini, la trama storica dell'edificio si fa poco chiara, a causa della mancanza di documentazioni grafiche che si protraggono fino al XVII sec. [323]. Tuttavia, è noto che sul finire del XV secolo si sia tenuta un'importante opera di rinnovamento che ha coinvolto la fabbrica nella sua interezza e che ha portato all'edificazione del chiostro porticato situato in adiacenza alla chiesa (Fig. 118). Nel corso del XVI secolo la costruzione prosegue con la realizzazione del refettorio che si affaccia sul lato orientale del chiostro, mentre nel secolo successivo il complesso si allarga verso ovest, con una nuova ala, nella quale venne compresa una cappella ottagonale dedicata alla Madonna. La storia religiosa dell'edificio si conclude nel 1785, quando il monastero viene soppresso e, poco dopo, l'architetto Leopoldo Pollack viene incaricato di trasformare il complesso in un orfanotrofio. I lavori, che si concludono nel 1792, comportano un grande ampliamento dell'edificio, che si arricchisce di altri due chiostri dilatandosi verso est [324].

Nel corso del XIX sec. si susseguono diversi interventi minori, fino al restauro dell'architetto Emilio Aschieri, che opera una rimozione di alcune superfetazioni di scarso valore storico. Nel 1980 l'Università di Pavia acquisisce il complesso, con lo scopo di trasferirvi la Facoltà di Economia. A tale passaggio di proprietà coincidono importanti lavori di ristrutturazione guidati dall'architetto Eugenio Gentili Tedeschi, che prevede una riorganizzazione degli spazi e un ampliamento al secondo livello, in corrispondenza delle parti edificate da Pollack [325].

L'involucro dell'edificio è costituito da pareti in muratura piena di diversi spessori (M01-M14), per la maggior parte intonacate di colore giallo-ocra, caratterizzate da trasmittanze fra 0,58 e 1,8 W/m²K, con emissività presa pari a 0,9 e fattore di assorbimento

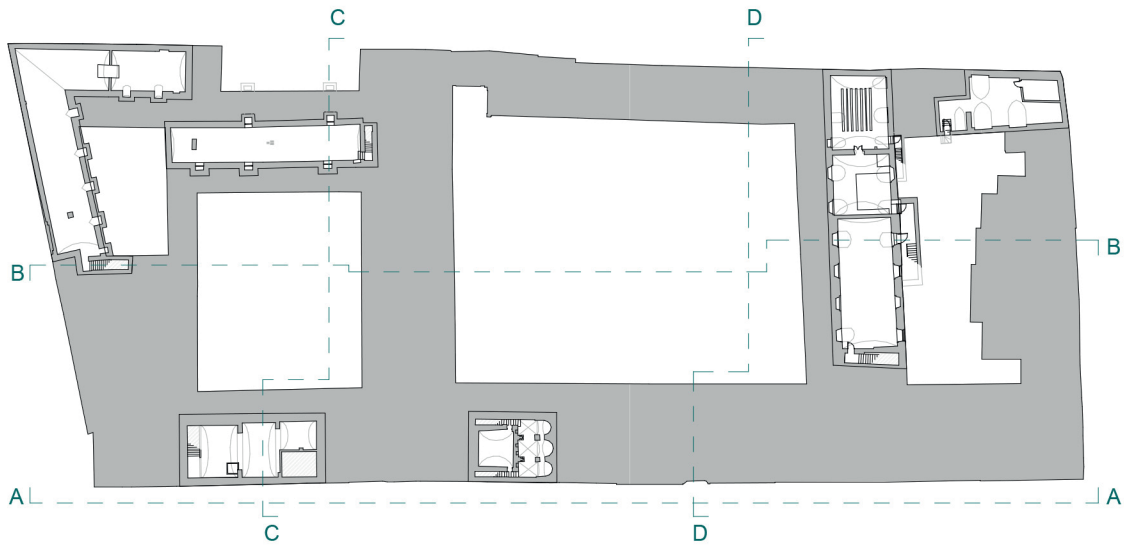


Fig. 117. Vista del prospetto su Via San Felice al Monastero. Si noti la parte ottocentesca, finita in intonaco, accostata alla chiesa in muratura facciavista. Fonte: Archivio fotografico di Ateneo.

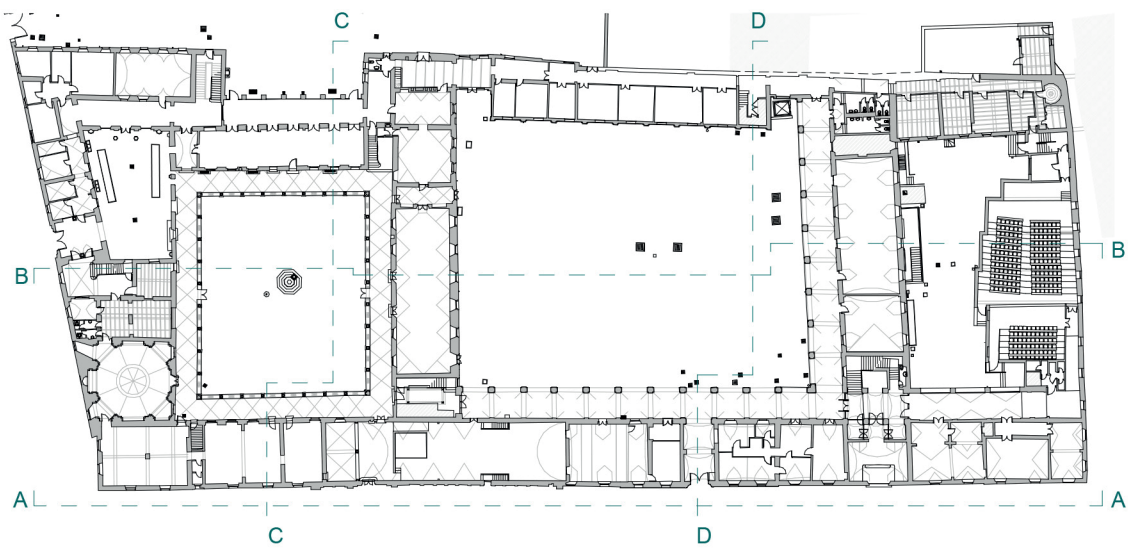


Fig. 118. Chiostro porticato costruito nel XV sec. in adiacenza alla chiesa. Fonte: LombardiaBeniCulturali

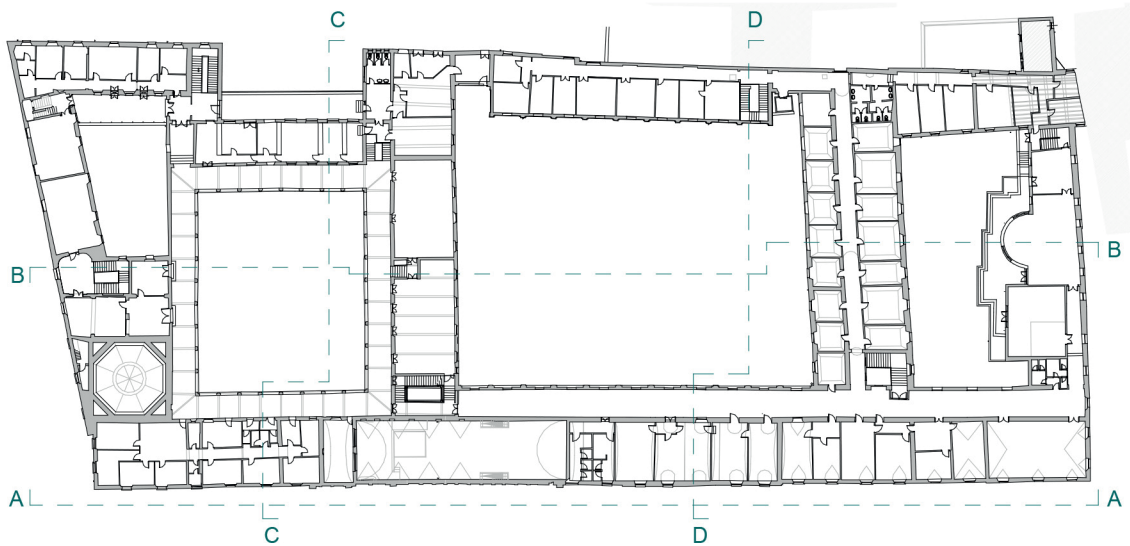
Fig. 119. Nella pagina seguente, piante e sezioni di Palazzo San Felice. Elaborazione grafica a cura del Laboratorio STEP del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura.



Piano interrato - Scala 1:1000



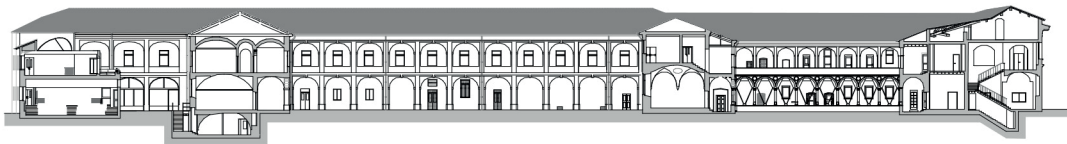
Piano terra - Scala 1:1000



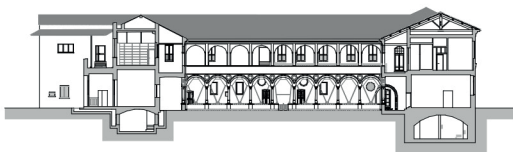
Piano primo - Scala 1:1000



Sezione AA - Scala 1:1000



Sezione BB - Scala 1:1000



Sezione CC - Scala 1:1000



Sezione DD - Scala 1:1000

CODICE	CATEGORIA	TRASMITTANZA FATT, SOLARE EMISSIVITA' FATT, ASSORBIMENTO			
		W/m ² K	/	/	/
M01	Muro esterno in laterizio 35 cm	1,805		0,9	0,4
M02	Muro esterno in laterizio 40 cm	1,640		0,9	0,4
M03	Muro esterno in laterizio 45 cm	1,503		0,9	0,4
M04	Muro esterno in laterizio 50 cm	1,387		0,9	0,4
M05	Muro esterno in laterizio 55 cm	1,387		0,9	0,4
M06	Muro esterno in laterizio 60 cm	1,202		0,9	0,4
M07	Muro esterno in laterizio 65 cm	1,217		0,9	0,4
M08	Muro esterno in laterizio 65 cm - FV	1,221		0,8	0,6
M09	Muro esterno in laterizio 70 cm	1,060		0,9	0,4
M10	Muro esterno in laterizio 75 cm	1,001		0,9	0,4
M11	Muro esterno in laterizio 80 cm	0,948		0,9	0,4
M12	Muro esterno in laterizio 90 cm	0,858		0,9	0,4
M13	Muro esterno in laterizio 100 cm	0,783		0,9	0,4
M14	Muro esterno in laterizio 140 cm	0,581		0,9	0,4
S01	Solaio controterra 40 cm	1,287			
S02	Solaio verso sottotetto 32 cm	1,695			
S03	Solaio loggiati 30 cm	1,733			
P01	Porta esterna in legno 90x215 cm	2,14		0,98	0,9
P02	Porta esterna vetrata 90x235 cm	3,68	0,75	0,9	
P03	Porta esterna in legno 110x220 cm	2,14		0,98	0,9
P04	Porta esterna in legno 115x260 cm	2,14		0,98	0,9
P05	Porta esterna in legno 120x210 cm	2,14		0,98	0,9
P06	Porta esterna in legno 125x225 cm	2,14		0,98	0,9
P07	Porta esterna in legno 125x300 cm	2,07		0,98	0,9
P08	Porta esterna in legno 150x370 cm	2,07		0,98	0,9
P09	Porta esterna in legno 150x225 cm	2,07		0,98	0,9
P10	Porta esterna in legno 150x270 cm	2,07		0,98	0,9
P11	Porta esterna in legno 240x315 cm	2,04		0,98	0,9
P12	Porta esterna in legno 275x325 cm	2,04		0,98	0,9
F01	Finestra 70x210 cm	3,14	0,75	0,84	
F02	Finestra 90x175 cm	2,90	0,75	0,84	
F03	Finestra 95x200 cm	3,08	0,75	0,84	
F04	Finestra 95x210 cm	3,11	0,75	0,84	
F05	Finestra 100x210 cm	3,17	0,75	0,84	
F06	Finestra 115x200 cm	3,18	0,75	0,84	
F07	Finestra 115x210 cm	3,21	0,75	0,84	
F08	Finestra 115x245 cm	3,36	0,75	0,84	
F09	Finestra 130x215 cm	3,28	0,75	0,84	
F10	Finestra 130x230 cm	3,38	0,75	0,84	
F11	Chiusura vetrata 390x250 cm	2,41	0,75	0,84	

0,4. Per le pareti non intonacate (M08), invece, sono stati assunti un'emissività di 0.8 e un fattore di assorbimento di 0.6, legato al colore più scuro della superficie di finitura. Per il calcolo energetico, i solai sono stati raggruppati in tre categorie prevalenti, come suggerito dagli audit energetici, individuando diverse stratigrafie per gli orizzontamenti controterra (S01), verso il sottotetto non riscaldato (S02) e per i solai piani costruiti in corrispondenza di logge e terrazze (S03). Porte e finestre assumono forme estremamente variabili, determinate sia dalle dimensioni che dai materiali impiegati. Le porte esterne sono realizzate in grande prevalenza in legno massiccio, mentre le finestre risultano costituite per lo più da telai in legno con sistema vetrocamera, con qualche eccezione nelle parti di recente edificazione, sulle quali si trovano, invece, serramenti in PVC, sempre con vetrocamera a due lastre.

In relazione al sistema impiantistico, il complesso è servito da due centrali termiche distinte a servizio del palazzo e dell'ambiente dell'ex chiesa. Ai fini del presente caso studio, è stata presa in considerazione solo la centrale termica principale, escludendo lo spazio dell'ex chiesa, che risulta condizionato da un sistema misto ad aria e ad acqua di recente realizzazione. Il sistema impiantistico dedicato al complesso edilizio è caratterizzato, invece, da due generatori di calore alimentati a metano: il primo di potenza termica utile pari a 880 kW e il secondo a condensazione, caratterizzato da una potenza utile di 245 kW. Questi servono sia il sistema di emissione a radiatori (privi di valvole termostatiche), che il circuito di acqua calda sanitaria. I rendimenti dei sottosistemi impiantistici sono assunti come da Tab. 48, secondo quanto indicato nell'audit energetico del 2016.

Come nel caso precedentemente analizzato, anche in questa simulazione ci si trova di fronte ad un edificio storico vincolato, la cui dichiarazione di interesse pubblico risale addirittura al 1910. Risulta, quindi, di nuovo evidente che gli interventi ammissibili sull'involucro edilizio non potranno che essere limitati (Tab. 49), da eseguirsi, eventualmente, solo in corrispondenza delle parti o degli elementi tecnici che hanno già subito alterazioni o sostituzioni in tempi recenti. Per questo motivo, a partire dall'elenco iniziale delle ERS, la selezione delle misure di riqualificazione energetica ammissibili si restringe in modo consistente, escludendo qualsiasi categoria di lavorazione che comporti la modifica determinante e/o irreversibile della materia e dell'aspetto originali dell'opera, così com'è stata composta nei secoli lungo i quali si è sviluppata. In virtù di ciò, sono state considerate le strategie progettuali incidenti sugli elementi tecnici che non concorrono primariamente alla definizione del sistema di valori dell'edificio, come quelli prospettanti sugli spazi del sottotetto e dell'interrato o sulla copertura piana dell'ala est, agendo comunque per quanto possibile attraverso interventi

Tab. 47. Nella pagina precedente, caratterizzazione degli elementi tecnici dell'involucro termico di Palazzo San Felice.

Tab. 48. Rendimenti dei sottosistemi impiantistici di Palazzo San Felice.

SOTTOSISTEMA	RENDIMENTO
Generazione	91,8 %
Distribuzione	98,6 %
Emissione	95,7 %
Regolazione	88,0 %

ERS	Descrizione	λ [W/mK]	s[m]	PU[€/m ²]
4.2	Isolamento interno delle pareti dell'interrato con controparete con pannelli in XPS	0,035	0,03	39,73
4.5	Isolamento interno delle pareti dell'interrato con pannelli in lana di roccia	0,039	0,06	79,89
10.1	Isolamento dell'ultimo solaio con pannelli in EPS	0,034	0,03	17,52
10.2	Isolamento dell'ultimo solaio con pannelli in XPS	0,034	0,03	10,88
10.3	Isolamento dell'ultimo solaio con pannelli in lana di roccia	0,034	0,05	26,45
8.2	Isolamento del tetto piano all'estradosso con pannelli in XPS	0,034	0,03	10,88
8.3	Isolamento del tetto piano all'estradosso con pannelli in lana di roccia	0,034	0,05	26,45
9.1	Isolamento del tetto piano all'intradosso con pannelli in EPS	0,033	0,03	33,15
9.2	Isolamento del tetto piano all'intradosso con pannelli in XPS	0,034	0,04	34,21
11.6	Isolamento del solaio controterra al piano interrato con massetto isolante con argilla espansa	0,142	0,05	87,40
11.9	Isolamento del solaio controterra al piano interrato con massetto isolante a secco	0,173	0,05	117,86

ERS	Descrizione	λ [W/mK]	s[m]	PU[€/m ²]
12.3	Restauro dei serramenti esistenti con installazione di vetrocamera 4-12-4 BE	1,58	0,6	331,42
12.5	Nuovi serramenti in legno con vetrocamera 4-12-4 BE	1,58	0,6	699,77

ERS	Descrizione	η	PU[€/cad]
13.1	Nuovo generatore di calore ad alte prestazioni	0,98	11179,62
13.2	Nuovo generatore di calore a condensazione ad alte prestazioni	0,995	34315,90
14.1	Valvole termostatiche con sensore a cera	0,97	56,00
14.2	Valvole termostatiche con sensore a liquido	0,985	68,00
14.3	Valvole termostatiche con sensore a gas	0,995	80,00

Tab. 49. Elenco delle ERS considerate ammissibili per Palazzo San Felice.

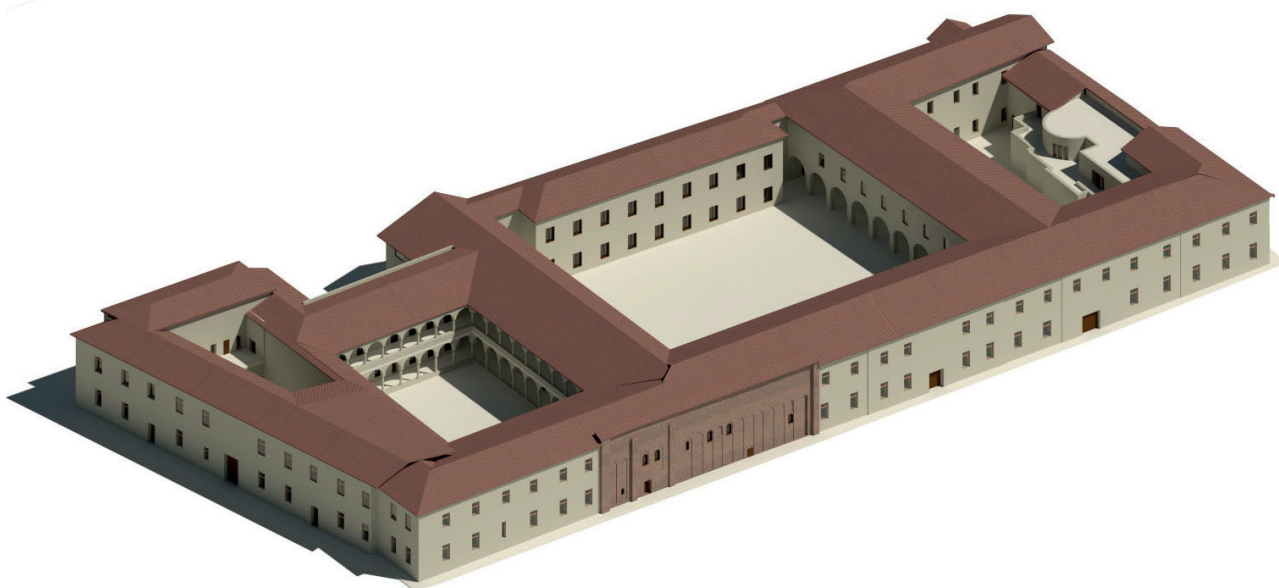
reversibili caratterizzati da tecnologie a secco. Un ragionamento a parte è stato svolto per quanto riguarda gli infissi: poiché l'edificio è, infatti, già dotato di serramenti con sistema vetrocamera, le possibilità di miglioramento delle prestazioni possono essere legate esclusivamente all'installazione di lastre vetrate con trattamento bassoemissivo. In un'ottica sperimentale, si sono voluti testare due scenari trasformativi associati al restauro dei serramenti esistenti o alla loro sostituzione, pur consapevoli del fatto che si tratta di due interventi al limite dell'applicabilità. Se, infatti, nel primo caso si può immaginare una scarsa convenienza nel bilancio costi-benefici, nel secondo è facile riscontrare anche un'importante riserva legata alla logica di conservazione del bene. Infine, è stata considerata la possibilità di agire sul sottosistema di emissione dell'impianto termico per mezzo dell'installazione di valvole termostatiche ai terminali impiantistici e sul sottosistema di generazione attraverso la sostituzione di una delle due caldaie attualmente presenti. Dall'analisi dello stato di fatto, infatti, si rileva che nella centrale termica principale sono installati due generatori di calore caratterizzati da rendimenti molto diversi. Il primo,

posto in opera nel 2005 e con potenza nominale pari a 880 kW presenta un'efficienza del 90%, mentre il secondo, più recente e di taglia inferiore, è un generatore a condensazione di nuova generazione, con un rendimento del 98%. Le ipotesi trasformative intendono agire solo sulla macchina più vecchia, studiando la sua sostituzione con due nuove caldaie (a condensazione e non) e determinando così un nuovo rendimento di generazione calcolato sulla media pesata dei contributi dei due generatori.

Come da flusso di lavoro, il processo parte dalla modellazione BIM dell'edificio nel software di authoring Autodesk Revit 2018 (Fig. 120), a cui seguono l'esportazione in formato IFC (Fig. 121) e la conversione nel modello CityGML LOD3 (Fig. 122). Il carico informativo di quest'ultimo viene, infine, trasferito nel database, grazie all'utilizzo degli script di programmazione visuale sviluppati nell'ambiente Safe FME. Una volta definiti e organizzati i dati che costituiscono il modello dell'edificio, è possibile estrarli verso la piattaforma di calcolo Mathworks Matlab R2019a per procedere alla fase di simulazione propria della metodologia cost-optimal. Come fase intermedia, lo script contenente i dizionari per la compilazione dei dati input elabora le informazioni derivanti dalle query SQL per il raggruppamento di tutti gli elementi tecnici dell'edificio in un'unica struttura, generando una matrice SDF caratterizzata da 572 righe.

Il calcolo in tre step arriva alla determinazione dei valori del Costo Globale unitario [$\text{€}/\text{m}^3$] e del Fabbisogno di energia termica annuale [$\text{kWh}/\text{m}^3\text{a}$] per lo stato di fatto (SDF), nel caso di applicazione delle singole misure di riqualificazione energetica (ERS) e per gli scenari energetici (ES) composti, restituendo rispettivamente 1, 18 e 6461 punti sul grafico cartesiano. Dell'ultimo gruppo, 33 soluzioni compongono la frontiera di

Fig. 120. Vista assonometrica del modello BIM di Palazzo San Felice, realizzato con Autodesk Revit 2018.



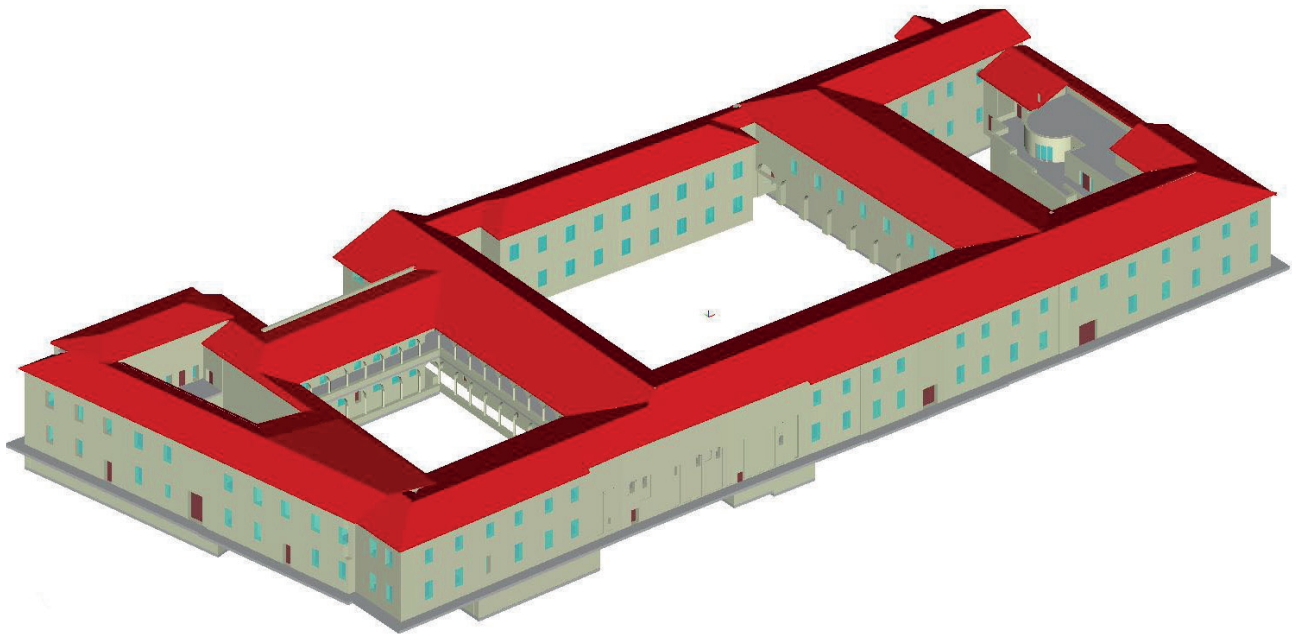


Fig. 121. Vista assonometrica del modello BIM di Palazzo San Felice, esportato in formato IFC 4.0.

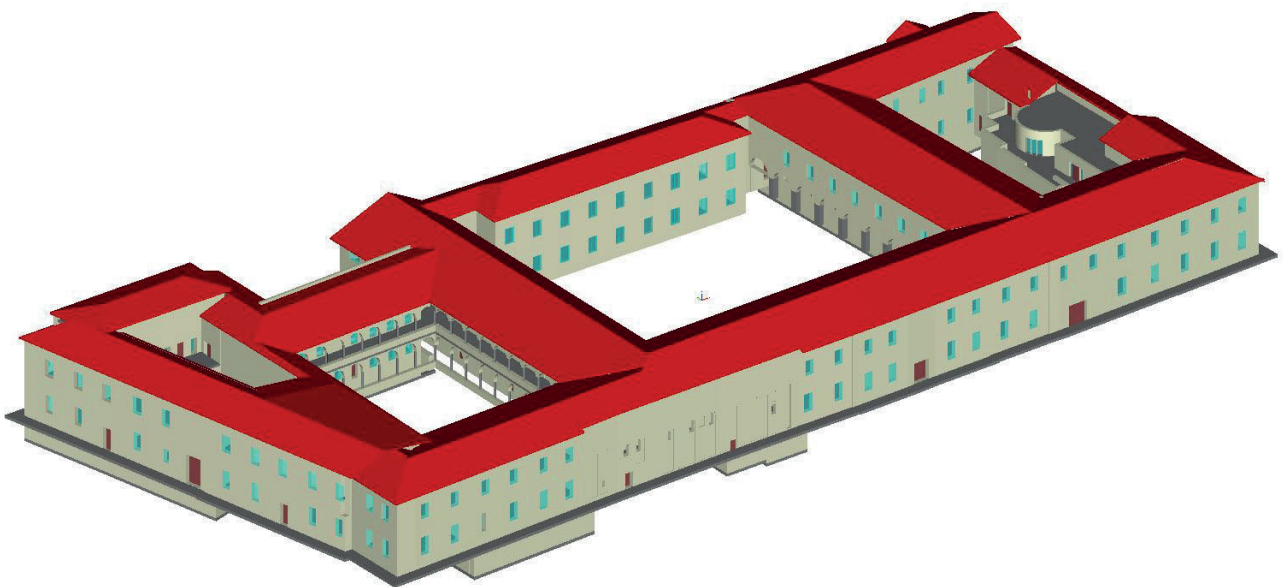


Fig. 122. Vista assonometrica del modello CityGML di Palazzo San Felice.

Pareto del problema.

In Fig. 123 è possibile vedere il risultato complessivo dei tre processi di calcolo, in cui:

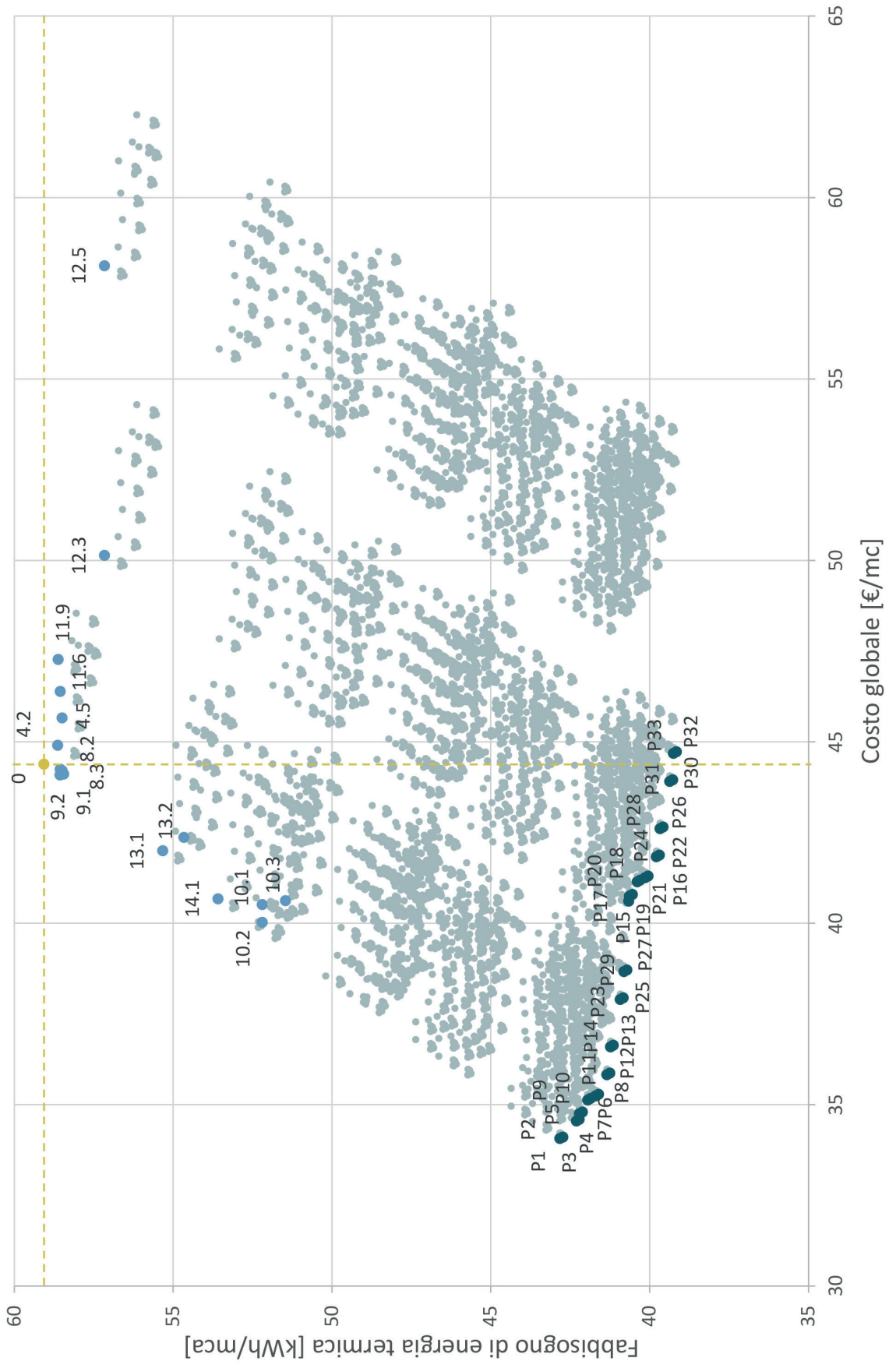
- Lo stato di fatto inalterato è rappresentato dal punto giallo numero zero, da cui partono due direttrici atte a suddividere il piano cartesiano in relazione ai valori di costo globale e fabbisogno energetico corrispondenti;
- Le analisi svolte sulle ERS sono identificate dai punti azzurri, numerati secondo il codice a due cifre riferito a Tab. 35;
- Tutte le iterazioni di calcolo corrispondenti alle ES sono visualizzate attraverso i punti grigio chiaro;
- Le soluzioni appartenenti alla frontiera di Pareto sono rappresentate da punti color petrolio e individuate da un codice numerico progressivo preceduto dalla lettera P.

Per come è stato strutturato il calcolo, considerando di condizionare un volume totale di più di 30'000 m³, comprensivi dei locali al piano interrato, allo stato inalterato Palazzo San Felice presenta un fabbisogno termico per unità di superficie di 59.07 kWh/m³a a fronte di un costo globale di gestione energetica di 44.39 €/m³. Il dato di partenza è sensibilmente superiore a quello del caso di Palazzo Botta, nonostante le modalità d'uso degli edifici e le caratteristiche degli elementi tecnici dell'involucro termico siano paragonabili. Ciò è dovuto, probabilmente, a una diversa distribuzione volumetrica, che si concretizza, in particolare, in un valore elevato del rapporto S/V per Palazzo San Felice e che determina un'incidenza determinante degli scambi termici per trasmissione.

Partendo dalla valutazione delle soluzioni prodotte dalla simulazione degli ERS (Tab. 50), il grafico mostra chiaramente gli effetti delle applicazioni di ciascuna classe di strategie. Innanzitutto, si può notare come le misure di riqualificazione energetica che comprendono un intervento sugli infissi (12.4 e 12.5) si classifichino immediatamente come le più costose, a fronte di risparmi di energia termica non determinanti. Addirittura, l'ipotesi di sostituire le finestre esistenti, già giudicata inammissibile dal punto di vista della conservazione dell'opera architettonica, risulta distanziata dalla maggior parte delle soluzioni, e, combinata con altre strategie, va a creare una nuvola di punti che non arriva a determinare nessuna possibilità di intervento che ricade tra quelle ottimali, inscrivibili nella frontiera di Pareto. Questa constatazione permette di escludere anche sotto il profilo tecnico-economico la ERS 12.5 dai ragionamenti che andranno a concretizzare la fase decisoria del processo di riqualificazione.

Proseguendo, le soluzioni progettuali agenti sulle chiusure al piano interrato, che comprendono interventi sul lato interno delle pareti perimetrali (4.2 e 4.5) e sull'intradosso del solaio controterra (11.6 e 11.9), comportano generalmente scarsi

Fig. 123. Nella pagina successiva, risultato dell'analisi cost-optimal applicata al caso studio di Palazzo San Felice. In giallo, il punto zero rappresenta lo stato di fatto inalterato, i punti azzurri corrispondono alle ERS e sono identificati dal corrispettivo codice numerico, i punti grigio chiaro illustrano la totalità delle iterazioni di calcolo e, infine, i punti color petrolio individuati da un numero preceduto dalla lettera P costituiscono i risultati appartenenti alla frontiera di Pareto.



COD	GC [€/m³]	Δ	Qp,H [kWh/m³a]	Δ
4.2	44,907	1,2%	58,633	-0,7%
4.5	45,658	2,9%	58,494	-1,0%
10.1	40,518	-8,7%	52,199	-11,6%
10.2	40,028	-9,8%	52,199	-11,6%
10.3	40,621	-8,5%	51,459	-12,9%
8.2	44,085	-0,7%	58,560	-0,9%
8.3	44,114	-0,6%	58,447	-1,0%
9.1	44,243	-0,3%	58,553	-0,9%
9.2	44,207	-0,4%	58,495	-1,0%
11.6	46,390	4,5%	58,551	-0,9%
11.9	47,274	6,5%	58,619	-0,8%
12.3	50,138	13,0%	57,160	-3,2%
12.5	58,123	30,9%	57,160	-3,2%
13.1	42,000	-5,4%	55,329	-6,3%
13.2	42,370	-4,5%	54,660	-7,5%
14.1	40,675	-8,4%	53,586	-9,3%
14.2	40,148	-9,5%	52,770	-10,7%
14.3	39,837	-10,2%	52,239	-11,6%

Tab. 50. Soluzioni numeriche della procedura cost-optimal in relazione alle ERS. In verde sono evidenziati i valori associati a una contrazione dei costi in termini energetici o economici, mentre in rosso vengono segnalate le soluzioni che provocano un aumento del costo di gestione sul ciclo di vita.

vantaggi dal punto di vista energetico a fronte di piccoli aumenti del costo globale di gestione dell'edificio. Al contrario, tutte le altre strategie elementari determinano un miglioramento di entrambi i criteri che caratterizzano l'analisi cost-optimal. Com'era prevedibile le possibilità di azione sul tetto piano dell'ala est risultano poco significative, in relazione alla piccola superficie su cui vanno ad agire. Infine, ancora una volta, le misure più premianti si rivelano quelle agenti sull'ultimo solaio verso il sottotetto non riscaldato (10.1, 10.2 e 10.3) e quelle che prevedono la sostituzione (13.1 e 13.2) o l'integrazione (14.1, 14.2 e 14.3) di porzioni dell'impianto termico.

La valutazione delle combinazioni in possibili in scenari energetici arriva alla definizione di una frontiera di Pareto composta da 33 punti (Tab. 51). La forma che assume la nuvola di punti nello spazio cartesiano permette di distinguere tre cluster di soluzioni, determinati dall'applicazione delle misure che riguardano le componenti finestrate. Di questi, solo i primi due forniscono soluzioni ottimali, mentre l'ipotesi di sostituire gli infissi esistenti (12.5) non si dimostra mai efficiente ai fini dell'analisi multicriteriale, generando una scia di punti che non arriva mai alla curva delle soluzioni ottimali. A differenza del caso precedentemente considerato, quasi tutti i punti della frontiera determinano un risparmio sia in termini energetici che economici, superando solo in due casi l'asse verticale che indica il costo globale allo stato di fatto. Fra questi, lo scenario che permette di raggiungere la migliore performance energetica

Tab. 51. Soluzioni numeriche della procedura cost-optimal in relazione alle ES che generano la frontiera di Pareto del problema. In verde sono evidenziati i valori associati a una contrazione dei costi in termini energetici o economici, mentre in rosso vengono segnalate le soluzioni che provocano un aumento del costo di gestione sul ciclo di vita.

COD	GC [€/m ³]	Δ	Qp,H [kWh/m ³ a]	Δ
P1	34,067	-23,2%	42,825	-27,5%
P2	34,550	-22,2%	42,307	-28,4%
P3	34,110	-23,2%	42,732	-27,7%
P4	34,595	-22,1%	42,215	-28,5%
P5	34,755	-21,7%	42,213	-28,5%
P6	35,244	-20,6%	41,702	-29,4%
P7	34,798	-21,6%	42,119	-28,7%
P8	35,289	-20,5%	41,610	-29,6%
P9	35,130	-20,9%	41,952	-29,0%
P10	35,175	-20,8%	41,860	-29,1%
P11	35,824	-19,3%	41,347	-30,0%
P12	35,868	-19,2%	41,255	-30,2%
P13	36,639	-17,5%	41,141	-30,3%
P14	36,594	-17,6%	41,233	-30,2%
P15	40,607	-8,5%	40,655	-31,2%
P16	41,301	-7,0%	40,050	-32,2%
P17	40,796	-8,1%	40,541	-31,4%
P18	41,256	-7,1%	40,142	-32,0%
P19	40,752	-8,2%	40,634	-31,2%
P20	41,187	-7,2%	40,300	-31,8%
P21	41,142	-7,3%	40,393	-31,6%
P22	41,881	-5,6%	39,695	-32,8%
P23	37,943	-14,5%	40,834	-30,9%
P24	41,836	-5,7%	39,787	-32,6%
P25	37,898	-14,6%	40,926	-30,7%
P26	42,651	-3,9%	39,581	-33,0%
P27	38,713	-12,8%	40,720	-31,1%
P28	42,606	-4,0%	39,673	-32,8%
P29	38,668	-12,9%	40,812	-30,9%
P30	43,955	-1,0%	39,274	-33,5%
P31	43,910	-1,1%	39,366	-33,4%
P32	44,725	0,8%	39,160	-33,7%
P33	44,680	0,7%	39,252	-33,5%

ES	N ERS	ERS
P1	4	10.2+8.2+13.1+14.3
P2	4	10.2+8.2+13.2+14.3
P3	4	10.2+8.3+13.1+14.3
P4	4	10.2+8.3+13.2+14.3
P5	4	10.2+8.3+13.2+14.3
P6	4	10.3+8.2+13.1+14.3
P7	4	10.3+8.2+13.2+14.3
P8	4	10.3+8.3+13.1+14.3
P9	4	10.3+8.3+13.2+14.3
P10	5	4.2+10.2+8.2+13.2+14.3
P11	5	4.2+10.2+8.3+13.2+14.3
P12	5	4.2+10.3+8.2+13.2+14.3
P13	5	4.2+10.3+8.3+13.2+14.3
P14	5	4.5+10.3+8.3+13.2+14.3
P15	5	4.5+10.3+8.2+13.2+14.3
P16	5	10.2+8.3+12.3+13.2+14.3
P17	5	10.3+8.3+12.3+13.2+14.3
P18	5	10.3+8.3+12.3+13.1+14.3
P19	5	10.3+8.2+12.3+13.2+14.3
P20	5	10.3+8.2+12.3+13.1+14.3
P21	6	4.2+10.2+8.3+12.3+13.2+14.3
P22	6	4.2+10.3+8.3+11.6+13.2+14.3
P23	6	4.2+10.3+8.2+12.3+13.2+14.3
P24	6	4.2+10.3+8.2+11.6+13.2+14.3
P25	6	4.5+10.3+8.3+12.3+13.2+14.3
P26	6	4.5+10.3+8.3+11.6+13.2+14.3
P27	6	4.5+10.3+8.2+12.3+13.2+14.3
P28	6	4.5+10.3+8.2+11.6+13.2+14.3
P29	7	4.2+10.3+8.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P30	7	4.2+10.3+8.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P31	7	4.2+10.3+8.2+11.6+12.3+13.2+14.3
P32	7	4.5+10.3+8.3+11.6+12.3+13.2+14.3
P33	7	4.5+10.3+8.2+11.6+12.3+13.2+14.3

Tab. 52. Combinazione di ERS per la realizzazione delle ES appartenenti alla frontiera di Pareto.

è rappresentato dal punto P32 (4.5+10.3+8.3+11.6+12.3+13.2+14.3), che consente una contrazione del 33,7% del consumo di energia termica a fronte di un aumento dei costi di gestione inferiore all'1%. Al capo opposto della curva, invece, si trova la soluzione P3 (10.2+8.3+13.1+14.3), che determina un risparmio del 23,2% sul costo di gestione nel periodo di calcolo e una riduzione del 27,7% del fabbisogno energetico per la stagione invernale.

Tab. 53. Combinazione di ERS per la realizzazione delle ES appartenenti alla frontiera di Pareto. In grigio sono segnalate le misure elementari che non compaiono mai nelle soluzioni ottimali.

	4.2	4.5	10.1	10.2	10.3	8.2	8.3	9.1	9.2	11.6	11.9	12.3	12.5	13.1	13.2	14.1	14.2	14.3
P1																		
P2																		
P3																		
P4																		
P5																		
P6																		
P7																		
P8																		
P9																		
P10																		
P11																		
P12																		
P13																		
P14																		
P15																		
P16																		
P17																		
P18																		
P19																		
P20																		
P21																		
P22																		
P23																		
P24																		
P25																		
P26																		
P27																		
P28																		
P29																		
P30																		
P31																		
P32																		
P33																		

La visualizzazione presentata in Tab. 53 permette, infine, di comprendere quali soluzioni vengano maggiormente selezionate al fine di comporre gli scenari ottimali. Com'è facile notare, la ERS 12.5 non è l'unica a non concorrere mai alla definizione della frontiera di Pareto, tuttavia, in relazione alle misure di riqualificazione che vanno ad alterare l'involucro termico dell'edificio, occorre sottolineare che la scelta dei materiali da applicare può essere legata a principi che vanno al di là dei criteri valutati dall'analisi cost-optimal. Al contrario, gli interventi sull'impianto termico risultano molto efficaci e lungo la frontiera di Pareto si alternano le due possibilità di sostituzione del generatore di calore (13.1 e 13.2), mentre la scelta delle valvole termostatiche con sensore a gas risulta sempre la migliore della sua categoria, bilanciando con una maggiore efficienza la differenza di prezzo che presenta rispetto alle sue soluzioni meno sofisticate.

4.4. Conclusioni

Le esperienze svolte attraverso l'analisi dei casi studio hanno permesso di comprendere operativamente le opportunità e i limiti connessi all'utilizzo del sistema informativo nel suo insieme, dalla modellazione informativa alla scala urbana ed edile fino alla valutazione dei risultati della metodologia comparativa cost-optimal. Nel complesso, il flusso di lavoro si è dimostrato funzionante e completo, anche se, allo stato di attuale sviluppo, i passaggi risultano di difficile attuazione e quindi fuori dalla portata di utenti non esperti. Tuttavia, i risultati dimostrano che, anche a partire da modelli a bassi livelli di dettaglio, quali i BIM realizzati per Palazzo Botta e Palazzo San Felice, è possibile svolgere elaborazioni dei dati che conducono ad esiti significativi per le fasi di decision-making associate ai processi edilizi di riqualificazione energetica.

Nel dettaglio, le analisi hanno permesso di evidenziare che, per la tipologia di beni in esame esiste uno spazio di miglioramento sotto il profilo sia energetico che economico, considerando operazioni di trasformazione compatibili con i corpi di fabbrica esistenti e i sistemi di valori di cui si fanno portatori. Per entrambi i casi studio, infatti, la procedura di simulazione ottiene esiti paragonabili, individuando insieme di soluzioni capaci di ridurre sensibilmente il fabbisogno energetico degli edifici, pur non abbattendo in modo proporzionale i costi di gestione associati. Ciò è dovuto principalmente alla forte incidenza degli investimenti iniziali che non riescono ad essere ammortizzati completamente nel ciclo ventennale considerato da normativa. In linea con quanto già desunto dalla letteratura scientifica sul tema, i risultati delle analisi avvalorano le tesi secondo cui soluzioni ottimali sono raggiungibili solo per mezzo di interventi

sinergici sul sistema edificio/impianto, in quanto condizioni favorevoli si generano dalla riduzione delle perdite per trasmissione associata a un miglioramento dei rendimenti dei sottosistemi impiantistici.

Infine, da entrambe le simulazioni si evince che le strategie già considerate al limite dell'applicabilità in relazione ai vincoli insistenti sugli edifici, quali l'applicazione di intonaci termici o la sostituzione delle componenti finestrate, risultano non interessanti anche dal punto di vista tecnico-economico, giustificandone a maggior ragione l'esclusione nell'orizzonte di sviluppo sostenibile degli edifici.

CONCLUSIONI

1. Considerazioni conclusive

La digitalizzazione delle filiere produttive e i possibili risvolti sulle pratiche di gestione degli edifici sono temi chiave per lo sviluppo e l'innovazione del settore delle costruzioni, in particolar modo nell'ambito di territori caratterizzati da una forte incidenza di edifici storici, dove le problematiche legate al processo di informatizzazione sono amplificate dalla complessità dei sistemi urbani e rappresentano un interesse non solo economico, ambientale e sociale, ma anche di tipo culturale.

In questo contesto, il presente lavoro ha indagato le possibilità realizzative di un sistema informativo per facilitare i processi conoscitivi e decisionali nell'ambito della gestione degli asset immobiliari. Per fornire una risposta efficace, la soluzione deve necessariamente essere pensata in un'ottica multidisciplinare, fornendo un modello costituito da un nucleo centrale attorno al quale poter definire moduli tematici, atti a supportare analisi in relazione a diversi domini della conoscenza, garantendo omogeneità e coerenza a tutti i livelli di approfondimento.

Per mezzo della metodologia proposta, a partire da insiemi di dati già disponibili, è stato predisposto un database spaziale per l'organizzazione, la visualizzazione e l'analisi delle informazioni associate agli edifici, capace di rispondere all'articolato quadro esigenziale. Le informazioni tecniche sono state organizzate secondo strutture standard, che permettono di concepire una vasta gamma di possibili applicazioni, da svilupparsi per mezzo di qualsiasi soluzione software capace di interfacciarsi con i database relazionali.

Focalizzando primariamente l'attenzione sul tema energetico, i dati sono stati inizialmente strutturati attraverso strumenti GIS e BIM e successivamente armonizzati in un unico schema informativo, grazie all'implementazione di un database basato sul formato standard CityGML. A partire da questo, è stato progettato un modulo di supporto alla decisione, capace di estrarre i dati rilevanti al fine di attivare una procedura per la determinazione degli scenari di sviluppo ottimali in funzione dei costi calcolati sul ciclo di vita in termini energetici ed economici. Lo sforzo compiuto nell'impostazione dell'infrastruttura di base concretizza la volontà di proporre un approccio modulare, in cui le informazioni di carattere più generale trovano collocazione al centro del sistema informativo e possono essere arricchite per mezzo di estensioni tematiche dello schema stesso, mentre, a un livello più esterno e meno rigido, vengono definiti ulteriori nuclei informativi, contenenti dati di supporto per lo svolgimento di analisi o simulazioni specifiche.

In virtù della sua estensione, varietà e rilevanza, il patrimonio edilizio dell'Università di Pavia è stato assunto come caso studio su cui testare e verificare gli strumenti informativi proposti a diverse scale di indagine. Sfruttando la natura multiscalare dei modelli dati implementati, è stato possibile restituire alcuni output capaci di rappresentare la situazione energetica allo stato di fatto per il centro cittadino e per gli edifici di competenza dell'Ateneo pavese e simulare ipotesi trasformative per la riqualificazione di alcuni manufatti selezionati. Le sperimentazioni hanno permesso di condurre un'analisi approfondita su tutte le fasi di attuazione del sistema informativo, validandone il funzionamento, ma anche evidenziando i passaggi più critici. Dal punto di vista operativo, infatti, il processo si attua attraverso una filiera di strumenti informatici posti in comunicazione per mezzo di script di programmazione visuale. Il lavoro di ricerca ha tracciato con successo l'intero percorso che si origina dalla raccolta dei dati input e termina con il raggiungimento dei possibili prodotti. A fronte di una implementazione di difficile attuazione, che resta al di fuori della portata di utenti non esperti a causa della persistente mancanza di buone pratiche per l'interoperabilità, il risultato del presente lavoro rende le informazioni sul costruito facilmente accessibili a tutte le classi di utenza che si interfacciano con i manufatti oggetto di studio, così da supportare i gestori nelle operazioni di conduzione degli edifici e da stimolare un uso responsabile negli utenti finali.

1.1. Risultati raggiunti

In risposta agli obiettivi esplicitati all'inizio di questo testo e in coerenza con i requisiti individuati per la realizzazione del sistema informativo, i seguenti risultati sono stati raggiunti:

- Definizione di una metodologia ripetibile finalizzata alla realizzazione di un database spaziale per la descrizione del panorama costruito a diverse scale di rappresentazione, capace di capitalizzare i quadri informativi già acquisiti, raccogliendoli e armonizzandoli in un'unica piattaforma;
- Sfruttamento delle tecnologie ICT a supporto dei processi edilizi per la promozione di flussi di lavoro ripetibili, trasparenti e non ridondanti, progettati per supportare processi decisionali più efficaci;
- Proposta di una soluzione operativa alla carenza di interoperabilità fra GIS e BIM, attraverso il tracciamento di un flusso di lavoro per l'integrazione di modelli informativi multiscalarari nello schema standard e aperto CityGML;
- Definizione di un modello dati (CityGML+EM_ADE) per l'organizzazione delle informazioni sul comportamento energetico dei sistemi urbani e degli organismi edilizi, costruito a partire da risorse aperte e standardizzate;
- Realizzazione di applicazioni web-based multiplatforma

per la visualizzazione e l'interrogazione dei dati sul costruito in ambienti tridimensionali navigabili facilmente accessibili, pensati in un'ottica inclusiva per tutte le classi di utenza degli edifici;

- Sviluppo di un modulo di supporto alla decisione, basato sulla metodologia cost-optimal per la simulazione di scenari di riqualificazione energetica e l'analisi costi-benefici dei relativi effetti nel ciclo di vita, in risposta ai quadri normativi nazionali e sovranazionali vigenti, che raccomandano l'introduzione di strumenti di valutazione multicriteriali delle alternative progettuali.

1.2. Prospettive aperte

Nonostante i risultati raggiunti, il lavoro di ricerca fin qui sviluppato non può certamente dirsi concluso. L'attualità degli argomenti che sono stati trattati, infatti, delinea un orizzonte della conoscenza associata in continuo mutamento, dove gli esiti sempre nuovi che si stanno raggiungendo, in ambito sia accademico che professionale, determinano uno spostamento rapidissimo del fronte di indagine. Inoltre, la forte multidisciplinarietà dei temi coinvolti ha richiesto di avanzare mantenendo una visione di insieme dei molti tasselli che compongono i processi qui presentati, non permettendo, d'altro canto, affondi troppo minuziosi sui singoli stadi di evoluzione. In questo contesto, si è certamente cercato di perseguire un approccio bilanciato fra sviluppo e approfondimento e, inevitabilmente, sono state lasciate aperte diverse questioni.

Fra queste, si ritiene interessante citarne almeno tre che incidono su altrettanti moduli del processo, il cui studio potrebbe portare importanti miglioramenti alla ricerca e ai suoi prodotti (Fig. 124).

Per quanto riguarda il database spaziale, si ritiene auspicabile completare la mappatura degli edifici dell'Università di Pavia, estendendo a tutti i manufatti il processo che prevede la modellazione informativa, la trasposizione in CityGML LOD3 e il trasferimento delle informazioni nella base di dati. La disposizione del modello digitale dell'intero parco edilizio nella struttura standardizzata qui proposta costituirebbe, infatti, uno strumento

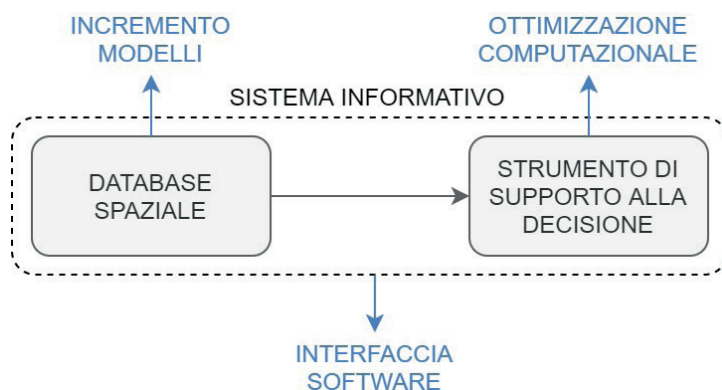


Fig. 124. Proposte di miglioramento del processo, in relazione ai moduli del sistema informativo proposto.

di grande utilità per l'Ateneo, oltre che un modo per testare ulteriormente la metodologia, individuando nuove criticità e contribuendo a migliorare il processo nel suo insieme. In seguito all'acquisizione di tutti i modelli, infatti, anche lo strumento di supporto alla decisione potrebbe essere potenziato, nell'idea di adattarlo per l'analisi di più edifici contemporaneamente, al fine di ottenere risultati che permettano di comprendere come allocare al meglio le risorse economiche, impiegandole su tutto il patrimonio immobiliare, per tracciare traiettorie di sviluppo sostenibile dell'intero sistema costruito.

In relazione a questa proposta, il modulo di calcolo per la simulazione della metodologia cost-optimal dovrebbe essere ottimizzato dal punto di vista della resa computazionale. Allo stato attuale, infatti, nello script programmato con Matlab R2019a, la costruzione della Frontiera di Pareto avviene a posteriori, in seguito alla valutazione di tutti gli scenari trasformativi. Tuttavia, tale approccio può risultare soddisfacente solo per numeri relativamente ristretti di ipotesi progettuali. Nei casi studio qui analizzati si è arrivati alla simulazione di circa 6500 proposte, ma pensando ad un'applicazione più vasta, che includa a livello teorico centinaia di migliaia di possibilità, occorre certamente adeguare il codice utilizzato per renderlo più efficiente. Ciò può avvenire, innanzitutto, per mezzo di una revisione di quanto proposto, che certamente risulterà migliorabile in diversi passaggi. Tuttavia, per ottenere un processo di calcolo globalmente più agile, occorrerà implementare una nuova sezione che faccia uso di algoritmi di ottimizzazione nella fase di calcolo. Come si ha già avuto modo di discutere, nota la definizione del problema, gli algoritmi più utilizzati in letteratura per definire modelli computazionali sono quelli di tipo genetico, appartenenti alla categoria degli algoritmi evolutivi. Con questo sviluppo, sarà possibile passare da un processo risolutivo di tipo analitico ad uno di tipo stocastico, in cui non tutte le alternative vengono valutate, ma si procede costruendo generazioni di soluzioni via via più adatte a rispondere alle condizioni imposte. Ciò fa sì che le soluzioni individuate come appartenenti al set ottimale non saranno con totale certezza le migliori, tuttavia, sarà possibile contrarre in modo determinante i tempi di calcolo e, conseguentemente, eseguire analisi più complesse includendo, ad esempio, diversi edifici contemporaneamente.

In ultima, per quanto concerne l'operabilità del sistema informativo nel suo complesso, occorre certamente pensare allo sviluppo di un'interfaccia software dedicata. Allo stato attuale, infatti, il processo è definito in tutte le sue parti, ma la sua attuazione occorre spostarsi diverse volte fra piattaforme e fare uso esplicito di linguaggi di programmazione visuale. A questo stadio di sviluppo, il meccanismo è funzionante, ma sicuramente non appare alla portata di utenti non specializzati. Nell'idea di

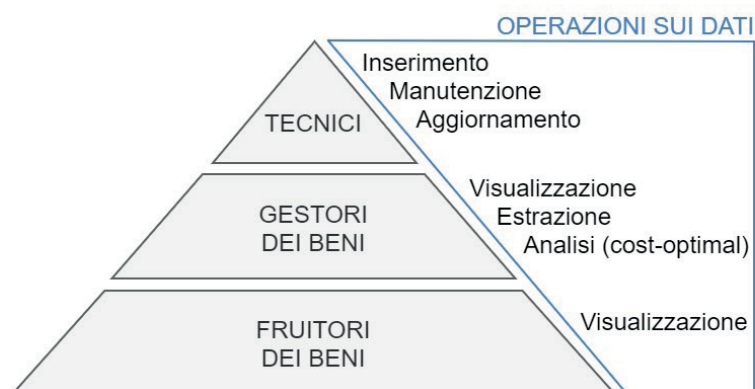


Fig. 125. Proposte di miglioramento del processo, in relazione ai moduli del sistema informativo proposto.

proporre un sistema informativo accessibile, sebbene in modo differenziato, sia ai gestori che agli utenti dei beni coinvolti nello studio, si rende necessario proporre un'interfaccia grafica, suddivisa almeno in tre moduli, in relazione ai profili di utenza:

- Una prima sezione, che può rimanere riservata ad utenti esperti incaricati del processo, progettata per l'acquisizione dei modelli GIS e BIM, la conversione nello schema CityGML (LOD 1-3) e il popolamento del database;
- Un modulo dedicato ai gestori del patrimonio immobiliare, che consenta la consultazione e l'interrogazione dei dati sia nell'ambiente di navigazione tridimensionale che attraverso l'estrazione di dati tabulari e che guidi attraverso lo svolgimento della procedura cost-optimal;
- Un'ultima parte dedicata agli utenti finali, accessibile sia da computer che da smartphone, per la visualizzazione dei dati sul costruito per mezzo del modello tridimensionale navigabile, grazie all'attivazione di mappe tematiche in falsi colori.

In relazione a queste esigenze, si ritiene che la soluzione migliore sarebbe fornita da un'applicazione web-based multipiattaforma collegata al database centrale, in cui utenti con privilegi diversi possano accedere a contenuti differenziati, grazie all'implementazione di una serie di livelli di astrazione (Fig. 125). In questo modo, l'integrità e l'aggiornamento delle informazioni possono essere sempre garantite sulla base dell'indipendenza fisica e logica dei dati, concetti mutuati proprio dalla disciplina che si occupa dei database e dei loro sistemi di gestione. Attraverso il collegamento di un'applicazione a un DBMS, infatti, si verifica una separazione tra dotazioni hardware, schema logico e schema esterno, che permette di modificare indipendentemente le strutture senza intaccare i dati.

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE

1. Singh, V. (2013). Challenges for integrated design and delivery teams in AEC. In IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (pp. 641-650). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Motawa, I., & Almarshad, A. (2013). A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in construction*, 29, 173-182.
3. Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International journal of project management*, 31(7), 971-980.
4. Halfawy, M. R., Froese, T. M., Vanier, D. J., & Kyle, B. R. (2004). An integration approach for developing AEC/FM total project systems. In Proc., CIB 2004 Triennial Congress.
5. European Commission (2020) Roadmap to Renovation Wave. Ref Ares (2020)2469180.
6. Carbonara, G. (2015). Energy efficiency as a protection tool. *Energy and Buildings*, 95, 9-12.
7. Egusquiza, A., Gandini, A., Izkara, J. L., & Prieto, I. (2014). Management and decision-making tools for the sustainable refurbishment of historic cities. In V Congreso Latinoamericano REHABEND 2014 sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio.
8. Zeiler, W., Savanovic, P., & Quanjel, E. M. C. J. (2009). The changing role of AEC organisations towards integral design. proceedings of the Changing Roles: New Roles and New Challenges, 154-163.
9. Short, M., Dawood, M., Crosbie, T., & Dawood, N. (2014). Visualization tools for energy awareness and management in energy positive neighborhoods. In 14th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality.
10. Petersen, S., & Svendsen, S. (2010). Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design. *Energy and buildings*, 42(7), 1113-1119.
11. Schlueter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in construction*, 18(2), 153-163.
12. Direttiva 2014/24/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 26 febbraio 2014 , sugli appalti pubblici e che abroga la direttiva 2004/18/CE Testo rilevante ai fini del SEE. OJ L 94, 28.3.2014, p. 65-242.
13. Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010 , sulla prestazione energetica nell'edilizia. OJ L 153, 18.6.2010, p. 13-35
14. European Commission (2011) Energy Efficiency Plan [COM/2011/0109] <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1407839592178&uri=CELEX:52011DC0109> (accessed November 2019)
15. European Commission (2016) Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables). https://ec.europa.eu/energy/studies/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment_en (accessed November 2019)
16. European Commission (2016) An EU Strategy on Heating and Cooling https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v14.pdf (accessed November 2019)
17. European Commission (2019) EU Energy in figures. Statistical pocketbook 2019. <https://www.euneighbours.eu/en/east/stay-informed/publications/eu-energy-figures-statistical-pocketbook-2019>. (accessed November 2019)
18. BPIE (2011) Europe's buildings under the microscope http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf (accessed November 2019)
19. Ecofys (2011) Panorama of the European non-residential construction sector. <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2018/03/Europejski-sektor-budownictwa-niemieszkalnego.pdf> (accessed November 2019)
20. Paoletti, G., Pascual Pascuas, R., Perneti, R., & Lollini, R. (2017). Nearly zero energy buildings: an overview of the main construction features across Europe. *Buildings*, 7(2), 43.
21. Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la

direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica (Testo rilevante ai fini del SEE). PE/4/2018/REV/1 OJ L 156, 19.6.2018, p. 75–91

22. Power, A. (2010). Housing and sustainability: demolition or refurbishment?. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*, 163(4), 205-216.

23. Artola, I., Rademaekers, K., Williams, R., & Yearwood, J. (2016). Boosting Building Renovation: What Potential and Value for Europe?: Study. European Parliament.

24. Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 ottobre 2012 , sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE Testo rilevante ai fini del SEE. OJ L 315, 14.11.2012, p. 1–56

25. D'agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2017). Towards nearly zero energy buildings in Europe: A focus on retrofit in non-residential buildings. *Energies*, 10(1), 117.

26. Rabani, M., Madessa, H. B., & Nord, N. (2017). A state-of-art review of retrofit interventions in buildings towards nearly zero energy level. *Energy Procedia*, 134, 317-326.

27. Klimowicz, J. (2018). Chosen case studies of nZeb retrofit buildings. In *Design Solutions for nZEB Retrofit Buildings* (pp. 209-227). IGI Global.

28. Dalla Mora, T., Cappelletti, F., Peron, F., Romagnoni, P., & Bauman, F. (2015). Retrofit of an historical building toward NZEB. *Energy Procedia*, 78, 1359-1364.

29. Mauri, L. (2016). Feasibility analysis of retrofit strategies for the achievement of NZEB target on a historic building for tertiary use. *Energy Procedia*, 101, 1127-1134.14

30. ISTAT (2018) *Annuario statistico italiano*. <https://www.istat.it/it/files//2018/12/Asi-2018.pdf> (Accessed January 2020)

31. Ecofys (2010). Bio Intelligence Service. Study to support the impact assessment for the EU energy saving action plan.

32. The Hague: Ministry of the Interior and Kingdom Relations (2010). *Housing Statistics in the European Union*. <http://www.mmr.cz/getmedia/265d0e64-06a1-4689-8911-bf93d34e3e42/Housing-statistics-in-the-European-Union-2010.pdf> (Accessed January 2020)

33. Napoli, G., Gabrielli, L., & Barbaro, S. (2017). The efficiency of the incentives for the public buildings' energy retrofit. The case of the Italian Regions of the "Objective Convergence".

34. Lucchi, E., & Pracchi, V. (2013). *Efficienza energetica e patrimonio costruito: La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica* (Vol. 662). Maggioli Editore.

35. Radulov, L., Kaloyanov, N., & Petran, H. (2014). D2. 1 report on the preliminary assessment of public building stock. <http://www.republiczeb.org/filelibrary/WP2/D2-1Public-Building-Stock-final.pdf> (Accessed January 2020)

36. Morandotti M. (2017). Resilience and memory. Notes for an approach to the sustainable transformability of immovable Cultural Heritage. In Besana D. [RICH*] *Reuse and Improvement of Cultural Heritage* (pp. 55-76) Aracne Editrice

37. Cecchini, C., Magrini, A., & Morandotti, M. (2020). The Energy-Oriented Management of Public Historic Buildings: An Integrated Approach and Methodology Applications. *Sustainability*, 12(11), 4576.

38. Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia GU L 1 del 4.1.2003, pagg. 65–71

39. Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009 , sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE (Testo rilevante ai fini del SEE) GU L 140 del 5.6.2009, pagg. 16–62

40. Regolamento delegato (UE) n. 244/2012 della Commissione, del 16 gennaio 2012 , che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti

minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi Testo rilevante ai fini del SEE. GU L 81 del 21.3.2012, pagg. 18–36

41. Direttiva (UE) 2018/2002 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, che modifica la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica (Testo rilevante ai fini del SEE.) PE/54/2018/REV/1 GU L 328 del 21.12.2018, pagg. 210–230

42. Legge 30 marzo 1976, n. 373 Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici. (GU Serie Generale n.148 del 07-06-1976)

43. Legge 9 gennaio 1991, n. 10 Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia. (GU Serie Generale n.13 del 16-01-1991 - Suppl. Ordinario n. 6)

44. Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412 Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10. (GU Serie Generale n.242 del 14-10-1993 - Suppl. Ordinario n. 96)

45. Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia. (GU Serie Generale n.222 del 23-09-2005 - Suppl. Ordinario n. 158)

46. Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. (GU Serie Generale n.26 del 01-02-2007 - Suppl. Ordinario n. 26)Decreto Ministeriale n. 158/2009

47. Decreto 26 giugno 2009 Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. (09A07900) GU Serie Generale n.158 del 10-07-2009

48. Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. (11G0067) GU Serie Generale n.71 del 28-03-2011 - Suppl. Ordinario n. 81

49. Legge 3 agosto 2013, n. 90 Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale. (13G00133) GU Serie Generale n.181 del 03-08-2013

50. Decreto 26 giugno 2015 Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. (15A05198) (GU Serie Generale n.162 del 15-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 39)

51. Loga, T., & Diefenbach, N. (2009). DATAMINE. Collecting Data from Energy Certification to Monitor Performance Indicators for New and Existing buildings. Final Report of the EIE project DATAMINE.

52. Loga, T., Diefenbach, N., Stein, (2012). Typology approach for building stock energy assessment. Main results of the TABULA project. Institut Wohnen und Umwelt GmbH.

53. Loga, T., Diefenbach, N., Stein, B. (2016). Monitor progress towards climate targets in European housing stocks: main results of the EPISCOPE Projekt: final project report. Institut Wohnen und Umwelt GmbH.

54. Troi, A., & Lollini, R. (2011). Interdisciplinary research: FP7 project "3ENCULT-Efficient Energy for EU Cultural Heritage". In Proceedings of the International Conference Energy Management in Cultural Heritage (Vol. 6, No. 8.4).

55. Rambelli, G., van Staden, M., Kunt, D. I. (2013). D3.6 - Summary results e-guide for local governments. Technical guidance on energy efficient renovation of historic buildings. http://www.3encult.eu/en/deliverables/Documents/WP3_D3.6_20130527_P21_Technical_guide_EE_options_for_local_governments.pdf (Accessed January 2020)

56. Rodriguez-Maribona, I., & Grün, G. (2016). Energy Efficiency in European historic urban districts-a practical guidance.

57. Egusquiza, A., Prieto, I., & Romero, A. (2014). Multiscale information management for sustainable districts rehabilitation EFFESUS and FASUDIR projects. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction ECPPM*, 303-308.
58. Aelenei, L., Petran, H., Tarrés, J., Riva, G., Ferreira, A., Camelo, S., ... & Magyar, Z. (2015). New challenge of the public buildings: Nzeb findings from IEE RePublic-ZEB Project. *Energy Procedia*, 78, 2016-2021.
59. Erhorn-Kluttig H. & Erhorn, H. (2008). Publishable final activity report. Bringing retrofit innovation to application in public buildings - BRITA in Pubs.
60. Onesti, A. (2013). Il recupero edilizio nell'approccio del paesaggio storico urbano. Gli strumenti per condividere le regole. *BDC. Bollettino Del Centro Calza Bini*, 13(1), 157-174.
61. Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2002). Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK. *Energy*, 27(1), 77-92.
62. Gaspar, P. L., & Santos, A. L. (2015). Embodied energy on refurbishment vs. demolition: A southern Europe case study. *Energy and Buildings*, 87, 386-394.
63. Power, A. (2008). Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?. *Energy policy*, 36(12), 4487-4501.
64. Power, A. (2010). Housing and sustainability: demolition or refurbishment?. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*, 163(4), 205-216.
65. Gorse, C. A., & Highfield, D. (2009). *Refurbishment and upgrading of buildings*. New York: Spon Press.
66. La Fleur, L., Rohdin, P., & Moshfegh, B. (2019). Energy Renovation versus Demolition and Construction of a New Building—A Comparative Analysis of a Swedish Multi-Family Building. *Energies*, 12(11), 2218.
67. Babangida, I., Olubodun, F., & Kangwa, J. (2012, September). Building refurbishment: holistic evaluation of barriers and opportunities. In *Proceedings of 28th Annual ARCOM Conference—Association of Researchers in Construction Management*, ARCOM, Edinburgh (pp. 3-5).
68. Mistretta, M., Beccali, M., Cellura, M., Guarino, F., & Longo, S. (2013). Benefits of refurbishment. In *Nearly Zero Energy Building Refurbishment* (pp. 99-117). Springer, London.
69. Sitar, M., Dean, K., & Kristjan, K. (2006). The existing housing stock—new renovation possibilities; a case of apartment building renewal in Maribor.
70. Mickaityte, A., Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., & Tupenaite, L. (2008). The concept model of sustainable buildings refurbishment. *International Journal of Strategic Property Management*, 12(1), 53-68.
71. Konstantinou, T., & Knaack, U. (2011). Refurbishment of residential buildings: a design approach to energy-efficiency upgrades. *Procedia engineering*, 21, 666-675.
72. Aste, N., & Del Pero, C. (2013). Energy retrofit of commercial buildings: case study and applied methodology. *Energy Efficiency*, 6(2), 407-423.
73. Calì, D., Osterhage, T., Streblov, R., & Müller, D. (2016). Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. *Energy and buildings*, 127, 1146-1158.
74. Hens, H. (2010). Energy efficient retrofit of an end of the row house: Confronting predictions with long-term measurements. *Energy and buildings*, 42(10), 1939-1947.
75. Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2011). Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 460-470.
76. Entrop, A. G., Brouwers, H. J. H., & Reinders, A. H. (2010). Evaluation of energy performance indicators and financial aspects of energy saving techniques in residential real estate. *Energy and Buildings*, 42(5), 618-629.
77. Lourenço, P., Pinheiro, M. D., & Heitor, T. (2014). From indicators to strategies: Key Performance Strategies for sustainable energy use in Portuguese school buildings. *Energy and buildings*, 85, 212-224.
78. Ballarini, I., Corrado, V., Madonna, F., Paduos, S., & Ravasio, F. (2017). Energy refurbishment of the

Italian residential building stock: energy and cost analysis through the application of the building typology. *Energy Policy*, 105, 148-160.

79. Ortiz, J., Fonseca, A., Salom, J., Garrido, N., Fonseca, P., & Russo, V. (2016). Comfort and economic criteria for selecting passive measures for the energy refurbishment of residential buildings in Catalonia. *Energy and Buildings*, 110, 195-210.

80. Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., & Raslanas, S. (2005). Multivariant design and multiple criteria analysis of building refurbishments. *Energy and Buildings*, 37(4), 361-372.

81. Maltese, S., Daniotti, B., & Re Cecconi, F. (2013). Sustainability multi-criteria analysis method—real estate assessment tool for sustainable refurbishment. In *Proceedings of Conference Central Europe towards Sustainable Building CESB* (pp. 26-28).

82. Mastrucci, A., Baume, O., Stazi, F., Salvucci, S., & Leopold, U. (2014). A GIS-based approach to estimate energy savings and indoor thermal comfort for urban housing stock retrofitting. *BauSIM 2014*, 190-197.

83. Masoero, M., Ostorero, C., Simonetti, M., & Surra, M. (2011) L'integrazione Edificio-Impianto nell'architettura sostenibile Building-HVAC system integration in sustainable architecture. *Atti del 43 Convegno Internazionale AiCARR*

84. Bichiou, Y., & Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, 43(12), 3373-3382.

85. Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563.

86. UNI/TS 11300-2:2014. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali

87. Decreto del Presidente della Repubblica 15 novembre 1996, n. 660 Regolamento per l'attuazione della direttiva 92/42/CEE concernente i requisiti di rendimento delle nuove caldaie ad acqua calda, alimentate con combustibili liquidi o gassosi. (GU Serie Generale n.302 del 27-12-1996 - Suppl. Ordinario n. 231)

88. DEcreto Legislativo 18 luglio 2016, n. 141 Disposizioni integrative al decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102, di attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE. (16G00153) (GU Serie Generale n.172 del 25-07-2016)

89. Ceccotti, L., De Angelis, A. & Saro, O. (2013). Riquilificazione impiantistica degli edifici esistenti. *Linee guida per gli edifici residenziali*. EPC Editore, Roma.

90. De Santoli, L. (2015). Guidelines on energy efficiency of cultural heritage. *Energy and Buildings*, 86, 534-540.

91. Martínez-Molina, A., Tort-Ausina, I., Cho, S., & Vivancos, J. L. (2016). Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 70-85.9191

92. Webb, A. L. (2017). Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 748-759.

93. Pracchi, V. (2014). Historic buildings and energy efficiency. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5(2), 210-225.

94. De Berardinis, P., Rotilio, M., Marchionni, C., & Friedman, A. (2014). Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A case study: A minor centre in the Abruzzo region, Italy. *Energy and Buildings*, 80, 415-423.

95. Sahin, C. D., Arsan, Z. D., Tunçoku, S. S., Broström, T., & Akkurt, G. G. (2015). A transdisciplinary approach on the energy efficient retrofitting of a historic building in the Aegean Region of Turkey. *Energy and Buildings*, 96, 128-139.

96. Broström, T., Eriksson, P., Liu, L., Rohdin, P., Ståhl, F., & Moshfegh, B. (2014). A method to assess the

potential for and consequences of energy retrofits in Swedish historic buildings. *The historic environment: policy & practice*, 5(2), 150-166.

97. Mazzarella, L. (2015). Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view. *Energy and Buildings*, 95, 23-31.

98. ASHRAE (2016). ASHRAE Guideline 34P, Energy Guideline for Historical Buildings. Second Public Review.

99. McCaig, I., Pender, R., Pickles, D. (2018). Energy Efficiency and Historic Buildings. How to Improve Energy Efficiency. Historic England

100. Hartman, V., Kirac, M., & Scalet, M. (2013). Energy efficiency and energy management in cultural heritage. Case studies guidebook. Venice: UNESCO. Retrieved October, 30, 2014.

101. De Santoli, L. (2014). Energy efficiency in historic buildings (Guida AiCARR). Editoriale Delfino

102. Ragni, M., Maurano, A., Scoppola, F., Soragni, U., Baraldi, M., D'amico, S., ... & Battisti, A. (2013). Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale. *Architettura, centri e nuclei storici ed urbani*.

103. Vaccari, P. (1957). *Storia dell'Università di Pavia*. Università di Pavia.

104. Erba, L. (1976). *Guida storico-artistica dell'Università di Pavia*. Università di Pavia.

105. Erba, L. (1990). *Alma ticinensis universitas*. Università di Pavia.

106. Vai, W. (2017). *Guida storico artistica della città di Pavia*. Ponzio editori.

PARTE 1: UN DATABASE SPAZIALE PER LA GESTIONE DELL'INFORMAZIONE TECNICA SUI PATRIMONI EDILIZI

107. Magrini, A., Gobbi, L., & d'Ambrosio, F. R. (2016). Energy audit of public buildings: the energy consumption of a University with modern and historical buildings. Some results. *Energy Procedia*, 101, 169-175.

108. Caffi, V. (2001). *Information technologies e processo edilizio - Applicazioni e prospettive per il progetto* [Tesi di dottorato, Politecnico di Milano]

109. Nesi, A. (2012). *Progettare con l'informazione: Percorsi e gestione delle informazioni tecniche per la promozione e il controllo dell'innovazione nei materiali e nel progetto di Architettura*. Gangemi Editore.

110. Kalay, Y. E. (2006). The impact of information technology on design methods, products and practices. *Design studies*, 27(3), 357-380.

111. Sigrid Nordby, A. & Jørgensen P. F. (2014). *Integrated Design Process Guide*. MaTrID project

112. Vrijhoef, R., & Koskela, L. J. (2005). Revisiting the three peculiarities of production in construction. In *Proceedings of 13th International Group for Lean Construction Conference*. (pp. 19-27).

113. Zanchetta, C., Borin, P., Cecchini, C., & Xausa, G. (2017). Computational design and classification systems to support predictive checking of performance of building systems. *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, (13), 329-336.

114. Costamagna, E., & Spanò, A. (2012, October). Semantic models for architectural heritage documentation. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 241-250). Springer, Berlin, Heidelberg

115. Tesi di dottorato Sara Scapicchio

116. CIB (Conseil International du Bâtiment) (1964). *A Master List of the properties of building materials and products*

117. Ekholm, A. (2002, June). Principles for classification of properties of construction objects. In *Distributing Knowledge in Building'*, CIB w78 Conference, Aarhus School of Architecture, Denmark

118. Gnoli, C., Marino, V., & Rosati, L. (2006). *Organizzare la conoscenza. Dalle biblioteche all'architettura dell'informazione per il Web*. Tecniche nuove.

119. UNI 8290-1:1981 + A122:1983 Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
120. Becker, R. (2008, December). Fundamentals of performance-based building design. In *Building Simulation* (Vol. 1, No. 4, pp. 356-371). Tsinghua Press
121. Eugenio Gatto, *Classificazione e automazione*. in *Quali spazi per le classificazioni?*, Tavola Rotonda AIB Piemonte, Torino, 20 gennaio 2001.
122. Lou, E. C. W., & Goulding, J. S. (2008). Building and construction classification systems. *Architectural Engineering and Design Management*, 4(3-4), 206-220.
123. Biscaya, V. N., & Tah, H. M. (2007). A literature review on information coordination in construction. In *Proceedings of the Seventh International Postgraduate Research Conference in the Built and Human Environment* (pp. 192-198). University of Salford.
124. Saleeb, N., Marzouk, M., & Atteya, U. (2018). A comparative suitability study between classification systems for bim in heritage. *Building Information Systems in the Construction Industry*, 137.
125. Ekholm, A. (2005). ISO 12006-2 AND IFC PREREQUISITES FOR COORDINATION OF STANDARDS FOR CLASSIFICATION AND INTEROPERABILITY. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 10(19), 275-289.
126. Laakso, M., & Kiviniemi, A. O. (2012). The IFC standard: A review of history, development, and standardization, information technology. *ITcon*, 17(9), 134-161.
127. Daniotti, B., Dejacco, M. C., Re Cecconi, F., & Maltese, S. (2017). Sistemi di classificazione per il costruito-Rassegna dei principali sistemi di classificazione e proposta di un nuovo metodo. In *BHIMM-Built Heritage Information Modeling Management* (pp. 1-19). IMREADY Srl
128. Davis, K. A., & Songer, A. D. (2009). Resistance to IT change in the AEC industry: Are the stereotypes true?. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(12), 1324-1333.
129. Egan, J. (1998) *Rethinking Construction: Report of the Construction Task Force*, London: HMSO.
130. Adriaanse, A., Voordijk, H., & Dewulf, G. (2010). The use of interorganisational ICT in United States construction projects. *Automation in construction*, 19(1), 73-83.
131. Hosseini, R., Chileshe, N., Zou, J., & Baroudi, B. (2012). Approaches of implementing ICT technologies within the construction industry. In *Australasian Journal of Construction Economics and Building-Conference Series* (Vol. 1, No. 2, pp. 1-12).
132. Ruddock, L. (2006). ICT in the construction sector: Computing the economic benefits. *International Journal of Strategic Property Management*, 10(1), 39-50.
133. Molnár, M., Andersson, R., & Ekholm, A. (2007). Benefits of ICT in the construction industry—characterization of the present situation in house-building processes. In *Proceedings of CIB W78 conference* (pp. 423-8).
134. Kivrak, S., Arslan, G., & Cagatay, O. (2010). Information technology usage impacts on construction projects'success. In *Modern Building Materials, Structures and Techniques. Proceedings of the International Conference* (Vol. 10, p. 431). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
135. Koskela, L., & Kazi, A. S. (2003). Information technology in construction: how to realise the benefits?. In *Socio-technical and human cognition elements of information systems* (pp. 60-75). Igi Global.
136. Lu, Y., Li, Y., Skibniewski, M., Wu, Z., Wang, R., & Le, Y. (2015). Information and communication technology applications in architecture, engineering, and construction organizations: A 15-year review. *Journal of Management in Engineering*, 31(1), A4014010.
137. Dewett, T., & Jones, G. R. (2001). The role of information technology in the organization: a review, model, and assessment. *Journal of management*, 27(3), 313-346.
138. Cecchini, C. (2019). From data to 3D digital archive: a GIS-BIM spatial database for the historical centre of Pavia (Italy). *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 24(24), 459-471.

139. Egusquiza A., Prieto I. and Romero, A. (2014). Multiscale information management for sustainable districts rehabilitation: EFFESUS and FASUDIR projects, *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction ECPPm*, 303-308.
140. Musialski P., Wonka P., Aliaga D. G., Wimmer M., Van Gool L. and Purgathofer W. (2013). A survey of urban reconstruction, *Computer graphics forum*, Vol. 32, No. 6, 146-177
141. Noardo F. (2018). Architectural heritage semantic 3D documentation in multi-scale standard maps. *Journal of Cultural Heritage*.
142. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE) GU L 108 del 25.4.2007, pagg. 1–14
143. Wüst, T., Nebiker, S., & Landolt, R. (2004). Applying the 3D GIS DILAS to Archaeology and cultural heritage projects requirements and first results. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part 5), 407-412.
144. Calderon, C., James, P., Alderson, D., McLoughlin, A., & Wagner, T. (2012). Data availability and repeatability for urban carbon modelling: a CarbonRouteMap for Newcastle upon Tyne. *Retrofit: Manchester, UK*
145. Ferreira, J., Pinheiro, M. D., & de Brito, J. (2013). Refurbishment decision support tools review—Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. *Energy Policy*, 62, 1453-1460.
146. Laakso, M., & Kiviniemi, A. O. (2012). The IFC standard: A review of history, development, and standardization, *information technology. ITcon*, 17(9), 134-161.
147. Devogele, T., Trevisan, J., & Raynal, L. (1996, August). Building a multi-scale database with scale-transition relationships. In *Advances in GIS Research II, Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Data Handling*, pp. 337-352
148. Kolbe, T. H., & Gröger, G. (2003). Towards unified 3D city models. In *Proceedings of the Joint ISPRS Commission IV Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II in Stuttgart 2003*
149. Hu, Z. Z., Zhang, J. P., Yu, F. Q., Tian, P. L., & Xiang, X. S. (2016). Construction and facility management of large MEP projects using a multi-Scale building information model. *Advances in Engineering Software*, 100, 215-230
150. Pasimeni, M. R., Petrosillo, I., Aretano, R., Semeraro, T., De Marco, A., Zaccarelli, N., & Zurlini, G. (2014). Scales, strategies and actions for effective energy planning: A review. *Energy Policy*, 65, 165-174.
151. Liu X., Wang X., Wright G., Cheng J. C., Li X. and Liu R. (2017). A state-of-the-art review on the integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS), *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53
152. Saygi G., Agugiaro G., Hamamcioglu-Turan M. and Remondino F. (2013). Evaluation of GIS and BIM roles for the information management of historical buildings. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. 388 Sci*, 2, 283-288
153. National Institute of Building Sciences. (2007). National building information modeling standard. Nist.
154. Karan E. P., Irizarry J., and Haymaker J. (2015). BIM and GIS integration and interoperability based on semantic web technology. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(3), 04015043.]
155. de Laat R., and Van Berlo L. (2011). Integration of BIM and GIS: The development of the CityGML GeoBIM extension. In *Advances in 3D geo-information sciences* (pp. 211-225). Springer, Berlin, Heidelberg
156. Langer, F. H. H. L. W. (2007). CISAR—A Modular Database System as a Basis for Analysis and Documentation of Spatial Information
157. Zeng, Y., Skibniewski, M. J., & Tadeusiewicz, R. Y. S. Z. A. R. D. (2008). Enhancing collaboration in project-based organizations with information technology: A multi-level strategy. In *annual meeting of the Project Management Institute, Denver*.

158. Kalay, Y. E. (2001). Enhancing multi-disciplinary collaboration through semantically rich representation. *Automation in Construction*, 10(6), 741-755
159. Mark, D. M., & Frank, A. U. (1996). Experiential and formal models of geographic space. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 23(1), 3-24.
160. Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: state of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842-2889
161. Coltekin, A., Lokka, I. E., & Boér, A. (2015, August). The utilization of publicly available map types by non-experts—A choice experiment. In *Proceedings of the 27th International Cartographic Conference (ICC2015)*, Rio de Janeiro, Brazil (pp. 23-28).]
162. Prandi, F., De Amicis, R., Piffer, S., Soave, M., Cadzow, S., Boix, E. G., & D'Hondt, E. (2013). Using CityGML to deploy smart-city services for urban ecosystems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, W1
163. Agugiaro, G. (2016). Enabling “energy-awareness” in the semantic 3D city model of Vienna. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 81
164. Herbert, G., & Chen, X. (2015). A comparison of usefulness of 2D and 3D representations of urban planning. *Cartography and Geographic Information Science*, 42(1), 22-32
165. Kolbe, T.H., 2009, *Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML*, 3D Geo-Information Sciences, ISBN: 978-3-540-87395-2, pp. 15-31
166. ISO 19109:2015 Geographic information — Rules for application schema
167. Moreira, J. M., Nex, F., Agugiaro, G., Remondino, F., & Lim, N. J. (2013). From DSM to 3D building models: a quantitative evaluation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, W1.
168. Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2017). Generating 3D city models without elevation data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 1-18
169. Egusquiza, A. (2015) *Multiscale information management for historic districts' energy retrofitting*. [Tesi di dottorato, Università Politecnica della Catalogna]
170. Song, J. H., Han, S. H., Yu, K. Y., & Kim, Y. I. (2002). Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34(3/B), 259-262.
171. Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010). Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2(3), 833-860.
172. BPIE (2014). *Energy Performance Certificates across the EU* <http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Energy-Performance-Certificates-EPC-across-the-EU.-A-mapping-of-national-approaches-2014.pdf> (Accessed January 2019).
173. Mangold M, Österbring M, Wallbaum H (2015). Handling data uncertainties when using Swedish energy performance certificate data to describe energy usage in the building stock *Energy Build* 102 328–36
174. Loga T., Popiolek M., Cohen R., Corrado V., Dascalaki E., Cyx W., Geissler S., Zavrl M., Panos C., Hanratty M., Georgiev G. (2009). *Datamine: Collecting Data from Energy Certification to Monitor Performance Indicators for New and Existing buildings*.
175. Fabbri, K., Zuppiroli, M., & Ambrogio, K. (2012). Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools. *Energy and buildings*, 48, 137-145.]
176. Caputo, P., Costa, G., & Ferrari, S. (2013). A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, 55, 261-270.
177. Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Fistola, R., Sasso, M., & Vanoli, G. P. (2013). Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. *Cities*, 35, 270-283

178. Johansson, T., Vesterlund, M., Olofsson, T., & Dahl, J. (2016). Energy performance certificates and 3-dimensional city models as a means to reach national targets—A case study of the city of Kiruna. *Energy Conversion and Management*, 116, 42-57.
179. Johansson, T., Olofsson, T., & Mangold, M. (2017). Development of an energy atlas for renovation of the multifamily building stock in Sweden. *Applied energy*, 203, 723-736.
180. Paiho, S., Ketomäki, J., Kannari, L., Häkkinen, T., & Shemeikka, J. (2019). A new procedure for assessing the energy-efficient refurbishment of buildings on district scale. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101454
181. Pasichnyi, O., Wallin, J., Levihn, F., Shahrokni, H., & Kordas, O. (2019). Energy performance certificates—New opportunities for data-enabled urban energy policy instruments?. *Energy policy*, 127, 486-499.
182. Fresner, J., Morea, F., Krenn, C., Uson, J. A., & Tomasi, F. (2017). Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1650-1660.
183. Sdegno, A. (2016). Computer Aided Architecture. *Origini e sviluppo/Computer Aided Architecture. Origins and development. Disegnarecon*, 9/16, 1-6
184. Eastman, C. (1974). An Outline of the Building Description System. Research Report No. 50.
185. Brusaporci, S., Centofanti, M., Continenza, R., & Trizio, I. (2012). Sistemi Informativi Architettonici per la gestione, tutela e fruizione dell'edilizia storica.
186. Brusaporci, S. (2013). Modellazione e rappresentazione digitale per i beni architettonici. *Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano: Complex models for architectural and urban heritage*, 1.
187. Gaiani, M. (2012). Trattamento, tutela e comunicazione dei giacimenti documentali dell'architettura antica. *Vitruvio e il disegno di architettura*, 177-219.
188. Lucchese, V. (2013). Modelli per lo studio e la documentazione dell'architettura moderna. *Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano: Complex models for architectural and urban heritage*, 25.
189. Centofanti, M. (2013). Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano. *Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano: Complex models for architectural and urban heritage*.
190. UNI 11337-1:2017 Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi.
191. Nedovic-Budic, Z. (1999). Evaluating the effects of GIS technology: review of methods. *Journal of Planning Literature*, 13(3), 284-295.
192. Vandenbroucke, D., & Vancauwenberghe, G. (2016). Towards a new body of knowledge for geographic information science and technology. *Micro, Macro & Mezzo Geoinformation*, 2016(6), 7-19.
193. Zlatanova, S., Rahman, A., & Pilouk, M. (2002). 3D GIS: current status and perspectives. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4), 66-71.
194. Agugiaro, G. (2016). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy) *Applied Geomatics* 8(1) 41-56
195. Kolbe T. H., Gröger G. & Plümer L. (2005). CityGML: Interoperable access to 3D city models, *Geo-information for disaster management* 586-93
196. Li, C. (2018). 2.09 GIS for Urban Energy Analysis. In *Comprehensive geographic information systems* (pp. 187-195). Elsevier Oxford
197. Blaschke, T., Biberacher, M., Gadocha, S., & Schardinger, I. (2013). 'Energy landscapes': Meeting energy demands and human aspirations. *biomass and bioenergy*, 55, 3-16
198. Mattinen M. K., Heljo J., Vihola J., Kurvinen A., Lehtoranta S. & Nissinen A. (2014) Modeling and visualization of residential sector energy consumption and greenhouse gas emissions *Journal of cleaner production* 81 70–80
199. Dall'O' G., Galante A., Torri M. (2012). A methodology for the energy performance classification of

residential building stock on an urban scale *Energy Build* 48 211–9

200. Gemelli, A., Mancini, A., & Longhi, S. (2011). GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable energy*, 36(9), 2474-2483.
201. Jones P J, Lannon S and Williams J 2001 Modelling building energy use at urban scale IBPSA. 7th International Conference Rio de Janeiro Brazil 175–80
202. Mark D. M. & Frank A. U. (1996). Experiential and formal models of geographic space *Environment and Planning B: Planning and Design* 23(1) 3-24
203. Kim, S. A., Shin, D., Choe, Y., Seibert, T., & Walz, S. P. (2012). Integrated energy monitoring and visualization system for Smart Green City development: Designing a spatial information integrated energy monitoring model in the context of massive data management on a web based platform. *Automation in Construction*, 22, 51-59.
204. Niu, S., Pan, W., & Zhao, Y. (2015). A BIM-GIS integrated web-based visualization system for low energy building design. *Procedia Engineering*, 121, 2184-2192
205. Reinhart, C. F., & Davila, C. C. (2016). Urban building energy modeling—A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196-202.
206. Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V., & Evins, R. (2015). A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1391-1404.
207. Miettinen, R., & Paavola, S. (2014). Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. *Automation in construction*, 43, 84-91.
208. Turk, Ž. (2016). Ten questions concerning building information modelling. *Building and Environment*, 107, 274-284.
209. Wang, W., Tolk, A., & Wang, W. (2009). The levels of conceptual interoperability model: applying systems engineering principles to M&S. arXiv preprint arXiv:0908.0191. UNI EN ISO 16739:2013
210. UNI EN ISO 16739:2016 Industry Foundation Classes (IFC) per la condivisione dei dati nell'industria delle costruzioni e del facility management
211. ISO 10303-11:2004 Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual
212. buildingSMART (2019). Industry Foundation Classes Version 4.1.0.0 https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/ (Accessed March 2020)
213. Laakso, M., & Kiviniemi, A. O. (2012). The IFC standard: A review of history, development, and standardization, information technology. *ITcon*, 17(9), 134-161.
214. Pinheiro, S., Wimmer, R., O'Donnell, J., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., ... & van Treeck, C. (2018). MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation. *Automation in Construction*, 90, 91-103.
215. Maile, T., Fischer, M., & Bazjanac, V. (2007). Building energy performance simulation tools—a life-cycle and interoperable perspective. Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper, 107, 1-49.
216. Bazjanac, V., & Kiviniemi, A. (2007). Reduction, simplification, translation and interpretation in the exchange of model data. In *Cib w* (Vol. 78, pp. 163-168).
217. Bazjanac, V. (2010, November). Space boundary requirements for modeling of building geometry for energy and other performance simulation. In *CIB W78: 27th International Conference*.
218. Bazjanac, V. (2001). Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance.
219. Song, Y., Wang, X., Tan, Y., Wu, P., Sutrisna, M., Cheng, J., & Hampson, K. (2017). Trends and opportunities of BIM-GIS integration in the architecture, engineering and construction industry: A review from a spatio-temporal statistical perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 397.

220. Amirebrahimi, S.; Rajabifard, A.; Mendis, P.; Ngo, T. A data model for integrating GIS and BIM for assessment and 3D visualisation of flood damage to building. *Locate* 2015, 15, 10–12
221. Ma, Z., & Ren, Y. (2017). Integrated application of BIM and GIS: an overview. *Procedia Engineering*, 196, 1072-1079.
222. Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K. H. (2012). OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard.
223. Kolbe, T. H. (2009). Representing and exchanging 3D city models with CityGML. In *3D geo-information sciences* (pp. 15-31). Springer, Berlin, Heidelberg.
224. ISO 19107:2019 Geographic information — Spatial schema
225. Foley, J. D., Van, F. D., Van Dam, A., Feiner, S. K., Hughes, J. F., Angel, E., & Hughes, J. (1996). *Computer graphics: principles and practice* (Vol. 12110). Addison-Wesley Professional.
226. Gröger G. and Plümer L. (2012). CityGML–Interoperable semantic 3D city models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12-33
227. Stadler, A., Kolbe, T. H. (2007): Spatio-Semantic Coherence in the Integration of 3D City Models. In: *Proceedings of 5th International ISPRS Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ 2007 in Enschede, The Netherlands, 13-15 June 2007*
228. ISO TS 19103:2005 Geographic information — Conceptual schema language
229. Van den Brink L., Stoter J., and Zlatanova S. (2012). Modeling an application domain extension of CityGML in UML. In *ISPRS Conference 7th International Conference on 3D Geoinformation, The International Archives on the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(4), 11-14.
230. Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018). CityGML application domain extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 13.
231. Gilbert, T., Rösndorf, C., Plume, J., Simmons, S., Nisbet, N., Gruler, H. C., ... & Mercer, A. (2020). Built environment data standards and their integration: an analysis of IFC, CityGML and LandInfra. *Lehrstuhl für Geoinformatik*.
232. Stadler, A., Nagel, C., König, G., & Kolbe, T. H. (2009). Making interoperability persistent: A 3D geo database based on CityGML. In *3D Geo-information sciences* (pp. 175-192). Springer, Berlin, Heidelberg.
233. Atzeni, P., Ceri, S., Fraternali, P., Paraboschi, S., & Torlone, R. (2013). *Basi di dati: Modelli e linguaggi di interrogazione* (IV ed.)
234. Codd, E. F. (1970). A relational model for large shared databases *Communications of the ACM*, 13(6), 377-387.
235. Güting, R. H. (1994). An introduction to spatial database systems. *The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases*, 3(4), 357-399.
236. PostgreSQL 10.5 Documentation <https://www.postgresql.org/docs/10/index.html> (Accessed January 2020)
237. Herring, J. R. (2010). *OpenGIS implementation standard for geographic information-simple feature access-part 2: Sql option*. Open Geospatial Consortium Inc, 439.
238. Golobisky, M. F., & Vecchiotti, A. (2011). Fundamentals for the automation of object-relational database design. *International Journal of Computer Science Issues*, 8(3), 9-22.
239. Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubaue, A., ... & Kolbe, T. H. (2018). 3DCityDB-a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 5.
240. Kensek, K. (2015). Visual programming for building information modeling: energy and shading analysis case studies. *Journal of Green Building*, 10(4), 28-43.
241. Preidel, C., Daum, S., & Borrmann, A. (2017). Data retrieval from building information models based on

- visual programming. *Visualization in Engineering*, 5(1), 18.
242. Sengül, A. (2010). Extracting semantic building models from aerial stereo images and conversion to CityGML. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
243. Davis, K. A., & Songer, A. D. (2008). Resistance to IT change in the AEC industry: an individual assessment tool.
244. Mansouri, S., Castronovo, F., & Akhavian, R. (2020). Analysis of the Synergistic Effect of Data Analytics and Technology Trends in the AEC/FM Industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(3), 04019113.
245. UNI CEI ISO/IEC 25012:2014 Ingegneria del software - Requisiti di qualità e valutazione del prodotto software (SQuaRE) - Modello di qualità dei dati
246. Yan, L., Li, Z., & Xie, H. (2010, June). Segmentation of unorganized point cloud from terrestrial laser scanner in urban region. In *2010 18th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-5). IEEE.
247. The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (2019) LAS Specification 1.4 - R14. http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/03/LAS_1_4_r14.pdf (Accessed November 2019)
248. Vosselman, G. (2013). Point cloud segmentation for urban scene classification. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 1, 257-262.
249. Malpica, J. A., Alonso, M. C., Papí, F., Arozarena, A., & Martínez De Agirre, A. (2013). Change detection of buildings from satellite imagery and lidar data. *International journal of remote sensing*, 34(5), 1652-1675.
250. ARCGIS. Extract Roof Forms for Municipal Development <https://learn.arcgis.com/en/projects/extract-roof-forms-for-municipal-development/> (Accessed November 2019)
251. Jayaraj, P., & Ramiya, A. M. (2018). 3D CityGML building modelling from LIDAR point cloud data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
252. Dorninger, P., & Pfeifer, N. (2008). A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds. *Sensors*, 8(11), 7323-7343.
253. Noardo, F. (2016). Spatial ontologies for architectural heritage [Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino]
254. UNI/TS 11300-1:2014 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
255. UNI EN 12831:2018 Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto - Parte 1: Carico termico per il riscaldamento degli ambienti, Modulo M3-3
256. CNR-ICR (1990) Raccomandazioni NorMal 1/88. Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico, Roma.
257. Nouvel, R., Bahu, J. M., Kaden, R., Kaempf, J., Cipriano, P., Lauster, M., ... & Casper, E. (2015). Development of the CityGML application domain extension energy for urban energy simulation. In *Building Simulation 2015-14th Conference of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 559-564).
258. Agugiario, G., Benner, J., Cipriano, P., & Nouvel, R. (2018). The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 2.
259. Noardo, F. (2016, April). A spatial ontology for architectural heritage information. In *International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management* (pp. 143-163). Springer, Cham.
260. Noardo, F. (2018). Architectural heritage semantic 3D documentation in multi-scale standard maps. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 156-165.
261. Sengül, A. (2010). Extracting semantic building models from aerial stereo images and conversion to CityGML. [Tesi di laurea magistrale, ITÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Istanbul]
262. Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., & Stoter, J. (2016). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically

and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS*, 20(4), 547-569.

263. Cheng, J., Deng, Y., & Du, Q. (2013, October). Mapping between BIM models and 3D GIS city models of different levels of detail. In 13th international conference on construction applications of virtual reality, London (pp. 30-31).

264. El-Mekawy, M., Östman, A., & Hijazi, I. (2012). A unified building model for 3D urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(2), 120-145.

265. Lilis, G. N., Giannakis, G. I., & Rovas, D. V. (2015, December). Detection and semi-automatic correction of geometric inaccuracies in IFC files. In 14th International Conference of IBPSA-Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings (pp. 2182-2189). IBPSA.

266. Magrini, A., Gobbi, L., & d'Ambrosio, F. R. (2016). Energy audit of public buildings: the energy consumption of a University with modern and historical buildings. Some results. *Energy Procedia*, 101, 169-175.

267. Magrini A., Gobbi L. (2017). Prestazioni energetiche del patrimonio edilizio pubblico: Un caso studio. *La termotecnica*, 1(50).

268. ENEA, FIRE (2002). Guida per il contenimento della spesa energetica nelle scuole, Centro ricerche Casaccia, Roma.

PARTE 2: UNO STRUMENTO DI SUPPORTO ALLA DECISIONE PER IL MIGLIORAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI ESISTENTI

269. Kalay, Y. E. (1999). Performance-based design. *Automation in construction*, 8(4), 395-409..

270. Morandotti, M. (2012). Contenuto vs. contenitore? Criteri predittivi di impatto e soglie di resilienza nella prospettiva del recupero sostenibile. *IN_BO. Ricerche e progetti per il territorio, la città e l'architettura*, 3(5), 161-178.

271. Paulson Jr, B. C. (1976). Designing to reduce construction costs. *Journal of the construction division*, 102(C04).

272. MacLeamy, P. (2004). MacLeamy curve. *Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design and Construction and Operation (WP-1202)*.

273. Schade, J., Olofsson, T., & Schreyer, M. (2011). Decision-making in a model-based design process. *Construction management and Economics*, 29(4), 371-382.

274. Iannone, F. (2009). Analisi multicriteria per la classificazione di possibili interventi di potenziamento logistico dell'Area vasta pometina secondo le dimensioni ACIT (No. 0901).

275. Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods. In *Multi-criteria decision making methods: A comparative study* (pp. 5-21). Springer, Boston, MA.

276. Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043-1058.

277. Zanchetta, C., Cecchini, C., & Bellotto, C. (2018). BIM-Based multi-objective optimization process for energy and comfort simulation: existing tools analysis and workflow proposal on a case study. *Journal of Buildings and Sustainability*, 1(1), 11-26.

278. Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(4), 1753-1766.

279. Censor, Y. (1977). Pareto optimality in multiobjective problems. *Applied Mathematics and Optimization*, 4(1), 41-59.

280. Power, D. J. (2008). Decision support systems: a historical overview. In *Handbook on decision support systems 1* (pp. 121-140). Springer, Berlin, Heidelberg.

281. Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in

- sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2263-2278.
282. Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G., & Kalaitzakis, K. (2009). Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. *Advances in building energy research*, 3(1), 121-146.
283. Ferreira, J., Pinheiro, M. D., & de BRITO, J. (2013). Refurbishment decision support tools review—Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. *Energy Policy*, 62, 1453-1460
284. BPIE (Buildings Performance Institute Europe)(2010). Cost optimality. Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive. Buildings Performance Institute Europe (BPIE): Brussels, Belgium.
285. UNI EN 15603:2008 Prestazione energetica degli edifici - Consumo energetico globale e definizione dei metodi di valutazione energetica
286. UNI EN ISO 52000-1:2018 Prestazione energetica degli edifici - Valutazione globale EPB - Parte 1: Struttura generale e procedure
287. UNI EN 15459-1:2017 Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings - Part 1: Calculation procedures, Module M1-14
288. Ferreira, M., Almeida, M., Rodrigues, A., & Silva, S. M. (2016). Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit. *Building Research & Information*, 44(2), 188-201.
289. Spigliantini, G. (2015). La metodologia cost-optimal a supporto della progettazione: valutazione di scenari alternativi tra costi, benefici ed opportunità (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
290. Decreto Legislativo 18 aprile 2016, n. 50 Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture. GU Serie Generale n.91 del 19-04-2016 - Suppl. Ordinario n. 10
291. Schema di Decreto Ministeriale recante definizione dei contenuti della progettazione nei tre livelli progettuali ai sensi dell'articolo 23, comma 3 del decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50
292. Morandotti, M., Besana, D., Cecchini, C., & Chiesa, A. (2019, July). A decision-making process for resilience assessment in adaptive reuse. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 296, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
293. Ferrara, M., Monetti, V., & Fabrizio, E. (2018). Cost-optimal analysis for nearly zero energy buildings design and optimization: a critical review. *Energies*, 11(6), 1478.
294. Ascione, F., Cheche, N., De Masi, R. F., Minichiello, F., & Vanoli, G. P. (2015). Design the refurbishment of historic buildings with the cost-optimal methodology: The case study of a XV century Italian building. *Energy and Buildings*, 99, 162-176.
295. Tadeu, S., Rodrigues, C., Tadeu, A., Freire, F., & Simões, N. (2015). Energy retrofit of historic buildings: Environmental assessment of cost-optimal solutions. *Journal of Building Engineering*, 4, 167-176.
296. Ramos, J. S., Domínguez, S. Á., Moreno, M. P., Delgado, M. G., Rodríguez, L. R., & Ríos, J. A. T. (2019). Design of the Refurbishment of Historic Buildings with a Cost-Optimal Methodology: A Case Study. *Applied Sciences*, 9(15), 3104.
297. Ferrara, M., Dabbene, F., & Fabrizio, E. (2017, August). Optimization algorithms supporting the cost optimal analysis: the behavior of PSO. In *Proceedings of the Building Simulation 2017 Conference, IBPSA, San Francisco, CA, USA* (pp. 7-9).
298. Mauro, G. M., Hamdy, M., Vanoli, G. P., Bianco, N., & Hensen, J. L. (2015). A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. *Energy and Buildings*, 107, 456-478.
299. Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012 del 16 gennaio 2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione

energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per calcolare livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, OJ C 115, 19.4.2012, p. 1–28.

300. Corrado, V., Ballarini, I., & Paduos, S. (2013). Sviluppo della metodologia comparativa cost-optimal secondo Direttiva 2010/31/UE. Report RdS/2013/144. Roma: ENEA.

301. DEI (2018) *Prezzario Recupero, Ristrutturazione, Manutenzione* – ottobre 2018, Tipografia del Genio Civile.

302. UNI/TS 11300-1:2008 *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*

303. Guazzi, G., Bellazzi, A., Meroni, I., & Magrini, A. (2017). Refurbishment design through cost-optimal methodology: The case study of a social housing in the northern Italy. *International Journal of Heat and Technology*, 35(1), S336-S344.

304. Becchio, C., Ferrando, D. G., Fregonara, E., Milani, N., Quercia, C., & Serra, V. (2016). The cost-optimal methodology for the energy retrofit of an ex-industrial building located in Northern Italy. *Energy and Buildings*, 127, 590-602.

305. Becchio, C., Dabbene, P., Fabrizio, E., Monetti, V., & Filippi, M. (2015). Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energy and Buildings*, 90, 173-187.

306. Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A., & Rizzo, A. (2019). Energy-efficiency measures for heritage buildings: a literature review. *Sustainable cities and society*, 45, 231-242.

307. Szmygin, B. (2015). *How to assess built heritage. Assumptions, methodologies, examples of heritage assessment systems*, Lublin University of Technology, Lublin Warsaw.

308. Seddiki, M., Anouche, K., Bennadji, A., & Boateng, P. (2016). A multi-criteria group decision-making method for the thermal renovation of masonry buildings: The case of Algeria. *Energy and Buildings*, 129, 471-483.

309. Eriksson, P., Hermann, C., Hrabovszky-Horváth, S., & Rodwell, D. (2014). EFFESUS methodology for assessing the impacts of energy-related retrofit measures on heritage significance. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5(2), 132-149.

310. Wells, J. C. (2010). Our history is not false: Perspectives from the revitalisation culture. *International Journal of Heritage Studies*, 16(6), 464-485.

311. Ciulla, G., Galatioto, A., & Ricciu, R. (2016). Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings. *Energy and Buildings*, 128, 649-659.

312. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search. Optimization, and MachineLearning*.

313. Kennedy, M. C., Ford, E. D., Singleton, P., Finney, M., & Agee, J. K. (2008). Informed multi-objective decision-making in environmental management using Pareto optimality. *Journal of Applied Ecology*, 45(1), 181-192.

314. Fredrizzi, R., & Dipasquale, C. (2015). *Fabbisogni energetici: case e uffici sotto la lente*.

315. de Vasconcelos, A. B., Pinheiro, M. D., Manso, A., & Cabaço, A. (2016). EPBD cost-optimal methodology: Application to the thermal rehabilitation of the building envelope of a Portuguese residential reference building. *Energy and Buildings*, 111, 12-25.

316. Capros, P., De Vita, A., Höglund Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Bottcher, H., ... & Witzke, H. P. (2013). *EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050-Reference scenario 2013*. European Commission.

317. UNI 10349-1:2016 *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata*

318. Tolomelli, D. (2007). I marchesi Botta Adorno tra Lombardia e Piemonte. Il palazzo di città e le residenze di campagna, Voghera: EDO Edizioni Oltrepò.
319. Zatti, S. (1991). Arti figurative a Pavia in età francese: un patrimonio depauperato. *Annali di storia pavese*, 20, 57-70.
320. Besana, D. (2017), Palazzo Botta Adorno in Besana, D. [RICH:] - Reuse and Improvement of Cultural Heritage, Aracne Editore, Roma.
321. Maretti, S., Maffei, J., Razzetti, E., Guaschi, P., Mellerio, G. G., Cani, V., ... & Mazzarello, P. (2019) La valorizzazione del patrimonio nella creazione di un percorso espositivo moderno.
322. Capitani, O. (1969). Chiese e monasteri pavesi nel secolo X. In *Atti del IV Congresso Internazionale di Studi sull'alto Medioevo*, 137-150.
323. Bolognesi, G. (2018). Palazzo San Felice: progetto di riqualificazione e studio dell'accessibilità. [Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Edile-Architettura, Università di Pavia]
324. Berengo Gardin, S. (1992). Il monastero di San Felice di Pavia. *Bollettino della Società pavese storia patria*, 44, 23-35.
325. Morandotti, M., Zamperini, E., Lucenti, S., & D'Andrea, M. (2016). Expeditious survey of historic timber roofs. An applied research for Palazzo San Felice in Pavia, Italy. In *Proceedings of the world conference on timber engineering*.

ALLEGATI

Allegato 1: EM_ADE (Application Domain Extension) in formato XML

```
<?xml version="2.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<xsd:schema xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
            xmlns:bldg="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0"
            xmlns:core="http://www.opengis.net/citygml/2.0"
            xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml" targetNamespace="EM_
ADE_namespace"
            elementFormDefault="qualified"
            attributeFormDefault="unqualified">
  <xsd:import namespace="http://www.opengis.net/gml"
    schemaLocation="../../3.1.1/base/gml.xsd"/>
  <xsd:import namespace="http://www.opengis.net/citygml/2.0"
    schemaLocation="../../CityGML/cityGMLBase.xsd"/>
  <xsd:import namespace="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0"
    schemaLocation="../../CityGML/building.xsd"/>
  <!--CityObject-->
  <xsd:element name="CHDeclarationDocument" type="xsd:string"
    substitutionGroup="core:_GenericApplicationPropertyOfCityObject"/>
  <xsd:element name="HasCHDeclaration" type="xsd:boolean"
    substitutionGroup="core:_GenericApplicationPropertyOfCityObject"/>
  <xsd:element name="Ownership" type="xsd:string" substitutionGroup="core:_
GenericApplicationPropertyOfCityObject"/>
  <xsd:element name="PreservationAuthorityName" type="xsd:string"
    substitutionGroup="core:_GenericApplicationPropertyOfCityObject"/>
  <!--AbstractBuilding-->
  <xsd:element name="Denomination" type="xsd:string"
    substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="AATStylePeriod" type="xsd:string"
    substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="HeatedArea" type="gml:MeasureType"
    substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="HeatedVolume" type="gml:MeasureType"
    substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="AnnualThermalEnergy" type="gml:MeasureType"
    substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="AnnualElectricalEnergy" type="gml:MeasureType"
    substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="hasEpc" type="xsd:boolean" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="epcClass" type="xsd:string" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <xsd:element name="has" minOccurs="0"
    maxOccurs="unbounded" type="abstractHVAVSystemType" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding"/>
  <annotation>
    <appinfo>
      <gml:targetElement>abstractHVACSystem</gml:targetElement>
    </appinfo>
  </annotation>
```

```

<!--BoundarySurface-->
  <xsd:element name="BSArea" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="BSThickness" type="gml:LengthType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="IfcElementType" type="xsd:string"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="IfcType" type="xsd:string" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="TimeOfBeginningExistence" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="TimeOfEndingExistence" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="Deterioration" type="xsd:string"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="IsThermalBoundary" type="xsd:boolean"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="Transmittance" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="Emissivity" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="AbsorptionCoefficient" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="AFin" type="gml:MeasureType" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="AHor" type="gml:MeasureType" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="AOv" type="gml:MeasureType" substitutionGroup="bldg:_
GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="BoundaryCondition" type="xsd:string"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
  <xsd:element name="Exposition" type="xsd:string"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface"/>
<!--Opening-->
  <xsd:element name="SolarFactor" type="gml:MeasureType"
substitutionGroup="bldg:_GenericApplicationPropertyOfOpening"/>
</xsd:schema>
<!--AbstractHVAVSystem-->
<element name="AbstractHVACSystem" type="AbstractHVACSystemType"
substitutionGroup="gml:_Feature" />
<complexType name="AbstractHVACSystemType">
  <complexContent>
    <extension base="gml:AbstractFeatureType">
      <sequence>
        <element name="denomination" type="xsd:string" />
        <element name="type" type="xsd:string" />
        <element name="description" type="xsd:string" />
        <element name="tearOfInstallation" type="gml:MeasureType" />
        <element name="efficiency" type="gml:MeasureType" />
      </sequence>
    </extension>
  </complexContent>
</complexType>

```



```

        </extension>
        </complexContent>
    </complexType>
    <complexType name="AbstractHVACSystemType">
        <sequence>
            <element ref="AbstractHVACSystem" minOccurs="0" />
        </sequence>
        <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup" />
    </complexType>
    <!--Generation-->
    <element name="Generation" type="GenerationType"
substitutionGroup="AbstractHVACSystem" />
    <complexType name="GenerationType">
        <complexContent>
            <extension base="GenerationType">
                <sequence>
                    <element name="deliverdPower" type="gml:MeasureType" />
                </sequence>
            </extension>
        </complexContent>
    </complexType>
    <complexType name="GenerationType">
        <sequence>
            <element ref="Generation" minOccurs="0" />
        </sequence>
        <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup" />
    </complexType>
    <!--Distribution-->
    <element name="Distribution" type="DistributionType"
substitutionGroup="AbstractHVACSystem" />
    <complexType name="DistributionType">
        <complexContent>
            <extension base="DistributionType"> </extension>
        </complexContent>
    </complexType>
    <complexType name="DistributionType">
        <sequence>
            <element ref="Distribution" minOccurs="0" />
        </sequence>
        <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup" />
    </complexType>
    <!--Regulation-->
    <element name="Regulation" type="RegulationType"
substitutionGroup="AbstractHVACSystem" />
    <complexType name="RegulationType">
        <complexContent>
            <extension base="RegulationType"> </extension>
        </complexContent>
    </complexType>
    <complexType name="RegulationType">

```

```

        <sequence>
            <element ref="Regulation" minOccurs="0" />
        </sequence>
        <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup" />
    </complexType>
    <!--Emission-->
    <element name="Emission" type="EmissionType"
substitutionGroup="AbstractHVACSystem" />
    <complexType name="EmissionType">
        <complexContent>
            <extension base="EmissionType"> </extension>
        </complexContent>
    </complexType>
    <complexType name="EmissionType">
        <sequence>
            <element ref="Emission" minOccurs="0" />
        </sequence>
        <attributeGroup ref="gml:AssociationAttributeGroup" />
    </complexType>

```

Allegato 2: Script SQL per la creazione della struttura del database

```
create extension Postgis

create table city_model
(gml_id varchar(50) primary key,
citygml_target_uri varchar(100),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50));

create table building
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references city_model(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
citygml_class varchar(50),
citygml_function varchar(50),
citygml_usage varchar(50),
citygml_roof_type varchar(10),
citygml_measured_height real,
citygml_storey_above_ground int,
citygml_storey_heights_above_ground real,
citygml_storey_below_ground int,
citygml_storey_heights_below_ground real,
citygml_year_of_construction int,
citygml_year_of_demolition int,
heated_area real,
heated_volume real,
annual_electrical_energy real,
annual_thermal_energy real,
denomination varchar(50),
ownership varchar(50),
aat_style_period varchar(50),
has_ch_declaration boolean,
preservation_authority_name varchar(50),
ch_declaration_document varchar(100)),
has_epc boolean,
epc_class varchar(5);

create table wall_surface
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
bs_area real,
bs_thickness real,
```

```

is_thermal_boundary boolean,
boundary_condition varchar(10),
transmittance real,
emissivity real,
absorption_coefficient real,
exposition varchar(1),
afin real,
aov real,
ahor real,
ifc_element_type varchar(50) default 'ifcWall',
deterioration varchar(100),
time_of_beginning_existence varchar(20),
time_of_ending_existence varchar(20),
geom_text varchar (100000));

```

```

create table roof_surface
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
bs_area real,
bs_thickness real,
is_thermal_boundary boolean,
boundary_condition varchar(10),
transmittance real,
emissivity real,
absorption_coefficient real,
exposition varchar(1),
afin real,
aov real,
ahor real,
ifc_element_type varchar(50) default 'ifcRoof',
deterioration varchar(100),
time_of_beginning_existence varchar(20),
time_of_ending_existence varchar(20),
geom_text varchar (100000));

```

```

create table ground_surface
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
bs_area real,
bs_thickness real,
is_thermal_boundary boolean,
boundary_condition varchar(10),

```

```

transmittance real,
emissivity real,
absorption_coefficient real,
exposition varchar(1),
afin real,
aov real,
ahor real,
ifc_element_type varchar(50) default 'ifcFloor',
deterioration varchar(100),
time_of_beginning_existence varchar(20),
time_of_ending_existence varchar(20),
geom_text varchar (100000));

```

```

create table floor_surface
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
bs_area real,
bs_thickness real,
is_thermal_boundary boolean,
boundary_condition varchar(10),
transmittance real,
emissivity real,
absorption_coefficient real,
exposition varchar(1),
afin real,
aov real,
ahor real,
ifc_element_type varchar(50) default 'ifcFloor',
deterioration varchar(100),
time_of_beginning_existence varchar(20),
time_of_ending_existence varchar(20),
geom_text varchar (100000));

```

```

create table window_surface
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references wall_surface(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
bs_area real,
bs_thickness real,
is_thermal_boundary boolean,
boundary_condition varchar(10),
transmittance real,
emissivity real,

```

```

absorption_coefficient real,
solar_factor real,
exposition varchar(1),
afin real,
aov real,
ahor real,
ifc_element_type varchar(50) default 'ifcWindow',
deterioration varchar(100),
time_of_beginning_existence varchar(20),
time_of_ending_existence varchar(20),
geom_text varchar (100000));

create table door_surface
(gml_id varchar(50) primary key,
gml_parent_id varchar (50) references wall_surface(gml_id),
citygml_target_uri varchar(100),
citygml_feature_role varchar(50),
gml_description varchar(100),
gml_name varchar(50),
bs_area real,
bs_thickness real,
is_thermal_boundary boolean,
boundary_condition varchar(10),
transmittance real,
emissivity real,
absorption_coefficient real,
solar_factor real,
exposition varchar(1),
afin real,
aov real,
ahor real,
ifc_element_type varchar(50) default 'ifcWindow',
deterioration varchar(100),
time_of_beginning_existence varchar(20),
time_of_ending_existence varchar(20),
geom_text varchar (100000));

create table srs
(srid int primary key references spatial_ref_sys(srid),
gml_srsname varchar(50));

create table ers
(ID varchar(50) primary key,
price_list_ref varchar(50),
element_type varchar(50),
position varchar(3),
name varchar(50),
description varchar(100),
material varchar(50),
conductivity real,

```

```
thickness real,  
transmittance real,  
solar_factor real,  
emissivity real,  
unit_cost real,  
life_span int,  
maintenace_cost real,  
disposal_cost real);
```

```
create table generation_system  
(gml_id varchar(50) primary key,  
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),  
denomination varchar(50),  
type varchar(100),  
description varchar(100),  
gml_name varchar(50),  
yearOfInstrallation int,  
efficiency real,  
deliveredPower real);
```

```
create table distribution_system  
(gml_id varchar(50) primary key,  
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),  
denomination varchar(50),  
type varchar(100),  
description varchar(100),  
gml_name varchar(50),  
yearOfInstrallation int,  
efficiency real);
```

```
create table regulation_system  
(gml_id varchar(50) primary key,  
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),  
denomination varchar(50),  
type varchar(100),  
description varchar(100),  
gml_name varchar(50),  
yearOfInstrallation int,  
efficiency real);
```

```
create table emission_system  
(gml_id varchar(50) primary key,  
gml_parent_id varchar (50) references building(gml_id),  
denomination varchar(50),  
type varchar(100),  
description varchar(100),  
gml_name varchar(50),  
yearOfInstrallation int,  
efficiency real);
```

Allegato 3: Script SQL per l'integrazione delle componenti geometriche nel database

```
SELECT AddGeometryColumn ('public', 'floor_surface', 'geometry', 32632,
'multipolygonz', 3);
SELECT AddGeometryColumn ('public', 'wall_surface', 'geometry', 32632,
'multipolygonz', 3);
SELECT AddGeometryColumn ('public', 'roof_surface', 'geometry', 32632,
'multipolygonz', 3);
SELECT AddGeometryColumn ('public', 'ground_surface', 'geometry', 32632,
'multipolygonz', 3);
SELECT AddGeometryColumn ('public', 'window_surface', 'geometry', 32632,
'multipolygonz', 3);
SELECT AddGeometryColumn ('public', 'door_surface', 'geometry', 32632,
'multipolygonz', 3);
```

```
UPDATE floor_surface set geometry=(ST_geomfromtext(geom_text, 32632));
UPDATE wall_surface set geometry=(ST_geomfromtext(geom_text, 32632));
UPDATE roof_surface set geometry=(ST_geomfromtext(geom_text, 32632));
UPDATE ground_surface set geometry=(ST_geomfromtext(geom_text, 32632));
UPDATE window_surface set geometry=(ST_geomfromtext(geom_text, 32632));
UPDATE door_surface set geometry=(ST_geomfromtext(geom_text, 32632));
```


Allegato 4: Script JavaScript per la gestione della mappa interattiva nella piattaforma CesiumJS

```
// Accesso al modello CityGML
Cesium.Ion.defaultAccessToken = [codice alfanumerico che collega il file gbXML
caricato nel portale]
var viewer = new Cesium.Viewer('cesiumContainer');
var tileset = viewer.scene.primitives.add(
    new Cesium.Cesium3DTileset({
        url: Cesium.IonResource.fromAssetId(71604)
    })
);
viewer.zoomTo(tileset)
    .otherwise(function (error) {
        console.log(error);
    });
// Caricamento del Cesium World Terrain
viewer.terrainProvider = Cesium.createWorldTerrain({
    requestWaterMask : true, // required for water effects
    requestVertexNormals : true // required for terrain lighting
});
// Impostazione dell'altezza da terra delle tiles
var heightOffset = 0;
tileset.readyPromise.then(function(tileset) {
    // Position tileset
    var boundingSphere = tileset.boundingSphere;
    var cartographic = Cesium.Cartographic.fromCartesian(boundingSphere.
center);
    var surface = Cesium.Cartesian3.fromRadians(cartographic.longitude,
cartographic.latitude, 0.0);
    var offset = Cesium.Cartesian3.fromRadians(cartographic.longitude,
cartographic.latitude, heightOffset);
    var translation = Cesium.Cartesian3.subtract(offset, surface, new Cesium.
Cartesian3());
    tileset.modelMatrix = Cesium.Matrix4.fromTranslation(translation);
});
// Funzione mostra proprietà al passaggio del mouse (ID_EDIF)
var nameOverlay = document.createElement('div');
viewer.container.appendChild(nameOverlay);
nameOverlay.className = 'backdrop';
nameOverlay.style.display = 'none';
nameOverlay.style.position = 'absolute';
nameOverlay.style.bottom = '0';
nameOverlay.style.left = '0';
nameOverlay.style['pointer-events'] = 'none';
nameOverlay.style.padding = '4px';
nameOverlay.style.backgroundColor = 'black';
// Information about the currently selected feature
var selected = {
    feature: undefined,
    originalColor: new Cesium.Color()
```

```

};
var selectedEntity = new Cesium.Entity();
// Gestione click sinistro
var clickHandler = viewer.screenSpaceEventHandler.getInputAction(Cesium.
ScreenSpaceEventType.LEFT_CLICK);
// Funzione silhouette blu al passaggio del mouse e verde al click
// Se le silhouette non sono supportate, funzione colore dell'oggetto giallo
al passaggio del mouse e verde al click
if (Cesium.PostProcessStageLibrary.isSilhouetteSupported(viewer.scene)) {
    var silhouetteBlue = Cesium.PostProcessStageLibrary.
createEdgeDetectionStage();
    silhouetteBlue.uniforms.color = Cesium.Color.BLUE;
    silhouetteBlue.uniforms.length = 0.01;
    silhouetteBlue.selected = [];
    var silhouetteGreen = Cesium.PostProcessStageLibrary.
createEdgeDetectionStage();
    silhouetteGreen.uniforms.color = Cesium.Color.LIME;
    silhouetteGreen.uniforms.length = 0.01;
    silhouetteGreen.selected = [];
    viewer.scene.postProcessStages.add(Cesium.PostProcessStageLibrary.
createSilhouetteStage([silhouetteBlue, silhouetteGreen]));
    viewer.screenSpaceEventHandler.setInputAction(function
onMouseMove(movement) {
        silhouetteBlue.selected = [];
        var pickedFeature = viewer.scene.pick(movement.endPosition);
        if (!Cesium.defined(pickedFeature)) {
            nameOverlay.style.display = 'none';
            return;
        }
        nameOverlay.style.display = 'block';
        nameOverlay.style.bottom = viewer.canvas.clientHeight - movement.
endPosition.y + 'px';
        nameOverlay.style.left = movement.endPosition.x + 'px';
        var name = pickedFeature.getProperty('ID_EDIF');
        if (!Cesium.defined(name)) {
            name = pickedFeature.getProperty('OBJECTID');
        }
        nameOverlay.textContent = name;
        if (pickedFeature !== selected.feature) {
            silhouetteBlue.selected = [pickedFeature];
        }
    }, Cesium.ScreenSpaceEventType.MOUSE_MOVE);
    viewer.screenSpaceEventHandler.setInputAction(function
onLeftClick(movement) {
        silhouetteGreen.selected = [];
        var pickedFeature = viewer.scene.pick(movement.position);
        if (!Cesium.defined(pickedFeature)) {
            clickHandler(movement);
            return;
        }
    }

```

```

    if (silhouetteGreen.selected[0] === pickedFeature) {
        return;
    }
    var highlightedFeature = silhouetteBlue.selected[0];
    if (pickedFeature === highlightedFeature) {
        silhouetteBlue.selected = [];
    }
    silhouetteGreen.selected = [pickedFeature];
    var featureName = pickedFeature.getProperty('ID_EDIF');
    selectedEntity.name = featureName;
    selectedEntity.description = 'Loading <div class="cesium-infoBox-
loading"></div>';
    viewer.selectedEntity = selectedEntity;
    selectedEntity.description = '<table class="cesium-infoBox-
defaultTable"><tbody>' +
        '<tr><th>ID_EDIF</th><td>' +
pickedFeature.getProperty('ID_EDIF') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>ANNO_COSTRUZIONE</th><td>' +
pickedFeature.getProperty('ANNO_SOGLI') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>H_EDIF</th><td>' + pickedFeature.
getProperty('H_EDIF') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>SUP_RISCALDATA</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_S_utile_risc') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>SUP_
RAFFRESCATA</th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_S_utile_raff') + '</
td></tr>' +
        '<tr><th>EP_GL_NREN</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_EP_GL_NREN_N') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>EP_GL_REN</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_EP_GL_REN_N') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>EMISSIONI_CO2</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_CO2_Emissioni') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>E_ELETTICA</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_E_elettrica') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>E_TERMICA</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_E_gas_naturale') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>CLASSE_
ENERGETICA_MIN</th><td>' + pickedFeature.getProperty('Mean_Classe_energetica_
min') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>CLASSE_
ENERGETICA_MAX</th><td>' + pickedFeature.getProperty('Mean_Classe_energetica_
max') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>CLASSE_
ENERGETICA_MED</th><td>' + pickedFeature.getProperty('Mean_Classe_energetica_
med') + '</td></tr>' +
        '</tbody></table>';
    }, Cesium.ScreenSpaceEventType.LEFT_CLICK);
} else {
    var highlighted = {
        feature : undefined,

```

```

        originalColor : new Cesium.Color()
    };
    viewer.screenSpaceEventHandler.setInputAction(function
onMouseMove(movement) {
        // If a feature was previously highlighted, undo the highlight
        if (Cesium.defined(highlighted.feature)) {
            highlighted.feature.color = highlighted.originalColor;
            highlighted.feature = undefined;
        }
        var pickedFeature = viewer.scene.pick(movement.endPosition);
        if (!Cesium.defined(pickedFeature)) {
            nameOverlay.style.display = 'none';
            return;
        }
        nameOverlay.style.display = 'block';
        nameOverlay.style.bottom = viewer.canvas.clientHeight - movement.
endPosition.y + 'px';
        nameOverlay.style.left = movement.endPosition.x + 'px';
        var name = pickedFeature.getProperty('ID_EDIF');
        if (!Cesium.defined(name)) {
            name = pickedFeature.getProperty('OBJECTID');
        }
        nameOverlay.textContent = name;
        if (pickedFeature !== selected.feature) {
            highlighted.feature = pickedFeature;
            Cesium.Color.clone(pickedFeature.color, highlighted.originalColor);
            pickedFeature.color = Cesium.Color.YELLOW;
        }
    }, Cesium.ScreenSpaceEventType.MOUSE_MOVE);
    viewer.screenSpaceEventHandler.setInputAction(function
onLeftClick(movement) {
        if (Cesium.defined(selected.feature)) {
            selected.feature.color = selected.originalColor;
            selected.feature = undefined;
        }
        var pickedFeature = viewer.scene.pick(movement.position);
        if (!Cesium.defined(pickedFeature)) {
            clickHandler(movement);
            return;
        }
        if (selected.feature === pickedFeature) {
            return;
        }
        selected.feature = pickedFeature;
        if (pickedFeature === highlighted.feature) {
            Cesium.Color.clone(highlighted.originalColor, selected.
originalColor);
            highlighted.feature = undefined;
        } else {
            Cesium.Color.clone(pickedFeature.color, selected.originalColor);

```

```

    }
    pickedFeature.color = Cesium.Color.LIME;
    var featureName = pickedFeature.getProperty('ID_EDIF');
    selectedEntity.name = featureName;
    selectedEntity.description = 'Loading <div class="cesium-infoBox-
loading"></div>';
    viewer.selectedEntity = selectedEntity;
    selectedEntity.description = '<table class="cesium-infoBox-
defaultTable"><tbody>' +
        '<tr><th>ID_EDIF</th><td>' +
pickedFeature.getProperty('ID_EDIF') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>ANNO_COSTRUZIONE</th><td>' +
pickedFeature.getProperty('ANNO_SOGLI') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>H_EDIF</th><td>' + pickedFeature.
getProperty('H_EDIF') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>SUP_RISCALDATA</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_S_utile_risc') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>SUP_
RAFFRESCATA</th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_S_utile_raff') + '</
td></tr>' +
        '<tr><th>EP_GL_NREN</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_EP_GL_NREN_N') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>EP_GL_REN</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_EP_GL_REN_N') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>EMISSIONI_CO2</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_CO2_Emissioni') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>E_ELETTICA</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_E_elettrica') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>E_TERMICA</
th><td>' + pickedFeature.getProperty('SUM_E_gas_naturale') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>CLASSE_
ENERGETICA_MIN</th><td>' + pickedFeature.getProperty('Mean_Classe_energetica_
min') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>CLASSE_
ENERGETICA_MAX</th><td>' + pickedFeature.getProperty('Mean_Classe_energetica_
max') + '</td></tr>' +
        '<tr><th>CLASSE_
ENERGETICA_MED</th><td>' + pickedFeature.getProperty('Mean_Classe_energetica_
med') + '</td></tr>' +
        '</tbody></table>';
    }, Cesium.ScreenSpaceEventType.LEFT_CLICK);
}
// Stile di visualizzazione semplice - togliere commento successivo per
applicare
var defaultStyle = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
    color : "color('white')",
    show : true
});
// tileset.style = defaultStyle;
// Stile di visualizzazione condizionale

```

```

function colorBy_Srisc() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${SUM_S_utile_risc}) > 10000', 'rgba(216, 19,
26, 1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_risc}) > 5000', 'rgba(247, 149, 22,
1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_risc}) > 2000', 'rgba(253, 211, 1, 1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_risc}) > 1000', 'rgba(171, 203, 45,
1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_risc}) > 500', 'rgba(51, 111, 27, 1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_risc}) > 100', 'rgba(0, 52, 105, 1)'],
                ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
            ]
        }
    });
}
function colorBy_Sraff() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${SUM_S_utile_raff}) > 10000', 'rgba(216, 19, 26,
1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_raff}) > 5000', 'rgba(247, 149, 22,
1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_raff}) > 2000', 'rgba(253, 211, 1, 1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_raff}) > 1000', 'rgba(171, 203, 45,
1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_raff}) > 500', 'rgba(51, 111, 27, 1)'],
                ['Number(${SUM_S_utile_raff}) > 100', 'rgba(0, 52, 105, 1)'],
                ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
            ]
        }
    });
}
function colorBy_EP_NREN() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${SUM_EP_GL_NREN_N}) > 1000000', 'rgba(216, 19, 26,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_NREN_N}) > 500000', 'rgba(247, 149, 22,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_NREN_N}) > 20000', 'rgba(253, 211, 1,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_NREN_N}) > 10000', 'rgba(171, 203, 45,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_NREN_N}) > 5000', 'rgba(51, 111, 27, 1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_NREN_N}) > 500', 'rgba(0, 52, 105, 1)'],
            ]
        }
    });
}

```

```

        ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
    ]
    }
    });
}
function colorBy_EP_REN() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${SUM_EP_GL_REN_N}) > 1000000', 'rgba(216, 19, 26,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_REN_N}) > 500000', 'rgba(247, 149, 22,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_REN_N}) > 20000', 'rgba(253, 211, 1, 1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_REN_N}) > 10000', 'rgba(171, 203, 45,
1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_REN_N}) > 5000', 'rgba(51, 111, 27, 1)'],
                ['Number(${SUM_EP_GL_REN_N}) > 500', 'rgba(0, 52, 105, 1)'],
                ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
            ]
        }
    });
}
function colorBy_CO2() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${SUM_CO2_Emissioni}) > 1000000', 'rgba(216, 19, 26,
1)'],
                ['Number(${SUM_CO2_Emissioni}) > 500000', 'rgba(247, 149, 22,
1)'],
                ['Number(${SUM_CO2_Emissioni}) > 20000', 'rgba(253, 211, 1,
1)'],
                ['Number(${SUM_CO2_Emissioni}) > 10000', 'rgba(171, 203, 45,
1)'],
                ['Number(${SUM_CO2_Emissioni}) > 5000', 'rgba(51, 111, 27,
1)'],
                ['Number(${SUM_CO2_Emissioni}) > 500', 'rgba(0, 52, 105, 1)'],
                ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
            ]
        }
    });
}
function colorBy_Classe_min() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 9', 'rgba(255, 0, 0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 8', 'rgba(214, 92,
92, 1)'],

```

```

    ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 7', 'rgba(255, 153,
0, 1)'],
    ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 6', 'rgba(255, 204,
102, 1)'],
    ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 5', 'rgba(255, 255,
102, 1)'],
    ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 4', 'rgba(153, 204,
0, 1)'],
    ['Number(${Mean_Classe_energetica_min}) > 0', 'rgba(51, 204,
51, 1)'],
    ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
    ]
    }
    });
}
function colorBy_Classe_max() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 9', 'rgba(255, 0, 0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 8', 'rgba(214, 92,
92, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 7', 'rgba(255, 153,
0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 6', 'rgba(255, 204,
102, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 5', 'rgba(255, 255,
102, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 4', 'rgba(153, 204,
0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_max}) > 0', 'rgba(51, 204,
51, 1)'],
                ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
            ]
        }
    });
}
function colorBy_Classe_med() {
    tileset.style = new Cesium.Cesium3DTileStyle({
        color: {
            conditions: [
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 9', 'rgba(255, 0, 0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 8', 'rgba(214, 92,
92, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 7', 'rgba(255, 153,
0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 6', 'rgba(255, 204,
102, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 5', 'rgba(255, 255,
102, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 4', 'rgba(153, 204,

```



```

0, 1)'],
                ['Number(${Mean_Classe_energetica_med}) > 0', 'rgba(51, 204,
51, 1)'],
                ['true', 'rgb(150, 150, 150)']
            ]
        }
    });
} //Menu a tendina
Sandcastle.addToolbarMenu([
    {
        text : 'Superficie riscaldata',
        onselect : function() {
            colorBy_Srisc();
        }
    },
    {
        text : 'Superficie raffrescata',
        onselect : function() {
            colorBy_Sraff();
        }
    },
    {
        text : 'EP_GL_NREN',
        onselect : function() {
            colorBy_EP_NREN();
        }
    },
    {
        text : 'EP_GL_REN',
        onselect : function() {
            colorBy_EP_REN();
        }
    },
    {
        text : 'Emissioni CO2',
        onselect : function() {
            colorBy_CO2();
        }
    },
    {
        text : 'Classe energetica_min',
        onselect : function() {
            colorBy_Classe_min();
        }
    },
    {
        text : 'Classe energetica_max',
        onselect : function() {
            colorBy_Classe_max();
        }
    },
    {
        text : 'Classe energetica_med',
        onselect : function() {
            colorBy_Classe_med();
        }
    }
]);
colorBy_Classe();

```

Allegato 5: script per l'elaborazione della matrice SDF

```
% dizionari
```

```
elementi = {'distribuzione','emissione','generazione', 'regolazione','muro_terra','muro_esterno','finestra','porta','pavimento_terra','pavimento_esterno','tetto','pavimento_sottotetto'};  
valori_elementi = [10,11,12,13,0,1,2,3,4,5,6,7];  
dizionario_elementi = containers.Map (elementi,valori_elementi);
```

```
condizioni_contorno = {'Impianto','Esterno','Ambiente riscaldato alla stessa temperatura','Ambiente riscaldato ad altra temperatura','Ambiente con una parete esterna','Ambiente senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne','Ambiente con serramenti esterni e almeno due pareti esterne','Ambiente con tre pareti esterne','Piano interrato o seminterrato senza finestre e serramenti esterni','Piano interrato o seminterrato con finestre e serramenti esterni','Sottotetto tasso di ventilazione elevato','Sottotetto altro tetto non isolato','Sottotetto tetto isolato','Aree interne di circolazione senza muri esterni','Aree interne di circolazione liberamente ventilate','Solette sopra vespaio','Pavimento o parete contro terra'};  
valori_condizioni = [-1,0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15];  
dizionario_condiz = containers.Map (condizioni_contorno,valori_condizioni);
```

```
esposizioni = {'X','N','S','W','E','O'};  
valori_esposizioni = [-1,1,2,3,4,0];  
dizionario_esposizioni = containers.Map (esposizioni,valori_esposizioni);
```

```
correzioni_PT = {'X','Pareti con isolamento esterno senza aggetti/balconi e ponti termici corretti','Pareti con isolamento esterno con aggetti/balconi','Parete omogenea in mattoni o pietra (senza isolante)','Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)','Parete a cassa vuota con isolamento i intercapedine (ponte termico corretto)','Parete a cassa vuota con isolamento in intercapedine (ponte termico non corretto)','Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante interno'};  
valori_correzioni_PT = [0,0.05,0.15,0.05,0.1,0.1,0.2,0.3]  
dizionario_correzioni_PT = containers.Map (correzioni_PT,valori_correzioni_PT)
```

```
% elementi
```

```
elementi_SDF = SDF(:,2);  
valori_elementi_SDF = values (dizionario_elementi,elementi_SDF);
```

```
SDF(:,2)=valori_elementi_SDF;
```

```
% condizioni_contorno
```

```
condizioni_contorno_SDF = SDF(:,17);  
valori_condizioni_contorno_SDF = values (dizionario_condiz,condizioni_contorno_SDF);
```

```
SDF(:,17)=valori_condizioni_contorno_SDF;

% esposizioni

esposizioni_SDF = SDF(:,10);
valori_esposizioni_SDF = values (dizionario_esposizioni,esposizioni_SDF);

SDF(:,10)=valori_esposizioni_SDF;

% correzioni PT

correzioni_PT_SDF = SDF(:,9);
valori_correzioni_PT_SDF = values (dizionario_correzioni_PT,correzioni_PT_SDF);

SDF(:,9)=valori_correzioni_PT_SDF;

SDF = cell2mat(SDF);
```

Allegato 6 - Script Matlab per lo sviluppo della metodologia cost-optimal - SDF

```
ERS(isnan(ERS))=0;
SDF(isnan(SDF))=0;

SDP = SDF;

% Calcolo Ht_adj
% Htr,adj=Hd+Hg+Hu+Ha

Coeff_scambio_termico = SDP(:,3).*(SDP(:,4)+SDP(:,4).*SDP(:,9)).*SDP(:,18);

A_sol_op = SDP(:,7).*0.04.*SDP(:,4).*SDP(:,3);
A_sol_w = SDP(:,3).*SDP(:,5).*0.8.*SDP(:,8);

Htr_adj = sum(Coeff_scambio_termico);

% Calcolo QH_tr

% Qtr=Htr,adj*(θint,set,H-θe)*t
Qtr = Htr_adj.*t.*(20-Tmed)/1000;

% Σk Fr,k*Φr,mn,k
% Φr = Rse*Uc*Ac*hr*Δθer
% hr = 4 ε σ (θss + 273)^3
% hr = 5ε

Qex_temp = 0.04.*SDP(:,3).*SDP(:,4).*5.*SDP(:,6).*11.*0.5;
Qex_temp(SDP(:,2)>3) = 2*(Qex_temp(SDP(:,2)>3));

Qex = sum(Qex_temp)*t/1000;

QH_tr = (Qtr + Qex);

% Calcolo QH_ve
% Hve,adj=pa*ca*(Σk bve,k*qve,k,mn)

Hve_adj = 1200*1*1*n*Vol/3600;
QH_ve = Hve_adj*(20-Tmed)*t/1000;

% calcolo Q_int
% Qint= (Φint,occupanti+Φint,apparecchiature)*t

App_ter_occ = 0;
if Cl_occ == 1
    App_ter_occ = 15;
elseif Cl_occ == 2
    App_ter_occ = 10;
elseif Cl_occ == 3
    App_ter_occ = 5;
```

```

elseif Cl_occ == 4
    App_ter_occ = 3;
elseif Cl_occ == 5
    App_ter_occ = 2;
end

Qint_occ = App_ter_occ*Sup;

Qint_app_D1 = 3*D1*Sup;
Qint_app_D2 = 1*D2*Sup;
Qint_app_D3 = 4*D3*Sup;
Qint_app_D4 = 3*D4*Sup;
Qint_app_D5 = 3*D5*Sup;
Qint_app_D6 = 3*D6*Sup;
Qint_app_D7 = 1*D7*Sup;
Qint_app_D8 = 2*D8*Sup;
Qint_app_D9 = 2*D9*Sup;
Qint_app_D10 = 1*D10*Sup;

Qint_app = Qint_app_D1 + Qint_app_D2 + Qint_app_D3 +Qint_app_D4 + Qint_app_D5 +
Qint_app_D6 + Qint_app_D7 + Qint_app_D8 + Qint_app_D9 + Qint_app_D10;

Qint = (Qint_occ + Qint_app)*t/1000;

% Calcolo Qsol

% Qsol= (Φsol, opachi+Φsol,trasparenti)*t

% COMPONENTI OPACHI
% Φsol,k=Fsh,ob,k*Asol,k*Isol,k
% Asol,op = asol,c * Rse * Uc,eq * Ac

Isol = 0;
Isol_0 = 93.20;
Isol_S = 110.88;
Isol_N = 28.7;
Isol_EW = 70.91;

Qsol_op = 0;
for op = 1:size(SDP)
    Qsol_op(op) = (A_sol_op(op,1)).*(min(SDP(op,15),SDP(op,16))*(SDP(op,14))).*
[Isol_0(SDP(op,10)==0),Isol_N(SDP(op,10)==1), Isol_S(SDP(op,10)==2),Isol_
EW(SDP(op,10)==3), Isol_EW(SDP(op,10)==4)];
end

Qsol_opA = sum(Qsol_op);

% COMPONENTI TRASPARENTI
% Φsol,k=Fsh,ob,k*Asol,k*Isol,k
% Asol,w = Fsh,g1 * gg1 * Aw,g1

```

```

Qsol_w = 0;
for w = 1:size(SDP)
    Qsol_w(w) = (A_sol_w(w,1)).*(min(SDP(w,15),SDP(w,16))*(SDP(w,14))).*
    [Isol_0(SDP(w,10)==0),Isol_N(SDP(w,10)==1), Isol_S(SDP(w,10)==2),Isol_
    EW(SDP(w,10)==3),Isol_EW(SDP(w,10)==4)];
end

Qsol_w = sum(Qsol_w);

Qsol = (Qsol_op + Qsol_w).*t/1000;

% Calcolo fattore utilizzazione
%  $\eta_H, gn=(1-\gamma H^{aH})/(1-\gamma H^{aH+1})$ 

yH = (Qint+Qsol)/(QH_tr+QH_ve); % Qgn/Qht
aH0 = 1;
tau0 = 15;

F=0;
if (T_costr==1)
    F=80000;
elseif (T_costr==2)
    F=110000;
elseif (T_costr==3)
    F=165000;
elseif (T_costr==4)
    F=260000;
elseif (T_costr==5)
    F=370000;
end
Cm = Sup*F; % fattore di correzione * Sup

tau = (Cm/3600)/(Htr_adj+Hve_adj); % (Cm/3600)/(Htr,adj+Hve,adj)
aH = aH0+tau/tau0; %  $aH, \theta+\tau/\tau H, \theta$ 

eta = (1-yH.^aH)/(1-yH.^(aH+1));

Qh_nd = (QH_tr+QH_ve)-eta*(Qint+Qsol);
Qp_h = Qh_nd/eta_gl;

C1 = (0:1:Periodo)'; % Anno
C2 = linspace(1,1-Periodo*Tasso,Periodo+1)'; % Tasso attualizzazione
C3 = 35061*Prezzo_gas; % Costo energetico annuale non attualizzato
C4 = 0; % Costo totale investimento
C5 = sum(C3.*C2.*(1+Tasso_gas.*C1)); % Costo totale energetico attualizzato
C6 = 35061*Costo_CO2*(Periodo+1); % Costo totale emissioni
C7 = 0; % Costo totale manutenzione
C8 = 0; % Valore residuo

```

```
% Global cost
C = C4+C5+C6+C7+C8;

Val_C= C;
Val_Qh_nd= Qh_nd;
Val_Qp_h= Qp_h;

Results = [Val_C', Qp_h'];

hold off;
plot(Results(:,1)./Vol,Results(:,3)./Vol,'d');

xlabel('Global cost/mc');
ylabel('Energy demand/mc');
grid on;
```

Allegato 7 - Script Matlab per lo sviluppo della metodologia cost-optimal - ERS

```

ERS(isnan(ERS))=0;
SDF(isnan(SDF))=0;

for i = (1:size(ERS,1))
    SDP = SDF;
    ES = ERS(i,:);

    idx = SDP(:,2) == ES(:,3);

    if SDP(idx==1,5) == 0 % superfici opache g=0
        SDP(idx==1,4) = 1./(1./SDF(idx==1,4)+ES(:,5)./ES(:,4));
    elseif SDP(idx==1,5) > 0 % superfici trasparenti g>0
        SDP(idx==1,6) = ES(:,12); % Emissività
        SDP(idx==1,4) = ES(:,6);
        SDP(idx==1,5) = ES(:,7);
    elseif SDP(idx==1,2) == 12
        SDP(idx==1,21) = ES(:,13); % sistema generazione g=-1
    elseif SDP(idx==1,2) == 13
        SDP(idx==1,22) = ES(:,14); % sistema regolazione g=-1
    end

    eta_gl = SDP(1,19).*SDP(2,20).*SDP(3,21).*SDP(4,22);

    % Calcolo Ht_adj
    % Htr,adj=Hd+Hg+Hu+Ha

    Coeff_scambio_termico = SDP(:,3).*(SDP(:,4)+SDP(:,4).*SDP(:,9)).*SDP(:,18);

    A_sol_op = SDP(:,7).*0.04.*SDP(:,4).*SDP(:,3);
    A_sol_w = SDP(:,3).*SDP(:,5).*0.8.*SDP(:,8);

    Htr_adj = sum(Coeff_scambio_termico);

    % Calcolo QH_tr

    % Qtr=Htr,adj*(θint,set,H-θe)*t
    Qtr = Htr_adj.*t.*(20-Tmed)/1000;

    % Σk Fr,k*Φr,mn,k
    % Φr = Rse*Uc*Ac*hr*Δθer
    % hr = 4 ε σ (θss + 273)^3
    % hr = 5ε

    Qex_temp = 0.04.*SDP(:,3).*SDP(:,4).*5.*SDP(:,6).*11.*0.5;
    Qex_temp(SDP(:,2)>3) = 2*(Qex_temp(SDP(:,2)>3));

    Qex = sum(Qex_temp)*t/1000;

```



```

QH_tr = (Qtr + Qex);

% Calcolo QH_ve
% Hve,adj=pa*ca*(Σk bve,k*qve,k,mn)

Hve_adj = 1200*1*1*n*Vol/3600;
QH_ve = Hve_adj*(20-Tmed)*t/1000;

% calcolo Q_int
% Qint= (Φint,occupanti+Φint,apparecchiature)*t

App_ter_occ = 0;
if Cl_occ == 1
    App_ter_occ = 15;
elseif Cl_occ == 2
    App_ter_occ = 10;
elseif Cl_occ == 3
    App_ter_occ = 5;
elseif Cl_occ == 4
    App_ter_occ = 3;
elseif Cl_occ == 5
    App_ter_occ = 2;
end

Qint_occ = App_ter_occ*Sup;

Qint_app_D1 = 3*D1*Sup;
Qint_app_D2 = 1*D2*Sup;
Qint_app_D3 = 4*D3*Sup;
Qint_app_D4 = 3*D4*Sup;
Qint_app_D5 = 3*D5*Sup;
Qint_app_D6 = 3*D6*Sup;
Qint_app_D7 = 1*D7*Sup;
Qint_app_D8 = 2*D8*Sup;
Qint_app_D9 = 2*D9*Sup;
Qint_app_D10 = 1*D10*Sup;

Qint_app = Qint_app_D1 + Qint_app_D2 + Qint_app_D3 +Qint_app_D4 + Qint_app_D5 +
Qint_app_D6 + Qint_app_D7 + Qint_app_D8 + Qint_app_D9 + Qint_app_D10;

Qint = (Qint_occ + Qint_app)*t/1000;

% Calcolo Qsol

% Qsol= (Φsol, opachi+Φsol,trasparenti)*t

% COMPONENTI OPACHI
% Φsol,k=Fsh,ob,k*Asol,k*Isol,k
% Asol,op = asol,c * Rse * Uc,eq * Ac

```

```

Isol = 0;
Isol_0 = 93.20;
Isol_S = 110.88;
Isol_N = 28.7;
Isol_EW = 70.91;

Qsol_op = sum(Qsol_op);

% COMPONENTI TRASPARENTI
%  $\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k}$ 
%  $A_{sol,w} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \cdot A_{w,gl}$ 

Qsol_w = 0;
for w = 1:size(SDP)
    Qsol_w(w) = (A_sol_w(w,1)).*(min(SDP(w,15),SDP(w,16))*(SDP(w,14))).*
    [Isol_0(SDP(w,10)==0),Isol_N(SDP(w,10)==1),Isol_S(SDP(w,10)==2), Isol_
    EW(SDP(w,10)==3),Isol_EW(SDP(w,10)==4)];
end

Qsol_w = sum(Qsol_w);

Qsol = (Qsol_op + Qsol_w).*t/1000;

% Calcolo fattore utilizzazione
%  $\eta_{H,gn} = (1 - \gamma_H^{aH}) / (1 - \gamma_H^{aH+1})$ 

yH = (Qint+Qsol)/(QH_tr+QH_ve); % Qgn/Qht
aH0 = 1;
tau0 = 15;

F=0;
if (T_costr==1)
    F=80000;
elseif (T_costr==2)
    F=110000;
elseif (T_costr==3)
    F=165000;
elseif (T_costr==4)
    F=260000;
elseif (T_costr==5)
    F=370000;
end
Cm = Sup*F; % fattore di correzione * Sup

tau = (Cm/3600)/(Htr_adj+Hve_adj); % (Cm/3600)/(Htr,adj+Hve,adj)
aH = aH0+tau/tau0; %  $a_{H,0} + \tau / \tau_{H,0}$ 

eta = (1-yH^aH)/(1-yH^(aH+1));

Qh_nd = (QH_tr+QH_ve)-eta*(Qint+Qsol);

```

```

Qp_h = Qh_nd/eta_gl;

C1 = (0:1:Periodo)'; % Anno
C2 = linspace(1,1-Periodo*Tasso,Periodo+1)'; % Tasso attualizzazione
C3 = Qp_h*Prezzo_gas; % Costo energetico annuale non attualizzato
C4 = sum(SDP(idx==1,3).*ES(:,8)); % Costo totale investimento
C5 = sum(C3.*C2.*(1+Tasso_gas.*C1)); % Costo totale energetico attualizzato
C6 = Qp_h*Costo_CO2*(Periodo+1); % Costo totale emissioni
C7 = sum(C4.*ES(:,10).*C2); % Costo totale manutenzione
C8 = -C4./ES(:,9).*(ES(:,9)-Periodo).*C2(Periodo+1,:); % Valore residuo

% Global cost
C = C4+C5+C6+C7+C8;

Val_C(i) = C;
Val_Qh_nd(i) = Qh_nd;
Val_Qp_h(i) = Qp_h;

end

Results = [Val_C', Val_Qh_nd', Val_Qp_h'];

hold off;
plot(Results(:,1)./Vol,Results(:,3)./Vol,'d');

xlabel('Global cost/mc');
ylabel('Energy demand/mc');
grid on;

```

Allegato 8 - Script Matlab per lo sviluppo della metodologia cost-optimal - ES

```
ERS(isnan(ERS))=0;
SDF(isnan(SDF))=0;

num_of_current_combs = 0;
combs=[];
for i = 1:size(ERS,1)
    temp = combnk (1:size(ERS,1),i);
    temp = [temp, zeros(size(temp,1),size(ERS,1)-size(temp,2))];
    num_of_i_combs = size(temp,1);
    for j= 1:num_of_i_combs
        combs(num_of_current_combs+j,:)=temp(j,:);
    end
    num_of_current_combs = num_of_current_combs + size(temp,1);
end

tot_num_of_combs = num_of_current_combs
combs;

for i=1:tot_num_of_combs
    num_selected_solutions = find(combs(i,:));
end

acceptable_solutions=0;
ES_store=zeros(size(ERS,1),14,acceptable_solutions);
for c = (1:tot_num_of_combs)

    %inizializzazioni
    SDP = SDF;
    skip=0;
    selected_solutions_indexes = find(combs(c,:));
    num_selected_solutions = size (selected_solutions_indexes,2);
    ES=zeros(num_selected_solutions,14);
    ES_temp=zeros(num_selected_solutions,14);
    for j = 1:num_selected_solutions
        if j>1
            if ERS(combs(c,selected_solutions_
indexes(j)),3)==ERS(combs(c,selected_solutions_indexes(j-1)),3)
                skip=1;
                continue
            end
        end
        ES_temp(j,:) = ERS(combs(c,selected_solutions_indexes(j)),:);
    end
    if skip==1
        continue
    end
    ES=ES_temp;
end
```

```

ES_store(1:size(ES_temp,1),1:size(ES_temp,2),c)=ES_temp;
mask = any(any(ES_store));
ES_store = ES_store(:, :, mask);
ES_store=ES_store(:, [1,2], :);

acceptable_solutions=acceptable_solutions+1;

for h = 1:size(ES,1)
    idx = SDP(:,2) == ES(h,3);
    if SDP(idx==1,5) == 0 %superfici opache g=0
        SDP(idx==1,4) = 1./(1./SDF(idx==1,4)+ES(h,5)./ES(h,4));
    elseif SDP(idx==1,5) > 0 %superfici trasparenti g>0
        SDP(idx==1,6) = ES(h,12); % Emissività
        SDP(idx==1,4) = ES(h,6); % Trasmittanza
        SDP(idx==1,5) = ES(h,7); % Coeff solare
    elseif SDP(idx==1,2) == 12
        SDP(idx==1,21) = ES(h,13); % sistema generazione
    elseif SDP(idx==1,2) == 13
        SDP(idx==1,22) = ES(h,14); % sistema regolazione
    end
end
end

SDP;

eta_g1 = SDP(1,19).*SDP(2,20).*SDP(3,21).*SDP(4,22);

% Calcolo Ht_adj
% Htr,adj=Hd+Hg+Hu+Ha

Coeff_scambio_termico = SDP(:,3).*(SDP(:,4)+SDP(:,4).*SDP(:,9)).*SDP(:,18);

A_sol_op = SDP(:,7).*0.04.*SDP(:,4).*SDP(:,3);
A_sol_w = SDP(:,3).*SDP(:,5).*0.8.*SDP(:,8);

Htr_adj = sum(Coeff_scambio_termico);

% Calcolo QH_tr

% Qtr=Htr,adj*(θint,set,H-θe)*t
Qtr = Htr_adj.*t.*(20-Tmed)/1000;

% Σk Fr,k*Φr,mn,k
% Φr = Rse*Uc*Ac*hr*Δθer
% hr = 4 ε σ (θss + 273)^3

Qex_ = (0.04.*SDP(:,3).*SDP(:,4).*5.*SDP(:,6).*11.*0.5);
Qex_ (SDP(:,2)>3) = 2*(Qex_(SDP(:,2)>3));

Qex = sum(Qex_)*t/1000;

```

```

QH_tr = (Qtr + Qex);

% Calcolo QH_ve
% Hve,adj=pa*ca*(Σk bve,k*qve,k,mn)

Hve_adj = 1200*1*1*n*Vol/3600;
QH_ve = Hve_adj*(20-Tmed)*t/1000;

% calcolo Q_int
% Qint= (Φint,occupanti+Φint,apparecchiature)*t

App_ter_occ = 0;
if Cl_occ == 1
    App_ter_occ = 15;
elseif Cl_occ == 2
    App_ter_occ = 10;
elseif Cl_occ == 3
    App_ter_occ = 5;
elseif Cl_occ == 4
    App_ter_occ = 3;
elseif Cl_occ == 5
    App_ter_occ = 2;
end

Qint_occ = App_ter_occ*Sup;

Qint_app_D1 = 3*D1*Sup;
Qint_app_D2 = 1*D2*Sup;
Qint_app_D3 = 4*D3*Sup;
Qint_app_D4 = 3*D4*Sup;
Qint_app_D5 = 3*D5*Sup;
Qint_app_D6 = 3*D6*Sup;
Qint_app_D7 = 1*D7*Sup;
Qint_app_D8 = 2*D8*Sup;
Qint_app_D9 = 2*D9*Sup;
Qint_app_D10 = 1*D10*Sup;

Qint_app = Qint_app_D1 + Qint_app_D2 + Qint_app_D3 +Qint_app_D4 + Qint_app_D5 +
Qint_app_D6 + Qint_app_D7 + Qint_app_D8 + Qint_app_D9 + Qint_app_D10;

Qint = (Qint_occ + Qint_app)*t/1000;

% Calcolo Qsol

% Qsol= (Φsol, opachi+Φsol,trasparenti)*t

% COMPONENTI OPACHI
% Φsol,k=Fsh,ob,k*Asol,k*Isol,k
% Asol,op = asol,c * Rse * Uc,eq * Ac

```

```

Isol = 0;
Isol_0 = 93.20;
Isol_S = 110.88;
Isol_N = 28.7;
Isol_EW = 70.91;

Qsol_op = zeros([1 size(SDF, 1)]);
for op = 1:size(SDP)
    Qsol_op(op) = (A_sol_op(op,1)).*(min(SDP(op,15),SDP(op,16))*(SDP(op,14))).*
    [Isol_0(SDP(op,10)==0),Isol_N(SDP(op,10)==1),Isol_S(SDP(op,10)==2),Isol_
    EW(SDP(op,10)==3), Isol_EW(SDP(op,10)==4)];
end

Qsol_op = sum(Qsol_op);

% COMPONENTI TRASPARENTI
%  $\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} * A_{sol,k} * I_{sol,k}$ 
%  $A_{sol,w} = F_{sh,gl} * g_{gl} * A_{w,gl}$ 

Qsol_w = zeros([1 size(SDF, 1)]);
for w = 1:size(SDP)
    Qsol_w(w) = (A_sol_w(w,1)).*(min(SDP(w,15),SDP(w,16))*(SDP(w,14))).*
    [Isol_0(SDP(w,10)==0),Isol_N(SDP(w,10)==1),Isol_S(SDP(w,10)==2),Isol_
    EW(SDP(w,10)==3), Isol_EW(SDP(w,10)==4)];
end

Qsol_w = sum(Qsol_w);

Qsol = (Qsol_op + Qsol_w).*t/1000;

% Calcolo fattore utilizzazione
%  $\eta_H, g_n = (1 - \gamma_H^{aH}) / (1 - \gamma_H^{aH+1})$ 

yH = (Qint+Qsol)/(QH_tr+QH_ve); % Qgn/Qht
aH0 = 1;
tau0 = 15;

F=0;
if (T_costr==1)
    F=80000;
elseif (T_costr==2)
    F=110000;
elseif (T_costr==3)
    F=165000;
elseif (T_costr==4)
    F=260000;
elseif (T_costr==5)
    F=370000;
end
Cm = Sup*F; % fattore di correzione * Sup

```

```

tau = (Cm/3600)/(Htr_adj+Hve_adj); % (Cm/3600)/(Htr,adj+Hve,adj)
aH = aH0+tau/tau0; % aH,0+τ/τH,0

eta = (1-yH^aH)/(1-yH^(aH+1));

Qh_nd = (QH_tr+QH_ve)-eta*(Qint+Qsol);
Qp_h = Qh_nd/eta_gl;

C1 = (0:1:Periodo)'; % Anno
C2 = linspace(1,1-Periodo*Tasso,Periodo+1)'; % Tasso attualizzazione
C3 = Qp_h*Prezzo_gas; % Costo energetico annuale non attualizzato

C4 = []; % Costo totale investimento
for j = (1:size (ES,1))
    idx = ES(j,3)==SDP(:,2);
    C4_temp = ES(j,8).*SDP(:,3).*idx;
    C4 = [C4 C4_temp];
end
C4 = sum(C4,2);
C4 = sum(C4);

C5 = sum(C3.*C2.*(1+Tasso_gas.*C1)); % Costo totale energetico attualizzato
C6 = Qp_h*Costo_CO2*(Periodo+1); % Costo totale emissioni

C7 = []; % Costo totale manutenzione
for i = (1:size (ES,1))
    idx = ES(i,3)==SDP(:,2);
    C7_temp = ES(i,10).*ES(i,8).*SDP(:,3).*idx;
    C7_temp = sum(C7_temp);
    C7 = [C7 C7_temp];
end
C7 = sum(C7);
C7 = C7.*C2;
C7 = sum(C7);

% C8 = -C4./ES(:,9).*(ES(:,9)-Periodo).*C2(Periodo+1,:); % Valore residuo

C8 = []; % Valore residuo
for k = (1:size (ES,1))
    idx = ES(k,3)==SDP(:,2);
    C8_temp = ES(k,8).*SDP(:,3).*idx.*(ES(k,9)-Periodo)./ES(k,9);
    C8_temp = sum(C8_temp).*C2(Periodo+1,1);
    C8 = [C8 C8_temp];
end
C8 = -sum(C8);

% Global cost
C = C4+C5+C6+C7+C8;

```



```

% hold on
% plot (C,Qh_nd,'d');
% xlabel('Global cost');
% ylabel('Energy demand');
%
% disp (C);
% disp (Qh_nd);

Val_C(acceptable_solutions) = C;
Val_Qh_nd(acceptable_solutions) = Qh_nd;
Val_Qp_h(acceptable_solutions)= Qp_h;

end
acceptable_solutions

Results = [Val_C', Val_Qp_h'];
min_C = min(Val_C);
min_Qp_h = min(Val_Qp_h);

find(Val_C == min_C);
find(Qp_h == min_Qp_h);

Pareto = paretoFront(Results)

idx_pareto = ismember(Results(:,1),Pareto(:,1));
idx_pareto = find(idx_pareto);

function p = paretoFront(p)
[i, dim] = size(p);
while i >= 1
    old_size = size(p,1);
    indices = sum(le(p(i,:),p),2) == dim;
    indices(i) = false;
    p(indices,:) = [];
    i = i - 1 - (old_size - size(p,1)) + sum(indices(i:end));
end
end

```