



Comune
di Padova



I CICLI AFFRESCATI
DEL XIV SECOLO DI PADOVA



NICOLETTA
PAIARO
Comune di Padova
28.09.2026
09:34:44
GMT+02:00

STRATEGIE PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO PERCETTIVO E DEI VALORI SENSIBILI DEL CENTRO STORICO DI PADOVA

QUADERNI TECNICI: **QUADERNO 3**



GIUGNO 2026

Ordine degli Architetti
Pianificatori, Paisaggisti e
Conservatori Provincia di Venezia

MARISA
FANTIN
Architetto

Marisa Fantin
Ordine Architetti P.P.C. -
Provincia di Venezia
Architetto
23.09.2026 15:32:23
GMT+02:00

QUADERNO TECNICO N° 3

EFFICIENTAMENTO ENERGETICO: APPROCCIO METODOLOGICO E VALUTAZIONE DEI COSTI (LCC)

INDICE

Capitolo 1 - Il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio storico/culturale	2
1.1 Edilizia storica e destinazione d'uso: scelte progettuali ed impianti	3
1.1.1 Compatibilità impiantistica della destinazione d'uso	5
1.1.2 La fase di anamnesi e analisi:.....	6
1.1.3 Il progetto e l'intervento:.....	7
1.2 Approccio metodologico: minimo intervento, compatibilità, reversibilità	7
1.2.1 Criteri di intervento con individuazione di soluzioni alternative a quelle comunemente utilizzate	8
Capitolo 2 - Analisi Critica delle modalità di miglioramento energetico degli edifici in Centro Storico	15
2.1 Efficientamento del sistema edificio-impianti	15
2.2 Chiusure verticali opache	18
2.2.1 L'isolamento a cappotto	20
2.2.2 Raffrescamento passivo delle superfici verticali.....	20
2.3 Chiusure orizzontali superiori	22
2.3.1 Efficientamento delle coperture	23
2.3.2 Raffrescamento passivo	24
2.3.3 Realizzazione di una copertura ventilata	25
2.4 Chiusure verticali trasparenti	26
2.4.1 Infissi e controllo delle dispersioni termiche e dell'irraggiamento solare	26
Capitolo 3 - Valutazione dei costi e ciclo di vita degli edifici	28

Capitolo 1 - Il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio storico/culturale

Il moderno restauro, a fronte di una profonda riflessione critica, ha raggiunto un elevato livello di rigore storico-critico, rifiutando sia gli eccessi d'una disinvoltata 'riprogettazione' sia la prassi del mero 'adeguamento' funzionale e prestazionale del manufatto edilizio.

Tale riflessione ha chiarito che il restauro non è cieco alle ragioni d'una 'lecita modificazione' del bene (ad esempio, in termini di reintegrazione delle lacune, di rimozione delle aggiunte improprie o anche di miglioramento delle proprie prestazioni) né alla dialettica conservazione-sviluppo. Esso accoglie ed integra in sé il principio dell'attribuzione di una funzione appropriata e vitale, garanzia fondamentale di buon mantenimento e di trasmissione del manufatto nel tempo.

Tale riflessione ha chiarito che il restauro si rivolge a beni di riconosciuto valore culturale, storico o artistico (secondo il moderno concetto di cultura, allargato anche in senso 'materiale' e antropologico) ed al loro tessuto connettivo, urbanistico, territoriale, paesistico; assumendo così una prevalente declinazione 'critico-conservativa', vale a dire sensibile al dovere primario della tutela, perpetuazione e migliore conservazione del bene senza per questo rifiutare i positivi apporti della modernità. Essa respinge decisamente un'idea di restauro come mummificazione mentre accoglie ed integra in sé l'attribuzione di funzioni compatibili e ben calibrate, secondo il noto concetto di 'conservazione integrata' (Dichiarazione di Amsterdam, 1975).

Questa riflessione è sicuramente traslabile ad interventi su edifici che, anche se non vincolati, sono posti in ambiti di particolare valore storico, artistico e sociale come i centri storici. Laddove dove anche interventi non ascrivibili a quelli del restauro richiedono una riflessione ed un approfondimento disciplinare relativamente al come intervenire.

Se tuttavia il restauro, in termini concettuali ma anche in molte sue applicazioni, è pervenuto ad un'ormai consolidata maturità e coerenza di metodo, l'importante settore dell'innovazione impiantistica risulta, pur con alcune lodevoli eccezioni, ancora in fase di sviluppo e definizione.

A questo proposito, è opportuno evidenziare come, a oggi, manchi una riflessione specifica sul rapporto fra restauro e impianti, a fronte della straordinaria espansione delle tecnologie e dei macchinari dell'architettura contemporanea e delle conseguenti aspettative prestazionali e di "comfort", anche con riferimento agli edifici storici.

Questa pretesa fa sì che oggi alcuni interventi impiantistici presentino caratteri d'invasività e pervasività che rischiano di compromettere anche la più seria e rispettosa progettazione.

In relazione a questo aspetto, che verrà approfondito in dettaglio nelle parti a seguire, un buon aiuto viene dal mondo della produzione che mette in commercio sistemi e strumenti capaci di ridurre l'impatto dei nuovi impianti sulle antiche preesistenze e di favorire allo stesso tempo modalità, prima impensabili, di conservazione dei vecchi impianti, qualche volta ormai pienamente 'storici'.

Da qui la necessità di ragionare, sapendo rinunciare all'inessenziale e attivando ogni possibile sinergia, finalizzata, per esempio, di riduzione dell'intrusività degli accorgimenti da adottare. Di fatto questo è l'atteggiamento da seguire per la definizione degli interventi impiantistici giudicati indispensabili; coniugando le ragioni del progetto architettonico, di quello strutturale e geotecnico con quelle del progetto impiantistico in modo da utilizzare al meglio i lavori da farsi, indirizzando nelle zone di minore valenza storica, già individuate a questi fini, anche i percorsi degli impianti.

Il progetto deve rappresentare la sintesi creativa delle diverse esigenze, dove ciò che si fa per rispondere alle moderne necessità funzionali o esigenze di carattere formale assume il ruolo di normale attenzione destinata ad assicurare la migliore fruizione del bene, in piena libertà e sicurezza.

Un approccio meno rigoroso può essere adottato in relazione ad interventi di efficientamento energetico di strutture storiche minori, ma sempre nell'ottica di preservarne i caratteri storico-culturali e questo in linea con quanto indicato nelle "Strategie per la valutazione dell'impatto percettivo e dei valori sensibili del Centro Storico di Padova").

1.1 Edilizia storica e destinazione d'uso: scelte progettuali ed impianti

Le scelte progettuali nell'ambito del recupero di un edificio storico sono determinate da diversi fattori: la destinazione d'uso va definita non solo in relazione alle necessità, ma necessariamente compatibilmente con le prescrizioni urbanistiche, anche in relazione alla compatibilità della struttura con le richieste imposte dalle normative per la destinazione d'uso particolare.

Nella valutazione della "compatibilità" entrano fattori connessi alle caratteristiche storiche dell'edificio, alle stime economiche, ai valori simbolici. In questo le normative e i regolamenti attuativi specifici, le linee-guida riguardanti il progetto e le scelte tecnico-operative, elaborate per diversi campi, assumono un duplice valore:

- ✓ il primo consiste nell'indirizzare il progettista verso determinati metodi di approccio, compatibili con l'edificio storico;

- ✓ il secondo, consequenziale al primo, è di promuovere scelte tecniche adeguate e aiutare il progettista nel suo percorso.

Le soluzioni adottate nel recupero di un edificio storico dovranno convergere nella valutazione attenta delle potenzialità attuali e nell'assegnazione di un adeguato sistema impiantistico, dimensionato in modo minimale e poco invasivo, che permetta lo svolgimento delle attività nelle condizioni di comfort termo-igrometrico, acustico e luminoso, richieste dagli utilizzatori e dall'attuale quadro normativo.

Le scelte di progetto riguardanti la trasformazione d'uso o l'adeguamento energetico degli edifici, sia per quanto riguarda la predisposizione di interventi, sia per il programma di controllo e manutenzione, sono da definire dopo un attento studio e la conoscenza capillare dell'edificio (o del complesso).

Una logica manutentiva è indispensabile per l'edilizia storica e corrisponde alla necessità di pianificare e predisporre interventi mirati e una corretta gestione e salvaguardia del patrimonio. Nella logica della manutenzione, esigenza primaria nell'edilizia storica che include anche una componente di consumo energetico, diventa evidente la sinergia fra conservazione e valorizzazione energetica. La valorizzazione energetica rende meno onerosa la manutenzione, diventando una valenza conservativa in sé.

Le scelte operative di intervento devono essere guidate da una attenta stima di un intervallo di valori prestazionali ottimali da ottenere, evitando di scendere al di sotto del limite inferiore, ma senza l'obbligo di raggiungere il valore limite superiore. Si possono programmare così interventi di modifica (che agiscono quindi sulle caratteristiche dei materiali) o imporre delle limitazioni d'uso (che determinano la variazione dei parametri-quadro di valutazione), per determinare le potenziali prestazioni compatibili con l'edificio storico e con il sistema tecnologico.

Il progetto di adeguamento, di ristrutturazione o di restauro in senso più largo, di un edificio o di un complesso di interesse storico ha, come fine primario, la sua conservazione sostenibile e integrata (nel senso dell'inserimento dell'edificio oggetto di intervento all'interno di un contesto urbano, sociale e tecnologico).

L'adeguamento funzionale è dunque un passaggio fondamentale per garantire la permanenza dell'edificio, permettendo la valorizzazione e la conservazione integrata dello stesso nel tessuto del territorio. Rendere nuovamente vitale l'edificio storico, ma con la conservazione della materia originale, nel rispetto dei requisiti di tutela in generale, in particolare nei casi di interesse storico-artistico per la presenza di superfici di pregio, rappresenta un investimento per il futuro nel territorio, per la cultura, per la trasmissione dei segni della nostra civiltà.

L'adeguamento funzionale, l'inserimento di una nuova funzione all'interno dell'involucro storico dell'edificio/complesso, non è il fine dell'intervento, ma è un mezzo per perseguirne la conservazione.

Nella scelta della destinazione d'uso (come anche nella conseguente fase dell'adeguamento impiantistico, di cui sotto), il progettista deve affrontare una molteplicità di problematiche tecnico-operative, sintetizzabili in modo trasversale in macrosettori:

- a) Destinazione d'uso dell'edificio/complesso;
- b) Collocazione geografica generale e particolare del manufatto (dal territorio al tessuto urbano);
- c) Tipologia costruttiva originaria ed eventuali variazioni nel tempo;
- d) Stato conservativo dell'edificio/complesso;
- e) Tipologia del/dei vincoli ai quali l'edificio/complesso è sottoposto;
- f) Appetibilità economica della destinazione d'uso, compatibilmente con i caratteri storici dell'edificio;
- g) Finanziamento e/o risorse economiche a disposizione per l'attuazione del progetto;

Quest'ultimo punto rappresenta essenzialmente la mediazione fra le scelte ideali e le scelte realmente attuabili.

1.1.1 Compatibilità impiantistica della destinazione d'uso

Una successiva specifica fase è rappresentata dalla verifica della destinazione d'uso scelta, con il conseguente carico impiantistico da prevedere e con la materia storica e il sistema impiantistico generale preesistente. Questa fase della valutazione si ricollega alla verifica della funzione in base alla compatibilità con i supporti originali, con i contenuti da conservare e con il valore formale dell'edificio; tale processo di valutazione, necessario in tutti i casi, diventa particolarmente importante nel caso di edificio con superfici di pregio.

L'inserimento della nuova destinazione d'uso e il conseguente adeguamento impiantistico (se necessario) ha ripercussioni precise nella fase esecutiva, operando sull'interfaccia interno-esterno dell'edificio, e diventa di conseguenza uno dei punti nevralgici dell'intero progetto. Si dovranno infatti rendere coerenti le esigenze dei nuovi utenti con le caratteristiche storico – architettoniche; più queste sono complesse, più l'intervento necessita di tecnologie e scelte applicative aggiornate.

Nella fase progettuale si dovrà quindi considerare un altro fondamentale aspetto metodologico: l'intervento deve prevedere essenzialmente le azioni minime e indispensabili al fine di rendere funzionale la struttura, con attenzione principalmente alla salvaguardia dell'integrità materico-storico-architettonica della stessa.

Il concetto del minimo intervento (vedi formulazione di Giorgio Bonsanti) valuta l'equilibrio fra quantità, qualità ed efficacia delle azioni, in rapporto sinergico con il valore materico e simbolico del manufatto.

Si può quindi sintetizzare che, sia nel momento della individuazione della nuova destinazione d'uso di un edificio storico che nelle fasi di progettazione e di realizzazione dell'intervento, la base della scelta operativa è costituita dallo studio dello stato di fatto: l'analisi del rapporto dell'edificio con il suo contesto ambientale, l'analisi dell'edificio in sé (con i criteri architettonici, ingegneristici, impiantistici, considerando la consistenza materiale ecc.) diventa un momento di scelta operativa che influisce su tutte le azioni successive.

Con riferimento ai macrosettori di cui sopra, si dovrebbe dire che contano molto, nelle scelte, anche la cultura e la flessibilità di interpretazione del progettista e dei suoi collaboratori, lo stato di aggiornamento e le conoscenze tecniche di ogni soggetto chiamato ad operare sull'oggetto dell'intervento.

L'azione di comprendere il ruolo di tutti gli elementi che possono essere conservati e valorizzati nell'edificio/complesso in vista della sua fruizione, alcuni per le qualità storico artistiche, altri come base da riconvertire ai sensi del risparmio energetico, costituisce un elemento propulsivo dell'intervento. Le due istanze, storico-artistica ed energetico-ambientale, possono infatti essere concorrenti alla salvaguardia del patrimonio.

Nello specifico dell'adeguamento energetico, dell'inserimento di materiali o tecnologie avanzate mirate alla conservazione e alla miglior fruizione dell'immobile (condizioni di benessere e salubrità ecc.), che si potrebbero raccogliere sotto il termine di "sistemi impiantistici", si corre il rischio di non avere sempre a disposizione una soluzione idonea.

Tenendo presente anche il criterio di minimo intervento di cui sopra, risulta che si deve avere una vasta gamma di conoscenze tecniche e di soluzioni adeguate, per affrontare questo problema poliedrico.

La scelta operativa conseguente alla variazione d'uso e al manifestarsi di un intervento, seppur minimo, di introduzione o adeguamento dei sistemi impiantistici, deve valutare, sia all'esterno sia all'interno dell'edificio, principalmente le seguenti fasi:

1.1.2 La fase di anamnesi e analisi:

- Ricerca storica e documentaria sull'edificio e del contesto ambientale di riferimento;
- Ricostruzione delle fasi storiche di edificazione e variazione;
- Rilievi e riproduzioni grafiche;
- Classificazione delle eventuali superfici di pregio;
- Eventuale campagna di indagini diagnostiche sui materiali costitutivi;
- Diagnostica della situazione statica;

- Diagnostica energetico – ambientale;
- Individuazione dei requisiti energetici ed ambientali indoor ed outdoor congrui con l'edificio a cui tendere.

1.1.3 Il progetto e l'intervento:

- L'efficacia e la coerenza dell'intervento rispetto ai requisiti individuati, all'utenza dell'edificio/complesso;
- Il rispetto delle normative di riferimento per gli adeguamenti relativi alla sicurezza sismica, antincendio, alla capacità portante, all'igiene e alla sanità, all'efficienza energetica, ecc.;
- La funzionalità delle soluzioni;
- Il rispetto dei materiali costitutivi del fabbricato;
- La compatibilità conservativa su eventuali superfici di pregio.

1.2 Approccio metodologico: minimo intervento, compatibilità, reversibilità

Nel trattare il tema dell'inserimento degli impianti negli edifici storici si devono sempre tener presenti alcune considerazioni, che delimitano il campo operativo.

La componente degli impianti è in genere vista, da parte dei tecnici della conservazione, come una delle operazioni di maggior rischio dal punto di vista dell'interferenza con la materia storica: tra l'apertura di canali e tracce nelle murature per l'alloggiamento di tubature e cavi, l'apertura di vani nei solai e nelle volte per gli ascensori ecc., le opere preliminari possono danneggiare un fabbricato storico, a livello statico, fino a portare al limite dell'equilibrio una struttura che in precedenza aveva una situazione stabile.

È conoscenza comune, per esempio, il fatto che non si dovrebbero aprire nuove tracce nelle murature (i calcoli mostrano chiaramente che una traccia delle profondità di soli 5-6 cm, in un muro spesso c. 30-40 cm, dove la risultante dei carichi verticali non risulta centrica, ma al limite del nucleo centrale di c. 1/3 dello spessore, implica il fatto che nella sezione residuale il carico risulti eccentrico, con conseguenze negative sul comportamento della muratura).

Fermo restando che l'impiantistica è una necessità fondamentale, perché funzionale alla fruizione del bene (condizione primaria di una conservazione sostenibile), si deve sempre tenere in vista il fatto che nel caso di un edificio storico, sia questo tutelato o meno, l'aspetto più importante è il mantenimento del bene.

Una volta acquisita la parte di analisi preliminare di cui sopra, la progettazione dell'apporto impiantistico deve essere commisurata alle stesse coordinate dell'intervento di restauro/ristrutturazione: minimo intervento, compatibilità e reversibilità.

Interessante e meno scontata la discussione intorno al tema della "distinguibilità": in alcune situazioni, per scelta in sede di progettazione dell'immagine architettonica, gli impianti possono acquisire autonomia particolare a livello plastico. Tale scelta è più frequente nel caso di edifici pubblici, con ampi spazi (musei, allestimenti di monumenti di carattere archeologico ecc.) e altezze molto grandi, dove sotto il soffitto si possono lasciar scorrere reti tecnologiche che diventano una presenza quasi scultorea. L'uso di una plastica del genere in un edificio privato, oltre che dalle considerazioni spaziali, dipende anche dal gusto del proprietario.

Come detto in precedenza, il criterio del minimo intervento va rispettato anche per gli impianti: così come nel caso di un consolidamento, l'apporto deve essere contenuto entro i minimi necessari; anche la scelta degli impianti e il loro dimensionamento devono essere calibrati sulle effettive esigenze necessarie per rendere fruibile il bene, tendenzialmente, si dovrebbe provare ad interferire con l'antica struttura con il minor danno.

Per il passaggio di tubature e colonne si devono utilizzare per quanto possibile vecchi cavedi e canne fumarie, non più in uso. Per i passaggi in orizzontale, invece, è consigliabile passare sulla faccia del muro ed evitare le tracce aperte nella muratura; i fasci di cavi e tubi potrebbe essere mascherati con dei profilati a livello del battiscopa, o sfruttando diverse profilature decorative della parete come elemento schermante rispetto alla visuale principale.

Laddove possibile (impianti multimediali, controllo del riscaldamento ecc.), è consigliabile utilizzare dei dispositivi wireless o dei sistemi telecomandati, eliminando una parte del carico di cablaggi.

Conseguenza dell'approccio al progetto impiantistico è il fatto che la progettazione impiantistica dovrebbe essere sviluppata in dettaglio in relazione alla struttura storica, non limitata ai soliti schemi con indicazioni dimensionali, che sono sufficienti per la progettazione degli impianti nei nuovi edifici, ma non rendono conto del rapporto con il tessuto fisico dell'edificio, elemento imprescindibile nel restauro.

1.2.1 Criteri di intervento con individuazione di soluzioni alternative a quelle comunemente utilizzate

L'efficientamento energetico di edifici storici, anche se non vincolati, deve necessariamente tener conto di molteplici elementi al contorno; innanzitutto è bene tener presente che la prestazione energetica di edifici massivi e, con buona inerzia termica, spesso non viene correttamente calcolata dai normali software di calcolo, specie se non dinamici.

Correntemente il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici viene normalmente effettuato in regime stazionario e con dati di input standard. In relazione alle caratteristiche termofisiche delle chiusure, specie orizzontali, degli edifici storici queste sono ancora poco approfondite; ricerche abbastanza recenti effettuate con simulazioni dinamiche di funzionamento termico riescono meglio a tener conto delle condizioni reali di funzionamento termico di queste tipologie di chiusure orizzontali o verticali, evidenziano risultati molto diversi da quelli derivanti dal calcolo di norma.

I risultati ottenuti con simulazioni dinamiche spesso evidenziano prestazioni energetiche molto migliori rispetto alla classe energetica che il software di calcolo certifica e questo soprattutto se non sono edifici isolati ma inseriti in un contesto urbano quale un Centro Storico.

Quindi per una valutazione più corretta, risultati più affidabili possono essere ottenuti utilizzando una simulazione energetica degli edifici in regime dinamico; come suggerito anche dal Nuovo DL Minimi 2025 (vedi il Quaderno Tecnico n° 2).

1.2.2 Metodi di valutazione energetica standard e simulazioni energetiche in regime dinamico

È evidente che, se il calcolo della prestazione energetica viene effettuato per verificare il rispetto dei limiti imposti dalla normativa vigente, questo deve essere necessariamente un calcolo standardizzato, in cui la procedura di calcolo è univoca e molti valori sono normati in modo tale da consentire una comparazione univoca tra i risultati ottenuti e i valori di legge.

Questo tipo di calcolo, che possiamo definire “tradizionale”, deve necessariamente essere semplificato e rapido da eseguire. Il limite di un calcolo di questo tipo è che considera parametri standard che, nella realtà, non sono tali e che, di fatto, possono variare di molto la prestazione dell’edificio.

Pensiamo alla temperatura esterna, che viene considerata come media mensile mentre nella realtà varia non solo da un giorno all’altro dello stesso mese, ma anche nell’arco di una stessa giornata subisce oscillazioni significative.

Il risultato che deriva da un calcolo semi-stazionario e con dati di input standard da norma è un valore puramente teorico, utile per confrontare la prestazione ottenuta con il limite di legge o per collocare l’edificio in una classe energetica, ma non certamente per definire il reale consumo o efficienza energetica dell’edificio.

Quanto sopra vale non solo per il calcolo della prestazione energetica iniziale, ma anche e soprattutto per il calcolo della prestazione energetica conseguente ad un intervento di ristrutturazione, di seguito, per entrare un po' nel merito delle simulazioni energetiche in regime dinamico.

Specie in edifici storici, qualora si volesse creare un modello di simulazione del comportamento energetico dell'edificio, il più possibile vicino al comportamento reale, per potere valutare soluzioni progettuali alternative che possono essere simulate e poi confrontate tra loro per una scelta più efficace possibile, un calcolo standardizzato e semplificato non è di grande aiuto.

Il calcolo ottimale, in questo caso, è un calcolo che parta da dati di input molto dettagliati per restituire output altrettanto significativi. Si rende, cioè, necessario sostituire le variabili assunte standard, con valori dinamici e variabili nel tempo. L'elemento che quindi differenzia sostanzialmente le due modellazioni è la discretizzazione del tempo, ovvero l'intervallo di calcolo: si passa da calcoli su base mensile a calcoli giornalieri, o addirittura orari.

La simulazione dinamica si sta progressivamente affermando come metodo di calcolo utilizzato in maniera diffusa, al fine di stimare il fabbisogno energetico del sistema edificio-impianto ed i consumi di energia. I principali dati di input ai fini del calcolo riguardano i parametri rappresentativi delle caratteristiche energetiche dell'involucro e degli impianti, tenendo conto dei fattori dinamici e delle variabili connesse all'utilizzo da parte degli occupanti che influenzano il sistema dal punto di vista energetico, sulla base di dati climatici orari relativi al sito in cui si colloca il sistema analizzato. Si ottengono, come output di calcolo, informazioni utili al fine di effettuare una previsione del fabbisogno energetico aderente alla realtà.

Il professionista, di conseguenza, è in grado di scegliere le migliori soluzioni tecnologiche ed impiantistiche per ottimizzare la resa e garantire un risparmio energetico ed economico. Risulta evidente come la complessità del calcolo dinamico, data la notevole quantità di dati di input da gestire ed elaborare, garantisce una maggiore accuratezza dei risultati rispetto ai metodi di calcolo semplificati, fornendo dei risultati dettagliati su base oraria.

L'utilizzo del metodo di calcolo dinamico risulta inoltre particolarmente adeguato all'analisi di sistemi impiantistici in edifici esistenti, proponendosi come strumento utilizzabile al fine di un'analisi energetica volta all'individuazione delle tecnologie impiantistiche applicabili maggiormente adatte.

Sebbene rimanga ancora un argomento di nicchia, anche perché la sua applicazione non è stata e non lo è ancora obbligatoria in Italia, negli ultimi anni si è assistito a un notevole incremento nella diffusione della modellazione energetica dinamica.

Esistono sul mercato diversi software e modelli di calcolo quale, ad esempio, EnergyPlus™, che è un motore di simulazione energetica americano molto diffuso a livello internazionale che prevede l'inserimento di tutti i dati di input attraverso file di testo e, se consideriamo che anche solo per definire la geometria dell'edificio i punti da inserire possono essere centinaia o migliaia, appare evidente che anche solo questo punto non è un ostacolo da poco. Fortunatamente esistono oggi soluzioni software in grado di integrare la potenza del motore di calcolo Energy-Plus™ alla modellazione BIM/3D, cosa questa che semplifica l'utilizzo dei sistemi dinamici.

Altra difficoltà, probabilmente la più importante, riguarda i dati di input spesso difficili da reperire per la scarsa disponibilità di banche dati nazionali da cui attingere.

Questo problema si manifesta principalmente nei dati climatici, nelle caratteristiche termofisiche dei materiali e in tutte le informazioni relative all'effettivo utilizzo dell'edificio (occupazione reale, tassi di ventilazione, apporti interni), non sempre facilmente reperibili o ipotizzabili con il livello di dettaglio richiesto dal motore di calcolo.

Inoltre, c'è un ostacolo di natura scientifico-cognitiva, poiché per gestire questo tipo di simulazione sono necessarie competenze molto specialistiche, non facili da acquisire nemmeno per chi già opera nel settore.

Di fatto questo sviluppo è stato accelerato dalla crescente adozione di certificazioni ambientali volontarie, come la LEED, e dalle recenti Direttive comunitarie che orientano sempre più gli Stati europei verso la direzione della riqualificazione e dell'efficientamento energetico degli edifici ed ora dal DL Minimi/2025.

Simulare il comportamento di un edificio e i suoi fabbisogni energetici in maniera dinamica crea un livello di consapevolezza che porta a un mercato immobiliare più trasparente e orientato al miglioramento reale dell'efficienza energetica del nostro patrimonio e non ad una individuazione solo formale che non dichiara la vera qualità energetica di un edificio.

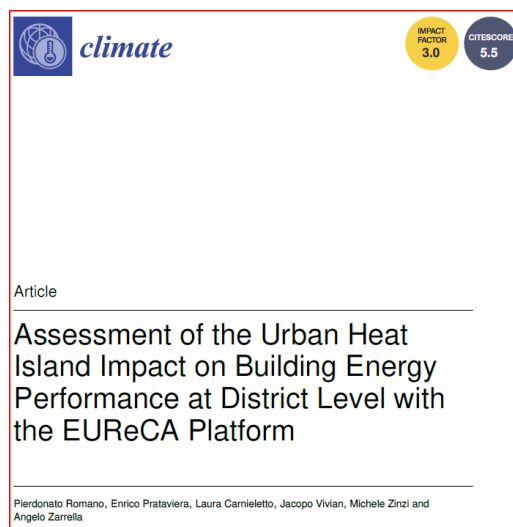
Inoltre, la simulazione energetica dinamica aiuta a capire se c'è un reale bisogno di un intervento di riqualificazione energetica e quale tra quelle possibili è il più efficace.

1.2.3 Modellazione energetica degli edifici a scala urbana

Tenendo conto degli importanti obiettivi che l'amministrazione di Padova si è data in relazione all'azzeramento delle emissioni di gas climalteranti, un ulteriore aspetto da considerare, in relazione all'efficientamento energetico del Centro Storico, riguarda i risultati delle modellazioni energetiche a scala urbana.

Questi metodi di analisi energetica a scala urbana, per quanto ancora in fase di sviluppo, trovano nella facoltà di ingegneria dell'università di Padova prime sperimentazioni significative.

A questo riguardo si ritiene opportuno evidenziare l'articolo *"Assessment of the Urban Heat Island Impact on Building Energy Performance at District Level with the EURECA Platform"* di Pierdonato Romano, Enrico Prataviera, Laura Carnieletto, Jacopo Vivian, Michele Zinzi e Angelo Zarrella del Dipartimento di Ingegneria Industriale - Sezione di Fisica Applicata, Università degli Studi di Padova.



L'articolo evidenzia come negli ultimi decenni, la domanda di energia per il raffreddamento nelle aree urbane è aumentata sempre più rapidamente a causa del riscaldamento globale e della crescita delle economie in via di sviluppo. In questa prospettiva, la comunità della modellizzazione energetica degli edifici urbani sta concentrando le proprie attività di ricerca su strumenti innovativi e azioni politiche per migliorare la sostenibilità delle città.

L'articolo evidenzia un nuovo modulo della piattaforma EURECA (Energy Urban Resistance Capacitance Approach) per valutare gli effetti dell'interazione tra gli edifici di un distretto urbano nella stagione di raffreddamento.

Grazie ad "EURECA" si rende possibile prevedere la domanda urbana di energia utilizzando un approccio bottom-up e basse risorse computazionali. Il nuovo modulo permette di valutare l'ombreggiamento reciproco tra gli edifici e gli effetti dell'isola di calore urbana, ed è ben integrato con il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici.

L'analisi svolta nell'articolo, è stata condotta considerando un caso studio reale a Padova. I risultati mostrano che l'isola di calore urbana provoca un aumento medio di 2,2 °C della temperatura dell'aria esterna, causato principalmente dal calore di scarto espulso dai sistemi di raffreddamento.

Ciò comporta un aumento della domanda di energia elettrica per il raffrescamento urbano, che può variare tra il 6% e l'8%. La domanda di energia elettrica per il raffrescamento è particolarmente influenzata dall'isola di calore urbana (UHI), a causa del degrado che provoca sull'efficienza dei sistemi HVAC.

Altro articolo scientifico di notevole valore per questi "Quaderni Tecnici" è l'articolo "*Analysis and application of a lumped-capacitance model for urban building energy modelling*" pubblicato

sulla rivista “Sustainable Cities and Society”, di: Angelo Zarrella, Enrico Pratavia *, Pierdonato Romano, Laura Carnieletto, Jacopo Vivian.



L'articolo mira a dimostrare l'affidabilità di un modello a capacità concentrata nella valutazione della domanda di riscaldamento e raffreddamento a livello urbano. Il modello indicato estende un precedente modello prendendo in considerazione moduli diversi per la preelaborazione della radiazione solare, sistemi HVAC e stima della produzione fotovoltaica.

In particolare, è stato analizzato un distretto di studio che coinvolge 13 edifici a Padova, considerando simulazioni dettagliate di singoli edifici con EnergyPlus come benchmark.

I risultati mostrano che il modello porta a una buona accuratezza nella valutazione della domanda energetica del distretto sia per il riscaldamento che per il raffreddamento degli ambienti. Le principali fonti di errore sono semplificazioni geometriche, ombreggiature ed effetti di zonizzazione termica, dimostrando così l'importanza di dati di input di alta qualità nella modellazione urbana.

Tuttavia, i risultati evidenziano come semplici correzioni possano migliorare l'accuratezza quando non sono disponibili informazioni geometriche dettagliate. Infine, il modello è stato utilizzato per valutare i costi e il potenziale di risparmio energetico di diverse misure di ristrutturazione degli edifici e di installazioni fotovoltaiche nel distretto considerato, fornendo un'indicazione importante sulla priorità di investimento per i decisori.

A conclusione del pregevole articolo si evidenzia come “l'Urban Building Energy Modelling (UBEM)” mira ad analizzare e studiare gli edifici di quartieri e città come sistemi energetici.

L'articolo presenta una procedura per simulare aree urbane basata su un modello semplificato a capacità concentrata; quest'ultimo, adattato dalla versione originale proposta dalla norma ISO 13790, è stato convalidato attraverso simulazioni Energy Plus dettagliate su un quartiere composto da nove edifici universitari e quattro edifici residenziali a Padova.

Per come evidenziato nell'articolo l'implementazione di un modello a capacità concentrata per la simulazione di edifici su scala urbana richiede basse risorse computazionali, questo significa che la simulazione del distretto può essere eseguita più volte per valutare l'impatto di diverse misure di efficienza energetica.

All'interno dell'articolo vengono proposte una serie di azioni di ristrutturazione per ciascun edificio, mostrando l'impatto di involucri migliorati sul risparmio energetico.

I risultati forniscono indicazioni affidabili su quali azioni devono essere prioritarie, come ogni edificio deve essere ristrutturato e, in generale, qual è il risultato di eventuali azioni peculiari su scala distrettuale.

Infine, l'applicazione del modello ha mostrato che i nuovi impianti fotovoltaici sui tetti degli edifici considerati possono coprire una quota significativa degli usi di energia elettrica del distretto (21%), riducendo così l'energia generata dai combustibili fossili e le relative emissioni di CO₂ (è comunque necessario mantenere l'attenzione sulla riduzione dei consumi energetici).

Un futuro lavoro affronterà gli effetti di un modulo aggiuntivo per il microclima urbano, comprese le interazioni tra edifici dovute allo scambio reciproco di radiazioni e all'ombreggiamento reciproco, nonché le variazioni locali della temperatura dell'aria esterna dovute al fenomeno dell'isola di calore urbano.

Questi strumenti di prossimo sviluppo sono già all'attenzione del Comune di Padova, anche in relazione al Centro Storico, ritenendoli indispensabili per poter meglio pianificare e incentivare la riqualificazione energetica di parti significative della città.

Capitolo 2 - Analisi Critica delle modalità di miglioramento energetico degli edifici in Centro Storico

Al fine di evidenziare buone pratiche applicabili al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici nel Centro Storico di Padova, i Quaderni Tecnici che seguono entreranno dapprima nel merito delle modalità di efficientamento del sistema edificio-impianti e successivamente delle possibilità di produzione di energia da fonti rinnovabili, coerentemente con il contesto del Centro Storico.

In entrambi gli approfondimenti si cercherà di evidenziare modalità di intervento meno invasive rispetto a quelle correntemente utilizzate e più aderenti al regime di vincolo presente sui singoli edifici e alle norme e ai regolamenti vigenti.

In relazione a questi aspetti si rimanda a quanto indicato nella parte dedicata a questo tema nel presente prontuario.

2.1 Efficientamento del sistema edificio-impianti

In relazione alle modalità di intervento sul sistema edificio-impianti più coerenti rispetto ad interventi su edifici nel Centro Storico, a seguire si evidenzieranno dapprima indicazioni di buona prassi corrente per ciascuna tipologia di intervento sulle chiusure esterne degli edifici per poi passare ad esaminare gli interventi sugli impianti.

Gli interventi volti a ottimizzare la prestazione energetica degli edifici in maniera passiva si basano come misura principale sul controllo della quantità di energia termica che il manufatto scambia con l'ambiente.

Tali interventi sono strettamente legati alle condizioni microclimatiche esterne, variabili nel tempo e nello spazio; per questa ragione, soprattutto nei climi temperati, in cui si verificano notevoli escursioni termiche stagionali e giornaliere, è importante rendere compatibili sia le necessità di riscaldamento che di raffrescamento. In particolare, durante l'inverno l'obiettivo principale è quello di favorire la produzione, captazione e accumulo di calore all'interno dell'edificio, limitando allo stesso tempo le dispersioni termiche verso l'esterno.

Il primo risultato può essere raggiunto massimizzando lo sfruttamento dell'energia solare e ottimizzando gli apporti termici gratuiti generati all'interno dell'edificio come sottoprodotto di altri processi (ad esempio, il calore prodotto dagli utenti e/o dagli apparecchi e dispositivi atti alla fruizione); il secondo migliorando l'isolamento termico complessivo delle chiusure trasparenti e

opache: in questo modo, è possibile integrare il rendimento degli impianti attivi, diminuendo la domanda di energia primaria necessaria per il raggiungimento delle condizioni di comfort.

Le proprietà isolanti di una parete opaca dipendono, in generale, dallo spessore e dalla conducibilità termica dei materiali che la compongono. In questo senso, le pareti massive che generalmente caratterizzano l'edilizia storica possiedono un livello medio di conducibilità termica, a fronte di elevati spessori: ciò garantisce spesso un buon livello di isolamento delle chiusure opache e consente di concentrare gli interventi verso la riduzione delle infiltrazioni o il rinnovo, sostituzione e integrazione delle chiusure trasparenti, di solito le più deficitarie rispetto a questi aspetti.

Nel caso in cui la prestazione termica delle pareti fosse ritenuta insufficiente, è possibile integrare il sistema murario con appositi strati di materiale isolante, la cui bassa conducibilità termica permette di migliorare notevolmente le prestazioni termiche del pacchetto murario a fronte di ridotti spessori.

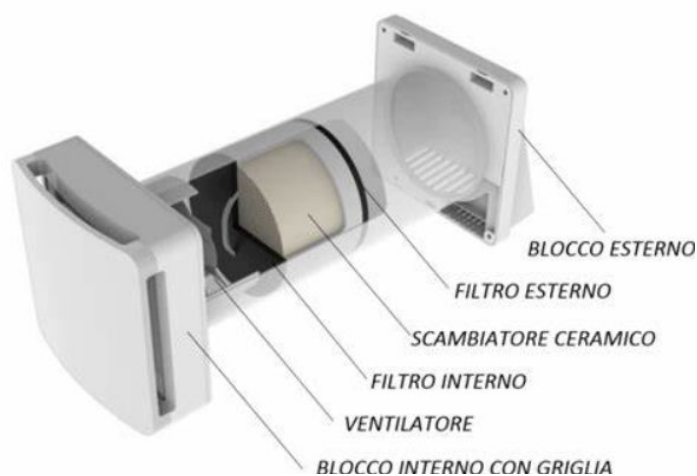
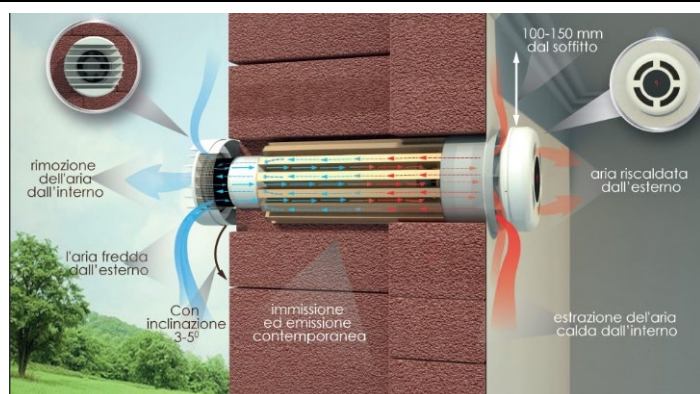
È da tener presente come l'aggiunta di uno strato isolante in un edificio vincolato e/o storico è un intervento comunque invasivo e delicato, da adattare di volta in volta alle condizioni specifiche del singolo manufatto.

Da una parte, essa rappresenta un'alterazione più o meno marcata dei prospetti interni e/o esterni, la cui compatibilità dipende dalle qualità storico-architettoniche dell'elemento di involucro su cui si opera e dalla sua propensione alla trasformazione (ad esempio, dalla presenza di apparati decorativi o rilievi da salvaguardare). In questo senso, solitamente le necessità di conservazione dei sistemi morfologici e delle finiture dell'edificio influenzano in modo preponderante il posizionamento dello strato isolante, anche quando ciò comporti prestazioni energetiche inferiori a quelle teoricamente raggiungibili.

Inoltre, l'addizione di un nuovo componente all'involucro opaco può determinare implicazioni negative sul comportamento igrometrico delle pareti, con possibile formazione di condensa interstiziale.

In particolare, negli edifici tradizionali si riscontra più comunemente la presenza di materiali ad elevata porosità, accanto all'impiego di elementi costruttivi generalmente privi di barriera al vapore o impermeabilizzazioni; ciò determina un maggiore livello di umidità, che ha la sua controparte in una più facile evaporazione dell'umidità interna dell'edificio.

Per questi motivi, la scelta dell'isolante termico deve conformarsi alla permeabilità e traspirabilità del sistema murario esistente, o essere controbilanciata da misure alternative per la dissipazione dell'umidità in eccesso, come un incremento della ventilazione naturale, la quale, di contro, incrementa le dispersioni termiche o, laddove possibile, una efficace ventilazione meccanica con recupero del calore dell'aria espulsa.



Sistema VMC integrato nel vetro

Impianti di ventilazione meccanica controllata

Qualora non sia possibile far ricorso alla ventilazione naturale degli ambienti, la ventilazione meccanica controllata rappresenta una possibile soluzione per migliorare la qualità dell'aria all'interno di abitazioni e ambienti di lavoro. Il suo utilizzo determina effetti concreti sia sul benessere delle persone che sull'efficienza energetica degli edifici. Con la VMC l'aria viene costantemente estratta dagli ambienti interni e sostituita da aria fresca proveniente dall'esterno (opportunamente filtrata per evitare l'ingresso di agenti potenzialmente nocivi). A seguire si evidenzierà la tecnologia relativa a VMC per singoli ambienti e non dei sistemi centralizzati, ritenuti troppo complessi da utilizzare in edifici storici. Il sistema VMC puntuale consiste in una macchina che viene posizionata all'interno di un ambiente nel quale si intende intervenire per effettuare un migliore ricambio (appunto puntuale) dell'aria. Tale sistema non prevede canalizzazioni per collegare un motore centrale con le varie bocchette che vengono posizionate nelle varie stanze dell'abitazione. Possono essere:

- a flusso singolo; la macchina effettua solo l'espulsione dell'aria verso l'esterno oppure, l'immissione dell'aria verso l'interno;
- a flusso singolo alternato; la macchina effettua entrambe le azioni: espulsione ed immissione dell'aria alternandole fra di loro. Questo permette di ottenere un recupero del calore;
- a doppio flusso continuo; provvedono ad espellere ed immettere aria in simultanea. Alcune macchine prevedono 2 fori (di circa 8 cm di diametro): uno viene utilizzato per l'espulsione e uno utilizzato per l'immissione. Altre invece hanno un solo foro coassiale da circa 16 cm di diametro;
- a scomparsa per integrarsi ad esempio nella parete, nel vetro o nel cassonetto della finestra senza dover effettuare fori sulla facciata esterna per inserire il sistema di VMC.

2.2 Chiusure verticali opache

Le chiusure opache verticali, negli edifici storici, sono generalmente composte da pareti massive, solitamente in pietra o laterizio pieno, che riuniscono in un unico componente la funzione strutturale e quella di barriera/dialogo tra interno ed esterno dell'edificio.

Per quanto riguarda il comportamento termo-igrometrico delle chiusure verticali, d'inverno vanno ridotte le dispersioni; d'estate, la forte inerzia termica delle murature di fatto limita e ritarda nel tempo l'ingresso del calore.

In relazione al regime estivo molta importanza rivestono il colore e le finiture esterne delle pareti dell'edificio. All'interno le caratteristiche morfologiche delle chiusure opache in corrispondenza delle aperture (svasi), insieme alle colorazioni scelte contribuiscono al potenziamento dell'illuminazione naturale.

La scelta dei possibili isolamenti aggiuntivi deve ovviamente tenere conto delle diverse condizioni microclimatiche esterne in inverno ed in estate, oltre che delle prescrizioni normative. In ogni caso, specie negli edifici vincolati, gli interventi proposti dovranno essere rispettosi delle caratteristiche del manufatto, non solo in termini di qualità storico-architettonica della fabbrica, ma anche di funzionamento bioclimatico del sistema edilizio.

Gli edifici storici possiedono un comportamento termo-igrometrico sedimentato, adattato alle richieste di comfort delle diverse epoche di utilizzo, che dipendono dalle caratteristiche dei materiali e delle tecnologie tradizionali impiegate: la comprensione preliminare di questo comportamento, specie se supportata da una simulazione termica dinamica, consente di adeguarlo alle necessità contemporanee esaltandone le prestazioni ed evitando alterazioni improprie potenzialmente dannose (ad esempio, l'impermeabilizzazione delle pareti massive tradizionali, dotate di elevata traspirabilità, che può generare fenomeni di condensa).

In relazione alle prestazioni termiche invernali delle murature esterne è da annotare come queste, spesso in relazione al loro spessore e alla media conducibilità, garantiscono valori accettabili di trasmittanza termica delle pareti; qualora invece la loro prestazione termica non fosse sufficiente a garantire corrette condizioni di benessere igrometrico si renderà necessario integrare l'involucro con uno strato isolante specifico.

Tenendo conto di quanto consentito dalle norme e dai regolamenti comunali per i singoli edifici per il Centro Storico (vedi prontuario) e in funzione della tipologia di intervento possibile sullo specifico edificio, dal restauro scientifico alla ristrutturazione, e in relazione alla qualità storico-architettonica dell'edificio e alla prestazione energetica richiesta, va valutata la modalità di posizionamento dello strato isolante secondo una delle modalità seguenti:

- strato isolante esterno (il cosiddetto “isolamento a cappotto”);
- strato isolante interno;
- intonaco termoisolante esterno e isolamento interno;
- intonaco termoisolante interno e/o esterno.

La scelta della soluzione ottimale sarà funzione delle prestazioni utili da conseguire e del regime di vincolo a cui l'edificio è assoggettato.

Prima di entrare nel merito delle tipologie di materiali più idonei da utilizzare nell'edilizia storica (e non solo), è opportuno evidenziare alcune considerazioni relative al posizionamento del materiale isolante.

In ogni caso, è opportuno evidenziare come il miglior funzionamento termico degli edifici massivi, ad alta inerzia termica, viene ottenuto con un utilizzo pressoché costante dell'edificio; in caso di utilizzo temporaneo può in ogni caso essere utile mantenere un funzionamento di minima degli impianti in modo da evitare l'eccessivo raffreddamento/riscaldamento delle pareti.

In relazione all'isolamento esterno, per evidenziare come questo riduce le fluttuazioni di temperatura superficiale e dell'aria, in questo modo l'ambiente impiega più tempo a riscaldarsi e a raffreddarsi ma, mantiene più a lungo una temperatura costante. Quando questa soluzione è utilizzabile, risulta essere adatta ad ambienti con funzionamento continuo dell'impianto, che, può essere impiegato a minore regime; nell'estate impedisce il surriscaldamento della parete ottimizzando il raffrescamento passivo dell'edificio.

La soluzione con isolante posto sul lato interno della parete, soluzione questa quasi obbligata in caso di impossibilità di porre l'isolante sul lato esterno; presenta come principale criticità la riduzione delle superfici utili degli spazi interni e, contemporaneamente riduce la partecipazione della massa termica della muratura rendendo più rapide le variazioni della temperatura interna.

Durante il periodo estivo, si riduce la funzione di accumulo e dissipazione del calore della muratura direttamente soggetta all'irraggiamento solare, limitando il raffrescamento passivo dell'involucro. Questa soluzione di fatto appare più appropriata per ambienti con uso discontinuo, con frequenti accensioni e spegnimenti dell'impianto di climatizzazione.

Nel caso di isolamento sul lato interno delle murature sarà necessario curare con particolare attenzione l'insorgere di ponti termici in prossimità degli infissi e di altri punti di discontinuità. Deve essere prestata molta attenzione alla qualità del materiale scelto perché un cappotto termico interno è più soggetto alla creazione di ponti termici con conseguente formazione di umidità e muffe, di qui la necessità di utilizzare materiali traspiranti e naturali, di fatto questa è la modalità migliore per consentire alla struttura muraria di continuare a traspirare evitando la formazione di condensa e la conseguente proliferazione di muffe e batteri.

Una soluzione di compromesso può essere ottenuta prevedendo qualche centimetro di spessore di intonaco termoisolante all'esterno e quindi un ridotto spessore di isolante all'interno, riducendo così l'ingombro interno e la comparsa di condensa.

Lì dove vi è poca necessità di integrazione della qualità termica della muratura può essere sufficiente l'utilizzo di intonaci termoisolanti a base di calci naturali, solo sul lato esterno, se è possibile aumentare lo spessore della parete esterna, oppure distribuendo l'isolamento in parte sulla parete esterna (limitandolo allo spessore dell'intonaco preesistente o poco più) e in parte sulla parete interna.

La comparsa sul mercato di materiali innovativi, caratterizzati da elevate prestazioni isolanti e ridotti spessori, consente di ipotizzare nuove soluzioni molto prestazionali e poco invasive.

2.2.1 L'isolamento a cappotto

La Circolare 4/2021 pubblicata dal MiBACT specifica che gli interventi di riqualificazione energetica, su edifici soggetti a vincolo e/o che si trovano in area di tutela paesaggistica, caratterizzati dall'isolamento a cappotto previsti su immobili antecedenti al 1945 siano tenuti ad una necessaria autorizzazione paesaggistica semplificata, caratterizzata da un obbligo da parte delle Soprintendenze di pronunciarsi entro un periodo di tempo di massimo 20 giorni.

Tuttavia, anche per gli edifici realizzati in data successiva al 1945 appartenenti ai centri storici, non può essere garantita la realizzazione di questi interventi, dovendo sempre agire "nel rispetto delle caratteristiche architettoniche, morfo-tipologiche, dei materiali e delle finiture esistenti", come detto, dal DPR 31/2017.

Nella circolare, viene ancora puntualizzato che, «le specifiche caratteristiche tecnico-costruttive, definite caso per caso, possono comportare incrementi di spessore anche significativi in funzione dello specifico materiale, della soluzione tecnica prescelta e del grado di efficientamento termico richiesto dall'intervento», si tratta, quindi, di una valutazione specifica e singolare di ogni tipo di intervento inerente all'efficientamento energetico.

La tendenza è quindi quella di limitare interventi di riqualificazione, con particolare riferimento alla coibentazione esterna, che comportino una sensibile variazione dei connotati estetici degli edifici considerati di interesse storico e culturale, compromettendo così le esigenze di tutela e valorizzazione.

2.2.2 Raffrescamento passivo delle superfici verticali

Le strategie di raffrescamento passivo prevedono:

1. il controllo delle modalità di incidenza dei flussi termici sulla superficie dell'edificio raggiunto attraverso un corretto utilizzo delle schermature e/o degli ombreggiamenti solari (anche vegetali) esterni e dei materiali di rivestimento della facciata;

2. modifica delle modalità di propagazione dei flussi termici verso gli ambienti interni attraverso l'ottimizzazione delle masse termiche dell'edificio.

Nei climi temperati, con elevate escursioni termiche diurne e notturne, l'inerzia termica della parete assume particolare importanza specie nel periodo estivo. Una chiusura con elevata inerzia accumula e rilascia il calore in maniera complessa, diminuendo le oscillazioni della temperatura ambiente nell'arco del giorno consentendo un significativo ritardo nella trasmissione dell'onda termica, dalla superficie esterna del muro a quella interna.

La prestazione dell'inerzia termica è caratterizzata principalmente da due parametri dello sfasamento e dell'attenuazione che devono essere valutati con riferimento al comportamento estivo delle chiusure. In linea generale, queste dovrebbero garantire uno sfasamento di circa 12 ore e un'elevata attenuazione: tale configurazione permette di ridurre la potenza del flusso termico in entrata in modo da farlo giungere sulla superficie interna nelle ore più fresche, in cui può essere facilmente dissipato per ventilazione degli ambienti.

Le chiusure massive degli edifici tradizionali, dotate di un'elevata capacità di accumulo termico, hanno anche una buona inerzia termica; nondimeno, l'eventuale presenza di elementi di finitura che separino la superficie interna della parete dall'ambiente o, lo sfasamento troppo elevato o troppo basso dell'involucro, possono annullare l'effetto positivo della muratura tradizionale.

Nel primo caso, è possibile riportare a vista le masse termiche eliminando eventuali addizioni improprie. Nel secondo caso l'azione è più complessa e può interessare, qualora possibile ed economicamente fattibile, l'integrazione di ulteriori masse termiche all'involucro o, meglio, l'attivazione delle masse termiche interne dell'edificio, come le partizioni orizzontali e verticali.

Un altro fattore da tenere in considerazione rispetto al raffrescamento è la posizione dello strato di isolamento termico eventualmente aggiunto alle chiusure, dal momento che altera il comportamento delle masse termiche.

Nel caso di un edificio privo di isolamento termico, i carichi termici derivano: dal ricambio d'aria, dalla produzione interna di calore e dalla trasmissione attraverso le pareti.

Nelle migliori condizioni, l'involucro può assorbire i carichi termici sia interni che esterni durante il periodo diurno e rilasciarli durante la notte verso l'esterno; ciò significa che la dissipazione del calore può avvenire naturalmente attraverso le pareti.

In un edificio provvisto di strato isolante sul lato esterno della facciata, i carichi termici di trasmissione attraverso le pareti verso l'interno vengono pressoché annullati; la massa termica dell'involucro e delle partizioni assorbe principalmente i carichi interni e per poter dissipare questi carichi durante i periodi più freschi, sarà necessario ricorrere a strategie di raffrescamento radiativo o convettivo.

Il raffrescamento convettivo funziona quando la temperatura dell'aria esterna fatta entrare risulta essere inferiore a quella dell'ambiente, l'efficacia dell'intervento dipende dall'escursione termica tra interno ed esterno, che in aree urbane può essere notevolmente ridotta, anche in climi temperati mediamente secchi, dal fenomeno dell'Isola di Calore Urbana.

In alternativa, possono essere adottati sistemi ibridi o forzati di ventilazione, eventualmente accoppiati a una revisione complessiva degli impianti, sempre nel rispetto dei caratteri storico-artistici dell'edificio.

In un edificio provvisto di strato isolante sul lato interno della muratura, il funzionamento termigrometrico interno delle pareti massive viene praticamente annullato, aumentando gli sbalzi termici tra periodo diurno e notturno e riducendo l'importanza della dissipazione termica per ventilazione. Tuttavia, è possibile che le partizioni orizzontali o verticali possano supplire a questa mancanza, se dotate di una buona massa termica.

In caso le masse termiche delle partizioni orizzontali o verticali non siano sufficienti, si può prevedere l'integrazione delle masse termiche interne di solai e pareti perimetrali, compatibilmente con le condizioni di vincolo dell'edificio e con la riduzione del volume utile interno.

L'utilizzo di materiali isolanti a cambiamento di fase con punto di fusione vicino alla temperatura degli ambienti è una soluzione tecnologicamente possibile. Per le applicazioni in edilizia, i migliori risultati si riscontrano con materiali dal punto di fusione prossimo alle temperature di comfort interno, tra 18 °C e i 25 °C (sono spesso impiegati composti organici paraffinici o sali idrati (vedi scheda tecnica su QT 4 – “Materiali isolanti a cambiamento di fase”).

Questi materiali possono essere integrati nelle chiusure trasparenti o negli elementi opachi e, in questo secondo caso, l'applicazione più comune prevede l'aggiunta di microcapsule, con diametro di 2-20 µm, ai materiali tradizionali, in modo da ottenere componenti molto performanti con modalità di posa consuete. In particolare, si stanno mettendo in produzione pannelli di cartongesso per la realizzazione di pareti divisorie e controsoffitti, o speciali intonaci per il rivestimento delle superfici interne. Tali componenti presentano un'inerzia termica estremamente elevata a fronte di ridotti spessori e sono solitamente compatibili con le opere di manutenzione corrente degli edifici storici. Gli svantaggi, invece, sono legati allo stato ancora non perfezionato della tecnica, alle difficoltà di controllo del comportamento specifico dei materiali e alla loro elevata infiammabilità.

2.3 Chiusure orizzontali superiori

Le chiusure opache superiori di solito sono realizzate nell'edilizia storica tramite coperture a falda su struttura lignea, o tramite coperture piane.

Le chiusure superiori rappresentano l'elemento di delimitazione termo-igrometrico tra interno ed esterno, determinando le modalità di accumulo e il rilascio dei flussi termici in entrata e in uscita dall'edificio. L'efficientamento passivo è finalizzato al contenimento delle dispersioni dal punto di vista del riscaldamento degli ambienti sottostanti; ai fini del raffrescamento nel cercare di minimizzare la radiazione incidente e nel dissipare il calore in eccesso.

Sicuramente sono la parte di involucro maggiormente soggetta alle sollecitazioni esterne dovute agli agenti atmosferici, soprattutto alla radiazione solare, al vapore e alla pioggia. Il funzionamento passivo della copertura può essere ottenuto migliorando l'isolamento della copertura e quindi con interventi che prevedano la rimozione del manto di copertura per migliorare le prestazioni degli strati sottostanti, come l'introduzione di uno strato isolante e/o di un'intercapedine ventilata.

In questi casi è utile ipotizzare il restauro e la reintegrazione degli elementi di finitura esistenti, in genere le tegole, operazione che consente di non alterare l'aspetto dell'edificio, inoltre, può essere migliorato il funzionamento passivo attraverso la realizzazione di camini di ventilazione, oppure interventi che riguardino l'integrazione di sistemi attivi di produzione di energia, su questo aspetto si dirà meglio in seguito.

Ovviamente le chiusure superiori devono garantire la tenuta all'acqua, laddove anche piccole infiltrazioni di acqua meteorica, anche per capillarità o per i cicli di gelo e disgelo, possono determinare ponti termici e fenomeni di condensa superficiale e interstiziale.

Garantire la tenuta all'acqua significa in particolare impedire le infiltrazioni delle precipitazioni atmosferiche. I manti di copertura discontinui (tegole, lastre, ecc.) garantiscono, se correttamente posati, la tenuta all'acqua e il relativo smaltimento per gravità. La corrente modalità di prevedere l'integrazione di strati impermeabili consente sicuramente una migliore tenuta all'acqua, contemporaneamente anche all'aria ed è per questo che il loro impiego può essere ipotizzato solo se compatibile con il comportamento termo-igrometrico complessivo dell'edificio.

2.3.1 Efficientamento delle coperture

L'efficientamento per il periodo invernale può essere accentuato migliorando la coibentazione delle chiusure orizzontali lì dove, escludendo le chiusure voltate, i tetti sono realizzati con materiali a ridotta massa termica e ridotto spessore, cosa questa che difficilmente garantisce una buona inerzia termica, rendendo necessaria l'integrazione di uno strato isolante supplemento.

A seconda delle caratteristiche della copertura esistente, sia essa piana o inclinata, della presenza di condensa interstiziale o superficiale, delle modalità d'uso degli ambienti sottotetto e del comportamento termo-igrometrico generale dell'involucro, l'intervento sulla copertura può essere effettuato con una delle seguenti modalità:

1. strato isolante all'estradosso della copertura non ventilato;
2. strato isolante all'estradosso della copertura ventilata;
3. strato isolante all'intradosso della copertura.

1. Isolamento all'estradosso non ventilato

Questa tipologia di isolamento non ventilato ed estradosso alla copertura prevede dopo la rimozione del manto di copertura esistente e la sua eventuale sostituzione o integrazione, l'applicazione di uno strato continuo di pannelli isolanti protetti all'esterno da uno strato di finitura, che può essere composto dalle tegole nel caso di tetti spioventi, o da ghiaia o pavimento, anche galleggiante nel caso di tetti piani.

Sarà compito del progettista valutare se sia preferibile optare per la soluzione tecnologica del tetto caldo (strato isolante posizionato sotto il manto impermeabile) o del tetto rovescio (strato isolante posizionato sopra il manto impermeabile).

2. Isolamento all'estradosso ventilato

La realizzazione di un'intercapedine ventilata sopra lo strato isolante evita il ristagno di umidità e la formazione di condensa. Questa soluzione, se correttamente realizzata, durante la stagione estiva consente che si generino moti convettivi per la dissipazione del calore in eccesso delle strutture, contribuendo al raffrescamento dei locali.

3. Isolamento all'intradosso

Questa soluzione migliora la coibentazione dell'involucro ma non consente di eliminare i ponti termici strutturali. Questo intervento riduce il volume utile dei locali, si rende quindi necessario garantire il rispetto dei vincoli di altezza da normativa; per questo motivo è buona norma scegliere materiali isolanti con alte prestazioni "SIM".

Qualora non sia possibile intervenire sul manto di copertura, occorre ripensare opportunamente alle destinazioni d'uso degli ambienti, utilizzando il sottotetto essenzialmente come buffer space e per attività che non richiedano requisiti di temperatura troppo controllati. In questi casi, lo strato isolante può essere collocato all'estradosso dell'ultimo solaio (dunque all'interno del sottotetto).

2.3.2 Raffrescamento passivo

Le tecniche di raffrescamento passivo sono legate a interventi sull'involucro finalizzati a prevenire l'irraggiamento solare all'interno dell'edificio, in relazione a questo possiamo indicare due diverse modalità di intervento:

1. espedienti progettuali di tipo preventivo, finalizzati a ridurre gli apporti termici esterni prima che investano l'edificio;

2. controllo delle modalità con cui i flussi energetici che, una volta attraversate le chiusure, possono essere successivamente dissipati assieme agli eventuali guadagni termici interni.

Per le coperture, la prima classe di intervento può essere effettuata agendo sulla morfologia delle superfici di involucro e sulla loro finitura superficiale, la seconda lavorando sulla progettazione ed il calcolo della capacità termica e del potere coibente dei materiali e introducendo sistemi di ventilazione naturale o controllata.

In edifici sottoposti a vincolo, l'alterazione della forma delle coperture può essere prevista esclusivamente in caso di deterioramento o crollo di porzioni di tetto, in ogni caso l'intervento deve risultare compatibile con il carattere storico-artistico della fabbrica.

La finitura superficiale (forma, materiale e colore) modifica la percentuale di energia solare che viene riflessa o assorbita dai materiali, propagandosi verso l'interno dell'edificio; questa percentuale è funzione: dell'angolo di incidenza, della rugosità della superficie e del coefficiente di riflessione, o albedo, dei materiali impiegati.

L'albedo rappresenta la percentuale di radiazione solare che viene riflessa e, per differenza, assorbita da un materiale: la percentuale di energia riflessa influenza molto la propagazione dell'energia solare nell'ambiente, sia disperdendola verso l'atmosfera che reindirizzandola verso le strutture limitrofe.

I valori dell'albedo dipendono da diverse caratteristiche del materiale, tra cui il colore e la ruvidezza; in generale, più il materiale è chiaro, maggiore sarà il valore dell'albedo. Per ottimizzare la dissipazione della radiazione solare verso la volta celeste, compatibilmente con i caratteri estetici dell'organismo edilizio, è buona norma utilizzare finiture chiare per le coperture, soprattutto nel caso di tetti piani, che ricevono il massimo irraggiamento solare estivo.

In alternativa, soprattutto nel caso sia necessario mantenere una particolare colorazione superficiale, è possibile impiegare particolari materiali e pigmenti, detti “cool materials” caratterizzati da un valore molto alto dell'albedo anche a fronte di colorazioni e trattamenti superficiali variabili, grazie all'impiego di particolari componenti del materiale. Tali prodotti hanno ormai superato la fase sperimentale e sono ampiamente disponibili sul mercato ed hanno raggiunto uno standard testato e si possono applicare a tutte le principali tipologie di finiture; possono essere impiegati per le operazioni di manutenzione, fornendo buone prestazioni di riflessione dell'irraggiamento solare senza alterare il carattere estetico della fabbrica (vedi scheda tecnica: “Le pitture ad effetto termico o termoriflettenti – QT 7”.

2.3.3 Realizzazione di una copertura ventilata

L'introduzione di un'intercapedine per la ventilazione al di sopra dello strato isolante permette di dissipare per raffrescamento convettivo parte del calore derivante dall'irraggiamento solare estivo. Tale intercapedine deve avere un adeguato spessore in rapporto alle dimensioni della

copertura ed essere messa in diretto contatto con l'ambiente esterno. Nelle coperture inclinate, il flusso d'aria è determinato dal gradiente termico dovuto all'elevata temperatura dell'aria contenuta nell'intercapedine e all'effetto camino; benché le giaciture orizzontali riducano al minimo l'effetto camino, nondimeno la movimentazione d'aria generata dal vento provvede comunque al ricambio d'aria nell'intercapedine. Compatibilmente con i caratteri morfologici dell'edificio, la portata dell'aria può essere incrementata variando la sezione dell'intercapedine per sfruttare l'effetto Venturi.

La copertura, essendo la porzione di edificio maggiormente esposta alla volta celeste, può essere sfruttata per il raffrescamento radiativo, che si basa sul principio del trasferimento di radiazione infrarossa da un corpo ad una certa temperatura ad uno a temperatura più bassa, che svolge la funzione di pozzo termico.

Il raffrescamento radiativo diretto prevede la dissipazione del calore direttamente dall'ambiente sottotetto all'esterno attraverso la copertura e può essere previsto solo nel caso in cui la copertura non sia isolata.

2.4 Chiusure verticali trasparenti

I serramenti sono sicuramente un elemento di criticità nella valutazione dell'efficienza energetica di un edificio in quanto rappresentano sicuramente un punto critico di grande importanza e, la loro prestazione dipende sia dai materiali costituenti sia dalle caratteristiche costruttive e dalla qualità della posa. Attraverso le superfici vetrate, i giunti e le guarnizioni si verificano dispersioni termiche; inoltre, in funzione delle fondamentali modalità di funzionamento degli infissi, questi consentono anche i ricambi d'aria e la ventilazione degli ambienti.

Sicuramente la sostituzione dei serramenti modifica i prospetti dell'edificio e su questo va posta molta attenzione e cura, ma anche il funzionamento termico degli ambienti retrostanti lì dove il rapporto tra l'elemento sostituito e le parti dell'involucro non modificate, data l'elevata inerzia termica che contraddistingue le murature storiche, può modificare di molto il suo funzionamento termico.

2.4.1 Infissi e controllo delle dispersioni termiche e dell'irraggiamento solare

I serramenti, oltre che a contenere la dispersione termica, sono gli elementi che determinano la possibilità di captare la radiazione solare: cosa questa positiva in inverno, problematica in estate; inoltre, le chiusure trasparenti determinano la luminosità e se tradizionali, la ventilazione naturale degli ambienti interni, nonché il comfort acustico e, la relazione visiva tra interno ed esterno.

Quando scegliamo di cambiare i serramenti è necessario tener conto di tutti questi elementi fondamentali per la qualità degli ambienti interni. In ogni caso la scarsa capacità termica dei vetri

tradizionali contribuisce fortemente alla dispersione termica in entrata ed uscita, la sua sostituzione con una vetratura dotata di una resistenza termica più elevata migliora la prestazione energetica dell'involucro riducendo le perdite per trasmissione.

Il guadagno termico attraverso le aperture trasparenti, combinato con la massa termica degli edifici, produce un notevole effetto positivo in inverno, poiché la massa termica colpita dai raggi solari è in grado di assorbire la radiazione nelle ore diurne, accumulando e distribuendo il calore immagazzinato nelle ore notturne. Durante l'estate al contrario l'apporto termico deve essere evitato attraverso l'uso di opportune schermature. Le contenute dimensioni dei serramenti fanno sì che spesso gli elementi aggettanti in facciata, con il sole alto allo zenit creino zone d'ombra che contribuiscono a ridurre gli effetti negativi del sistema in estate. In assenza di queste condizioni, si deve provvedere con opportune schermature solari.

Grande attenzione va posta alla tenuta all'aria in quanto elevati tenori di umidità interna, conseguenti alla presenza di umidità non controllata proveniente dalle strutture verticali a contatto con il suolo, possono indurre la formazione di muffa. Nel caso di posizionamento di nuovi infissi occorre pertanto verificare e controllare anche la corretta aerazione degli ambienti e, in relazione a questo, va verificata con attenzione la possibilità di prevedere un efficace sistema di ventilazione naturale se possibile, altrimenti una ventilazione meccanica (VMC).

Capitolo 3 - Valutazione dei costi e ciclo di vita degli edifici

Spesso in relazione all'utilizzo di materiali e apparati tecnologici più innovativi e prestazionali rispetto a quelli correntemente utilizzati la principale obiezione è relativa alla verifica del maggior costo che il loro utilizzo probabilmente determina.

In realtà la determinazione dell'incremento dei costi negli interventi di efficientamento energetico degli edifici, specie se storici, è molto complessa e non può limitarsi ad un superficiale confronto di costo tra due diversi materiali utilizzabili.

In realtà si rende necessario confrontare l'uso dei materiali in relazione alla tipologia costruttiva degli edifici, al tipo di impianti presenti e alla loro modifica, alla qualità indoor ed alla salubrità degli ambienti che si vengono a determinare in funzione delle scelte.

L'esperienza insegna, come dimostrano anche gli effetti di alcuni interventi realizzati nell'ambito del superbonus 110%, che soluzioni poco costose e tecnicamente non corrette spesso implicano un veloce degrado degli edifici con la necessità di interventi successivi in tempi brevi per porre rimedio agli inconvenienti che si manifestano.

L'approccio tecnicamente più corretto è quello consigliato all'interno dei Criteri Ambientali Minimi per l'edilizia, laddove si consiglia l'utilizzo di una corretta analisi LCC (valutazione dei costi del ciclo di vita), secondo la UNI EN 15643-2021 e la UNI EN 16627-2015, per dimostrare il miglioramento della sostenibilità ambientale ed economica del progetto di fattibilità tecnico-economica.

In relazione a questo per evidenziare come anche la nuova direttiva UE sull'efficientamento energetico degli edifici, la EPBD IV (direttiva casa green), prevede la determinazione dei livelli ottimali, in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (art. 6).

Per come indicato nell'articolo, la Commissione europea, in vista del prossimo recepimento della direttiva da parte degli Stati membri, ha pubblicato il 30 giugno 2025 una serie di documenti operativi che forniscono indicazioni pratiche per l'attuazione delle nuove misure.

Il pacchetto pubblicato dalla Direzione Generale per l'Energia include: il regolamento delegato per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi che fornisce un metodo aggiornato per definire requisiti di prestazione energetica efficaci sotto il profilo economico, considerando le specificità climatiche e tipologiche del patrimonio edilizio di ciascun Paese.

La direttiva suggerisce inoltre agli stati membri di individuare adeguate misure di incentivo economico per supportare migliori prestazioni energetiche, rendendo così positive le analisi LCC, eventualmente risultanti economicamente non convenienti.



Brussels, 30.6.2025
C(2025) 4133 final

COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) .../...

of 30.6.2025

**supplementing Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council
as regards the establishment of a comparative methodology framework for calculating
cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and
building elements**