

5. Installazione di sistemi di isolamento per l'involucro edilizio

di Sofia Agostinelli, Elisa Pennacchia

Le prestazioni energetiche dell'intero organismo edilizio dipendono dall'efficienza dell'involucro chiamato a circoscriverlo. Se le componenti di chiusura (verticali, orizzontali, trasparenti, opache) non sono state progettate e realizzate in maniera consona alle prestazioni energetiche dell'edificio, le dispersioni dei flussi di calore passanti attraverso le stesse ne comprometteranno i consumi energetici finali.

Le azioni termiche che agiscono sull'esterno di un edificio sono combinazioni d'impatti radiativi e convettivi. La componente radiativa consiste nella radiazione solare incidente e nello scambio termico radiativo con l'ambiente esterno. L'impatto termico convettivo è una funzione dello scambio con la temperatura dell'aria circostante, e può essere accelerato dal movimento dell'aria.

Le dispersioni termiche che avvengono sotto forma di calore, dipendono dalla differenza di temperatura tra la facciata interna e esterna dell'involucro stesso e dalla resistenza termica del materiale o combinazione di materiali dei quali è fatto l'involucro.

I materiali componenti l'involucro che separa due ambienti a temperature differenti offrono una resistenza al passaggio del calore che varia in relazione diretta allo spessore del materiale e in relazione inversa alla sua "facilità" a trasmettere il calore (trasmittanza).

Al fine di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, il D.lgs. n. 192/2005²² e s.m.i. impone, in relazione alle diverse zone climatiche nazionali, precisi limiti al valore della trasmittanza termica delle chiusure opache per gli edifici esistenti di superficie utile superiore a 1000 m² soggetti a importanti interventi di ristrutturazione. Successivamente con il D.M. Requisiti minimi del 26/06/2015 vengono introdotti nuovi valori richiesti a partire dal 01 luglio 2015 e dal 01 Gennaio 2021.

Le proprietà termofisiche dei materiali e le resistenze termiche di murature e solai possono essere ricavate dalle norme UNI 10351, UNI 10355, UNI EN 1745 o da dichiarazioni del produttore conformi alle norme di prodotto armonizzate. A tal proposito si riportano i valori limite dei parametri caratteristici degli elementi edilizi negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica (Tab. 3). In particolare, la regione Lazio presenta 4 zone climatiche: dalla C alla F.

²² Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n. 192 in materia di "attuazione della Direttiva 2002/31/CE relativa al rendimento energetico in edilizia

ZONA CLIMATICA	U (W/m ² K) 2015 ²³	U (W/m ² K) 2021 ²⁴
A	0,45	0,40
B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 3. Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione (Tabella 1, appendice B, D.M. 26/06/2015)

Come per le pareti opache, gli scambi di calore che si verificano attraverso una parete trasparente sono espressi tramite la trasmittanza termica (U). La trasmittanza termica del vetro è indicata con U_g (U_{glass}), quella del telaio con U_f (U_{frame}), quella del serramento (vetro e telaio) con U_w (U_{window}). Questa grandezza ha estrema importanza nel calcolo delle dispersioni energetiche invernali quando è elevata la differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'edificio. Il D.M. Requisiti Minimi del 26/06/2015 introduce nuovi valori richiesti anche per le chiusure trasparenti a partire dal 01 Luglio 2015 e dal 01 Gennaio 2021.

ZONA CLIMATICA	U_w (W/m ² K) 2015 ²⁵	U_w (W/m ² K) 2021 ²⁶
A	3,20	3,00
B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Tabella 4. Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione (Tabella 4, appendice B, D.M. Requisiti Minimi del 26/06/2015)

5.1 Chiusure verticali

Si definisce chiusura l'insieme delle unità tecnologiche e degli elementi del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno (UNI 8290-1)²⁷. La separazione serve a ottenere le condizioni necessarie allo svolgimento delle attività umane all'interno dell'edificio attraverso la regolazione dei flussi di materia e di energia. Infatti, i flussi luminosi, termici, sonori e dell'aria attraversano la chiusura in modo tale da rendere lo scambio con l'esterno controllabile. La consistenza fisica e la particolarità della sua posizione nell'edificio determinano la rilevanza morfologica

²³ dal 1° luglio 2015 per tutti gli edifici

²⁴ dal 1° gennaio 2021 per tutti gli edifici

²⁵ dal 1° luglio 2015 per tutti gli edifici

²⁶ dal 1° gennaio 2021 per tutti gli edifici

²⁷ Norma in materia di "Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia"

della chiusura verticale, e influiscono sulla forma dell'edificio e sulle caratteristiche dell'ambiente interno. Le chiusure verticali si distinguono in due classi di elementi tecnici:

- *Chiusure opache*: possono essere portanti, nel caso siano di supporto alle strutture sovrastanti o di tamponamento, nel caso siano costruite successivamente alla realizzazione della struttura portante. I requisiti specifici delle chiusure opache sono: isolare dalle temperature invernali, ovvero ridurre la dispersione del calore, isolare dal calore esterno estivo, impedire fenomeni di condensazione superficiale ed interstiziale e isolare dai rumori.
- *Chiusure trasparenti*: possono chiudere bucatore aperte nelle strutture opache verticali o sostituirsi a esse. Le chiusure trasparenti permettono di illuminare gli spazi interni, di captare l'energia solare in inverno e di porsi in relazione visiva con l'esterno. Tuttavia, le chiusure trasparenti non presentano soltanto aspetti positivi ma espongono gli ambienti interni alla dispersione termica invernale e al surriscaldamento estivo.

Per garantire il benessere delle attività umane all'interno dell'edificio è necessario che le chiusure verticali posseggano determinati requisiti, in particolare in termini di traspirabilità, tenuta all'acqua, isolamento termico e rimozione delle condensazioni superficiali.

In particolare, l'isolamento termico è la capacità della parete di conservare la superficie interna a temperature prossime a quelle dell'aria nell'ambiente, evitando il rischio di condensazioni superficiali e di fenomeni di trasmissione del calore. Tali proprietà sono favorite dalla presenza di strati continui di materiale con buone proprietà di isolamento termico in lastre rigide o materiale sciolto.

5.1.1 Tipologie di chiusure verticali opache

- *Parete monostrato*: costituita da uno solo strato che può avere anche funzione portante oltre a quella di isolamento termico. Si realizza con blocchi semplici, a bassa conduttanza quali quelli in pietra, in laterizio o in conglomerati cementizi. In questa tipologia il contrasto alla trasmissione termica è ripartito uniformemente lungo tutto lo spessore del muro.
- *Parete pluristrato*: l'isolamento termico posto in questo pacchetto murario può essere concentrato in tre collocazioni diverse, ovvero all'interno, all'esterno (isolamento a cappotto) e intermedio (a cassa vuota o a intercapedine). Il posizionamento dell'isolante all'esterno è quello che consente la risoluzione dei ponti termici mentre, quello all'interno della parete consente, oltre all'impiego di materiali isolanti rigidi, anche l'utilizzo di materiali isolanti sciolti come perlite e vermiculite; la parete può anche essere costituita solo dalla intercapedine d'aria non ventilata, naturalmente con una minore efficacia nell'isolamento termico.

- *Parete ventilata*: è un sistema di rivestimento dell'edificio tecnologicamente complesso, che sfrutta ancoraggi di tipo meccanico per fissare alla parete esterna una nuova pelle. Dal punto di vista strutturale è un vero e proprio sistema "a sbalzo" rispetto alle facciate tradizionali; infatti, la struttura metallica portante è fissata al muro dell'edificio mediante staffe ed ancoraggi che consentono l'assemblaggio di strati "indipendenti", come un paramento esterno e un materassino coibente, al fine di creare un'intercapedine d'aria. Il sistema a facciata ventilata è una delle tecnologie di rivestimento esterno degli edifici più efficace per risolvere le problematiche della protezione dall'umidità e dagli agenti atmosferici e dell'isolamento termico e acustico. L'aria che entra nell'intercapedine dal basso verso l'alto infatti crea un efficace flusso aerato che sviluppa le funzioni di traspirazione della facciata ed eliminazione dell'umidità. In estate infatti la facciata ventilata crea un flusso d'aria in movimento fra lastra esterna e pannello isolante, che permette all'aria surriscaldata che si forma nella camera di ventilazione, di essere espulsa alla sommità dell'edificio, diminuendo gli apporti termici dall'esterno e svolgendo anche la funzione di schermatura solare, assorbendo e riflettendo una grande quota di energia solare. Nel periodo invernale, invece, questa ventilazione favorisce la rapida eliminazione del vapore acqueo proveniente dall'interno; in questo modo si riduce sensibilmente il fenomeno della condensa e vengono drasticamente eliminati gli effetti negativi di eventuali penetrazioni di acqua con conseguente riduzione della quantità di calore che esce dall'edificio.

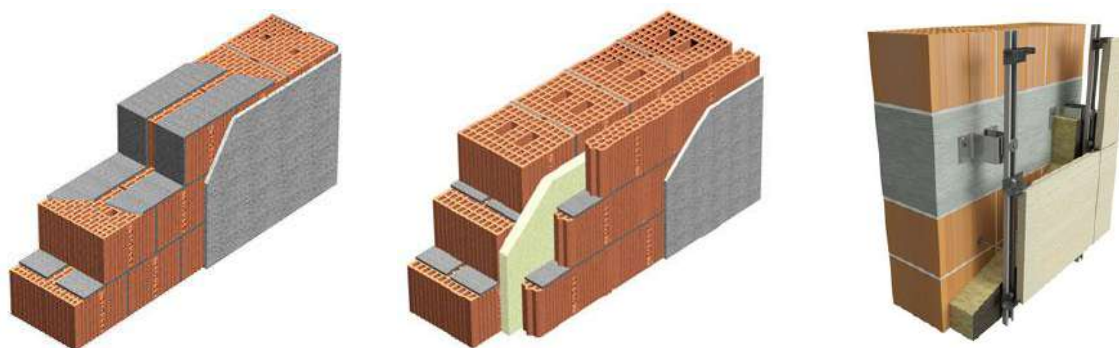


Figura 8. Esempio 1-Parete monostrato (a sinistra); Esempio 2-Parete pluristrato (al centro); Esempio 3-Parete ventilate (a destra)

5.1.2 Tipologie di chiusure verticali trasparenti

Le chiusure verticali trasparenti si distinguono a loro volta per:

- Tipologia di telaio:
 - *Infisso in legno*: grazie al fatto che il legno è di per sé un buon isolante termico e acustico è largamente utilizzato per costruire e realizzare serramenti. Le sue caratteristiche funzionali ed estetiche dipendono dalla qualità del legno utilizzato; può essere verniciato con tecniche differenti, come laccature colorate coprenti, laccature

a poro aperto oppure con l'applicazione di vernici trasparenti. Tale tipologia di telaio, pur essendo estremamente resistente, necessita di una assidua manutenzione a causa dell'esposizione al sole e alle intemperie. Per realizzare questi profili sono da preferire le specie legnose a fibratura diritta e parallela senza nodi o altre discontinuità.

- *Infisso in alluminio*: è generalmente leggero, robusto ed estremamente resistente agli agenti atmosferici, molto utilizzato per realizzare serramenti e persiane. L'alluminio usato può essere in esecuzione anodizzata, ossidata o verniciata a polveri o a sublimazione. L'alluminio in quanto metallo è un conduttore naturale, e quindi tale proprietà rende non particolarmente efficienti infissi in alluminio nell'isolamento termoacustico. Per ovviare a questo inconveniente e garantire buone prestazioni di isolamento, gli infissi in alluminio vengono prodotti con la tecnica del "taglio termico" che differisce dal comune "taglio freddo" per l'inserimento, all'interno delle camere d'aria dei profili, di listelli in materiali a bassa conducibilità termica interrompendo la continuità del metallo e isolando quindi la finestra da dispersioni termiche. Gli infissi in alluminio sono stabili, robusti, molto semplici da pulire e non richiedono particolari accorgimenti o manutenzione;
- *Infisso in acciaio*: detto anche ferro-finestra, e caratterizzato da elevata resistenza meccanica e da un limitato ingombro con una conseguente maggiore luminosità delle aperture. A causa degli elevati coefficienti di dilatazione termica e di conduttività termica, oltre ai costi di produzione e alla richiesta di maggiore manutenzione, vengono impiegati sempre meno;
- *Infisso in PVC*: viene estruso dopo un trattamento a oltre 200 °C, per la finitura viene ricoperto con pellicole dello spessore di circa 200 micron, rendendolo un ottimo isolante termico e acustico, con in più una durabilità molto elevata. È infatti caratterizzato da elevata resistenza al danneggiamento da parte degli agenti atmosferici e anche dalla salsedine marina;
- *Infisso con materiali combinati*: Si tratta di telai che utilizzano una combinazione dei materiali sopra descritti per ottenere risultati migliori sia esteticamente che a livello di isolamento, come ad esempio: legno/alluminio dove il legno è utilizzato per la parte interna del telaio e l'alluminio per la parte esterna; PVC/alluminio infisso in PVC ricoperto da alluminio; PVC/legno dove il legno è utilizzato per la parte interna del telaio e il PVC per la parte esterna; legno/PVC/alluminio, legno all'interno del telaio, struttura in PVC, alluminio come rivestimento esterno. Le aperture dei serramenti possono essere a battente, a ribalta o scorrevoli ma ovviamente la tipologia di apertura riveste solo un'importanza funzionale e potrebbe non influire sul comportamento termico del componente.

- Tecnologia dei vetri:
 - *Infisso a vetro singolo*: composto da un'unica lastra di vetro temperato. Tale soluzione ha una trasmittanza termica altissima e scarse proprietà di isolamento acustico.
 - *Infisso a doppi vetri evacuati*: è composto da almeno due lastre di vetro, nella cui intercapedine è stato praticato il vuoto. Il vantaggio di questa soluzione è di eliminare il trasferimento termico dovuto alla conduzione e alla convezione del gas presente nell'intercapedine. Le prestazioni energetiche diventano molto interessanti se accoppiate all'uso di vetri basso emissivi, con i quali si riduce anche lo scambio di tipo radiativo. Altri due vantaggi tipici delle finestre evacuate sono l'indipendenza delle proprietà isolanti dallo spessore dell'intercapedine, con la possibilità di avere componenti non ingombranti, e l'aspetto della finestra, identico a quello di un vetro camera tradizionale.

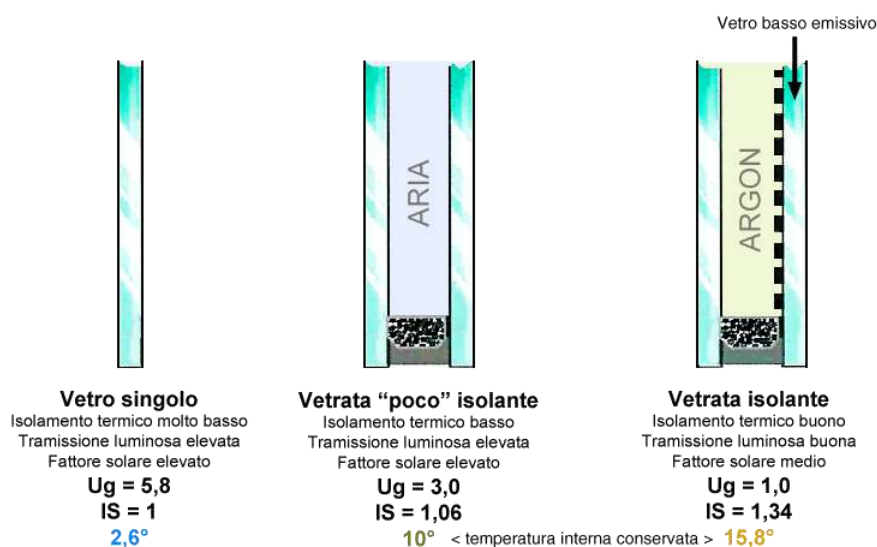


Figura 9. Confronto tipologie di vetro

5.2 Evoluzione della tecnologia delle chiusure verticali

Come detto in premessa il patrimonio immobiliare della Regione Lazio riguarda fabbricati costruiti a partire dagli anni '20 fino al 1990 circa. Quindi un'analisi storica può essere utile per ipotizzare, in base all'epoca di costruzione, quali materiali potremmo trovare nella composizione dell'involucro.

Gli edifici realizzati nel dopoguerra sono tra quelli con maggiori problemi, in quanto in assenza di leggi in materia sono spesso stati realizzati con involucri scadenti e senza strato isolante. Ma lo stesso problema si può rilevare in molti altri edifici realizzati fino all'entrata in vigore, e all'effettivo recepimento della Legge 10/91 sul risparmio energetico. Altri fattori importanti nel processo di conoscenza della composizione dell'involucro sono:

- la tipologia dell'edificio (ad esempio, a seconda che si tratti di edifici isolati, a torre o a schiera ci saranno tecniche costruttive differenti e, quindi, materiali differenti);
- la localizzazione geografica e le tradizioni costruttive locali (un'unità abitativa rurale sarà costituita da materiali differenti rispetto ad un villino cittadino, o ad una casa sul mare).

5.2.1 Chiusure verticali opache

- ANNI '20 – '30:
 - o *Muratura in pietra*: essa rappresenta un tipo di muratura economica assai diffusa nelle opere murali tradizionali. Per la sua realizzazione si necessita di requisiti fisici ben precisi quali la durezza, la lavorabilità, la granulosità e l'affinità con la malta. Inoltre, deve rispondere a caratteristiche chimiche quali la resistenza al gelo e di decomposizione a contatto con l'aria e l'acqua. Fra le qualità di pietre più idonee vi sono i calcari e molte qualità di tufi. La costruzione della muratura procede a strati orizzontali concatenando le pietre fra loro, disponendo alternativamente una pietra trasversale dopo due pietre poste longitudinalmente e sfalsando con cura tra un ricorso e l'altro i giunti verticali. Gli spazi vuoti che potranno formarsi tra le pietre dovranno essere riempiti con altre più piccole o colmando con la malta tutti gli interstizi. A seconda della forma più o meno regolare del materiale potranno ottenersi vari tipi di paramenti, con conci uguali o disuguali, con superficie esterna liscia o ruvida. Inoltre, alcuni elementi possono essere realizzati attraverso cordoli di cemento o mattoni ottenendo così una muratura mista o listata. Nella stratigrafia della muratura sono utilizzate all'esterno rocce eruttive quali graniti, porfidi e basalti la cui inalterabilità è proporzionale alla durezza e conservano le loro caratteristiche per un tempo indefinito. Storicamente in Italia le pareti perimetrali degli edifici erano realizzate in muratura portante, costituita da blocchi di pietra. La parete così realizzata aveva generalmente un forte spessore, quindi una massa termica. Inoltre, tale metodo costruttivo fu a lungo utilizzato nelle zone rurali.
 - o *Muratura a sacco con ricorso di mattoni*: è un tipo di muratura che si ritrova usata di frequente per la costruzione di edifici storici e opere difensive, consistente in due paramenti (muri) realizzati in pietra o mattoni paralleli e distanziati fra loro (aventi la funzione di cassero di contenimento e finitura superficiale), riempiti all'interno con una miscela di pietrisco e avanzi di lavorazione dei paramenti, legati da malta di cemento o di calce. Il nome deriva dal fatto che i due muri costituiscono una specie di sacco nel quale viene versato il riempimento. In tale tipologia muraria i mattoni pieni vengono utilizzati a rinforzo della stessa sia tramite ricorsi verticali che sugli angoli del manufatto. Tale tipologia muraria si riscontra in particolare nei fabbricati storici dei primi anni del '900 in cui il compito di sostenere i vari piani era assegnato,

appunto, alle murature perimetrali e ad alcuni muri interni degli edifici, soprattutto se questi erano di grandi dimensioni. Per sostenere il peso, le murature dovevano essere realizzate con spessori notevoli. Lo spessore della muratura costituisce la massa termica che si oppone al passaggio del calore tra interno ed esterno e viceversa: è per questo che gli edifici in muratura portante sono abbastanza caldi in inverno e freschi in estate.

- ANNI '30 – '50:

- *Muratura in mattoni pieni*: sono il tipo di muratura più diffuso e più antico e allo stesso tempo costituiscono elemento strutturale e rifinitura dell'edificio. Nel disporre i mattoni nei vari filari bisogna procedere avendo cura di mettere la maggior parte degli elementi di punta cioè con il lato più lungo normale alla parete esterna. Così lo spessore di una struttura laterizia risulterà sempre un multiplo del lato minore del mattone, cioè della testa. I muri si chiameranno di conseguenza ad una testa, 2, 3 ecc. che corrispondono agli spessori. Le pareti realizzate con tale sistema costruttivo solitamente hanno funzione portante grazie alla sua elevata resistenza a compressione. Tale tipologia costruttiva era un'operazione lunga e costosa, e perciò riservata per lo più agli edifici di pregio.

- ANNI '50 - '60:

- *Muratura in laterizi forati*: solitamente costituiscono murature di tamponamento ma possono essere usati come sistema portante (in questo caso svolgono la stessa funzione dei blocchi di pietra, solo per edifici di modeste dimensioni). Esse quindi vengono utilizzate a chiusura di pilastri in calcestruzzo armato. Tale tipologia di muratura è quella che possiede migliori requisiti in termini di leggerezza coibenza e afonicità. Il laterizio, infatti, è un materiale con ottime prestazioni termoisolanti. Nel caso di murature portanti in laterizio di forte spessore (40-50 cm) potrebbe non essere necessario lo strato di isolamento termico, poiché l'elevato spessore del laterizio funziona da massa termica. L'isolamento risulta invece necessario se le pareti in laterizio sono di spessore minore, nel caso in cui, ad esempio, il laterizio non ha funzione portante ma è usato come elemento di tamponamento.

- ANNI '60 - '70:

- *Muratura con forati in cemento precompresso*: la produzione industriale ha permesso una grande evoluzione dei prodotti nel tempo. I blocchi in calcestruzzo, rispetto ai mattoni in laterizio possiedono dei vantaggi legati alle loro maggiori dimensioni che di conseguenza comportano tempi ridotti di posa e costi complessivi minori. Inoltre, hanno una ottima resistenza meccanica a compressione. I blocchi in calcestruzzo vibro-compresso possono essere portanti o non portanti, ciò dipende dal rapporto di foratura. Generalmente l'aumento della capacità portante va a discapito soprattutto della leggerezza e in secondo luogo dell'isolamento termico, questo a causa della maggior compattezza e omogeneità del calcestruzzo. Grazie all'elevata resistenza di

questi manufatti sono state realizzate grandi murature con rapporti di snellezza sempre maggiori, rispondendo alla sempre maggiore richiesta di realizzazioni come per esempio quelle legate alla grande distribuzione.

- *Muratura a cassetta con laterizi forati*: L'intercapedine all'epoca costituiva una forma rudimentale di isolamento termico. In effetti laddove ci sono spessori di vuoto limitati (2-3 cm) l'aria contenuta nell'intercapedine costituiva una sorta di isolante tra interno ed esterno. Nella realtà poi e soprattutto laddove abbiamo spessori importanti di intercapedine (superiore a 5-6 cm fino ad arrivare a 30 e oltre) all'interno del muro si creano dei veri e propri moti convettivi (vera e propria corrente d'aria) che determinano una notevole dispersione termica. La principale soluzione tecnica prevede paramento esterno ed interno in blocchi di laterizio o cls alleggerito, paramento interno a blocchi ed esterno in mattoni faccia vista, paramento interno in calcestruzzo armato ed esterno in laterizio. Ad ogni modo le soluzioni tecniche più efficaci prevedono un paramento interno con massa maggiore rispetto a quello esterno, per un maggiore accumulo termico dello strato interno e una più efficace permeabilità al vapore dello strato esterno.

- ANNI '70 - '90:

- *Muratura a cassetta con isolamento all'intercapedine*: questa tipologia prevede l'inserimento di materiale isolante per ridurre i carichi estivi e disperdere quelli invernali. Il materiale coibente inserito tra i due paramenti richiede, in caso di assenza della camera d'aria, il posizionamento di una barriera al vapore per garantire una parete interna asciutta. In caso di zone umide e particolarmente fredde è invece necessaria la realizzazione della camera d'aria. Il sistema murario composto con isolamento termico in intercapedine è, in Italia a tutt'oggi, la tipologia più diffusa di realizzazione delle chiusure d'ambito esterno. Tale sistema si compone solitamente di due pareti dello stesso o di diverso materiale, di differenti dimensioni, separate dalla camera d'aria e in cui la parete esterna viene realizzata con elementi di maggior spessore e densità. L'isolamento in intercapedine eseguito con i prodotti in lana di roccia o di vetro, di sufficiente spessore, che sono in grado di assicurare un ottimo isolamento termico e acustico oltre che un elevato comfort igrometrico.

5.2.2 Chiusure verticali trasparenti

- ANNI '20 – '60:

- *Infisso in legno a vetro singolo*: essendo il legno un buon isolante termico e acustico è stato largamente utilizzato per costruire e realizzare serramenti. Pertanto, ad oggi, in Italia è possibile riscontrare numerosi infissi con telaio in legno che venivano opportunamente laccati per aumentare la loro resistenza

alle intemperie. Al centro del telaio veniva poi incastonata un'unica lastra di vetro temperato. Tale soluzione, però, ha una trasmittanza termica altissima e scarse proprietà di isolamento termo-acustico.

- ANNI '70 – '90:
 - o *Infisso in alluminio a taglio freddo*: la continuità di materiale tra la superficie esterna e quella interna determinano un effetto ponte termico più accentuato, data dall'alta conducibilità termica del materiale, che incide notevolmente sul riscaldamento o il raffreddamento degli ambienti. Gli infissi a taglio freddo sono composti di un materiale che non ha interruzioni termiche, è passante dall'esterno all'interno. Non sarebbe corretto chiamarlo "taglio freddo" proprio perché non c'è nessun taglio, ma per comodità per fare distinzione dal taglio termico viene spesso chiamato "taglio freddo". Sono considerati a taglio freddo i vecchi infissi in alluminio, quelli che in inverno portavano dentro casa il freddo che era fuori. Anche i vecchi serramenti in acciaio (comunemente chiamato ferro) sono infissi a taglio freddo e hanno gli stessi problemi dell'alluminio.
 - o *Infisso in legno a doppio vetro*: per non rinunciare al pregio estetico degli infissi in legno alla fine degli anni '70 si iniziò a studiare un metodo per il loro efficientamento. La soluzione fu quella di realizzare i telai come si faceva negli anni precedenti ma sostituendo al centro degli stessi il cosiddetto doppio vetro o vetrocamera composto da un vetro esterno, un'intercapedine chiamata camera e il vetro interno. Tale tecnologia in una fase iniziale andò a migliorare leggermente la resistenza termica degli infissi in legno.

5.3 Strategie di intervento

In linea generale per poter efficientare l'involucro di un edificio esistente è bene capire dove e come isolarlo effettuando una diagnosi energetica, o audit energetico, dell'edificio oggetto dell'intervento. Lo scopo di quest'ultima è di individuare possibili soluzioni tecniche ideali in termini di costi/benefici che possano ottimizzare l'efficienza energetica, limitando i consumi di energia e rendendo economicamente interessanti i tempi di ammortamento dell'investimento. L'involucro, fondamentale sottosistema dell'organismo edilizio, viene classificato in tre tipologie:

- caldo;
- freddo;
- isolato internamente.

Alla prima categoria appartengono tutte le stratigrafie verticali e orizzontali, in cui la struttura è ricoperta da uno strato isolante più esterno, in assenza di ventilazione; fanno parte di questa tipologia: il sistema a cappotto non ventilato esterno sulle pareti verticali, le coperture isolate discontinue non ventilate, le coperture continue non ventilate isolate a tetto caldo e a tetto rovescio e le intercapedini contenenti aria o materiale isolante. Alla categoria di

involucro freddo appartengono quelle stratigrafie in cui la parte strutturale prevede uno strato coibente che ha una camera di ventilazione a contatto con il suo estradosso; di questa categoria fanno parte le facciate a cappotto ventilato, le coperture discontinue isolate ventilate e quelle continue a tetto freddo. Alla terza categoria appartengono le stratigrafie che prevedono la presenza di materiale isolante all'interno della struttura portante.

Categoria di intervento	Tipologia di intervento
Isolamento termico sulla superficie interna della parete	Cappotto a contatto
	Cappotto su struttura di supporto
Isolamento termico sulla superficie esterna della parete	Véture
	A cappotto
Isolamento termico all'interno dell'intercapedine (parete a cassetta)	Soluzioni tecniche realizzate in opera
	Paramento interno in calcestruzzo armato ed esterno in laterizio
	Paramento interno ed esterno in blocchi di laterizio o di cls alleggerito
	Paramento interno in blocchi di laterizio o di cls alleggerito ed esterno in mattoni faccia a vista
	Soluzioni tecniche semi prefabbricate
	Soluzioni tecniche prefabbricate
	Paramento interno in calcestruzzo armato ed esterno in pannelli leggeri
	Paramento interno di blocchi di laterizio ed esterno in pannelli di cls armato
	Pannello prefabbricato in cls armato con paramento esterno in laterizio alleggerito
	Pannello prefabbricato in cls armato di tipo sandwich

Tabella 5. Principali tipologie di interventi per efficientamento dell'involucro opaco

5.3.1 Soluzioni per efficientare la parete perimetrale verticale opaca

L'isolamento termico della parete perimetrale verticale opaca dell'involucro edilizio può essere realizzato posizionando il materiale isolante sul lato interno o esterno della parete oppure in una apposita intercapedine realizzata all'interno della muratura.

Isolamento termico sulla superficie interna della parete

Per isolare una parete dall'interno si possono impiegare due tecniche: il cappotto a contatto e il cappotto su struttura. Nel primo caso si utilizzano delle lastre prefabbricate composte da materiale coibente rigido, come ad esempio lana di roccia, schiuma poliuretana o polistirene espanso, e da uno strato di cartongesso; tali pannelli vengono fissati alla parete tramite tamponi adesivi a base di gesso o tasselli di ancoraggio presenti direttamente sullo

strato resistente. La seconda soluzione prevede l'impiego di una sottostruttura in alluminio o legno all'interno della quale vengono posizionati i pannelli coibenti. Per migliorare le prestazioni termiche di questo sistema ed aumentare la protezione contro l'umidità è possibile realizzare una camera d'aria tra il materiale isolante ed uno o due pannelli di cartongesso o legno. Questa tecnica viene utilizzata con spessori maggiori di isolante e consente il passaggio delle reti elettriche, idrico-sanitarie, di riscaldamento. In presenza di forti escursioni termiche è bene scegliere un isolante idrofugo come lana di roccia, polistirene estruso o fibra di legno, nonché la predisposizione di una barriera al vapore. La finitura consiste nella rasatura e tinteggiatura.

ISOLAMENTO INTERNO	
VANTAGGI	CRITICITÀ
Adatto su un edificio di pregio o con facciata vincolata;	I ponti termici non vengono eliminati in facciata;
Incide sensibilmente la capacità di accumulazione termica della parete.	Possibili rischi di condensazione interstiziale in zone fredde ed umide;
Realizzabile anche in fase di ristrutturazione edilizia con costi contenuti senza gli oneri aggiuntivi necessari per la realizzazione di ponteggi esterni.	Si riduce la superficie utile degli ambienti.

Tabella 6. Vantaggi e criticità dell'isolamento termico sulla superficie interna della parete

Isolamento termico all'interno dell'intercapedine (parete a cassetta)

La parete isolata nell'intercapedine, detta anche "a cassetta", può essere realizzata tramite inserimento di materiale isolante o attraverso la creazione di una camera d'aria per ridurre i carichi estivi e disperdere quelli invernali. Le principali soluzioni tecniche sono:

- realizzate in opera (paramento esterno ed interno in blocchi di laterizio o cls alleggerito, paramento interno a blocchi ed esterno in mattoni faccia vista, paramento interno in calcestruzzo armato ed esterno in laterizio);
- semi prefabbricate (paramento interno di blocchi in laterizio ed esterno in pannelli di cls armato, paramento interno in cls armato ed esterno in pannelli leggeri);
- prefabbricate (pannello prefabbricato in cls armato con paramento esterno in calcestruzzo alleggerito, pannello prefabbricato in cls armato di tipo sandwich).

Le soluzioni tecniche più efficaci prevedono un paramento interno con massa maggiore rispetto a quello esterno, per un maggiore accumulo termico dello strato interno e una più efficace permeabilità al vapore dello strato esterno. Dal punto di vista realizzativo è caratterizzato da sistemi di collegamento meno complessi tra struttura interna ed esterna. In questo caso vengono impiegati generalmente pareti in calcestruzzo prefabbricate o gettate in opera o blocchi semipieni in laterizio o cls per realizzare lo strato resistente interno, mentre mattoni faccia vista o in pannelli leggeri o elementi in cls alleggerito ecc., per lo strato esterno. Il materiale coibente inserito tra i due paramenti richiede, in caso di assenza della

camera d'aria, il posizionamento di una barriera al vapore per garantire una parete interna asciutta. In caso di zone umide e particolarmente fredde è invece necessaria la realizzazione della camera d'aria. Il collegamento dei paramenti murari avviene tramite la realizzazione di marcapiani in calcestruzzo o sistemi di appoggio in acciaio fissati al solaio. La prefabbricazione consente di ridurre molto le tempistiche di realizzazione attraverso l'impiego di pareti perimetrali in calcestruzzo armato prefabbricate di tipo sandwich, con funzione anche di struttura portante; il pannello è costituito da uno strato portante interno, uno di protezione superficiale in calcestruzzo alleggerito e uno strato isolante solitamente in polistirene ad alta densità. Un'ulteriore soluzione intermedia è costituita da pannelli prefabbricati in cls di tipo monostrato per realizzare il paramento esterno mentre gli strati di isolamento e di paramento esterno possono essere completati in opera.

ISOLAMENTO ALL'INTERNO DELL'INTERCAPEDINE	
VANTAGGI	CRITICITÀ
Aumenta l'inerzia termica della parete	I ponti termici non vengono eliminati;
	Può comportare problemi di tipo statico e la predisposizione di idonei sistemi di collegamento tra gli strati;
	Realizzabile principalmente durante la costruzione dell'edificio o in fase successiva tramite insufflaggio.

Tabella 7. Vantaggi e criticità dell'isolamento all'interno dell'intercapedine

Isolamento termico sulla superficie esterna della parete

La parete isolata dall'esterno viene generalmente adottata per efficientare gli edifici esistenti, riducendo i consumi energetici ed eliminando eventuali ponti termici. Anche in questo caso si predilige l'impiego di pannelli coibenti rigidi per resistere alle sollecitazioni meccaniche indotte dagli agenti atmosferici che possono provocare dilatazioni termiche; per ridurre questo rischio è bene scegliere determinate soluzioni tecniche tra cui:

- un materiale a basso coefficiente di dilatazione termica;
- giunti di dilatazione e dispositivi di ripartizione dei carichi;
- fissaggio meccanico dell'isolante alla struttura con tasselli o profili meccanici a sviluppo orizzontale;
- impiego di uno strato di regolarizzazione e barriera al vapore tra isolante e parete;
- applicazione di una rete esterna di armatura che con il primo strato di intonaco regolarizza eventuali discontinuità tra i pannelli isolanti;
- realizzazione di uno strato di collegamento con malta cementizia a supporto dell'armatura porta intonaco.

Lo strato di protezione esterna può essere realizzato attraverso due soluzioni tecniche: mediante un intonaco su più strati di rivestimento seguiti da finitura o con pannelli isolanti già accoppiati ad elementi di protezione. Nel primo caso (sistema a cappotto) si procede con la stesura di strati sottili a base cementizia con spessore variabile tra i 2 e i 5 mm:

- primo strato a base cementizia, inerti ed aggreganti in resina posato sul pannello isolante;
- secondo strato posato con l'inserimento di una rete di ripartizione dei carichi in fibra di vetro;
- terzo strato di finitura con malta a base resinosa con pigmenti colorati direttamente in pasta.

Un'ulteriore soluzione prevede la realizzazione di uno strato unico di intonaco di circa 1,5-2 cm, posato a spruzzo su una rete di armatura in fibra di vetro o metallica collegata con giunti metallici direttamente allo strato sottostante, con finitura costituita da un sottile strato di intonaco plastico. La seconda tecnica, detta anche "véture", consiste nell'impiego di pannelli coibenti, spesso in polistirene ad alta densità, con spessore variabile da 3 a 12 cm e con uno strato di protezione sovrapposto; essi vengono applicati a parete mediante giunzioni metalliche o in PVC. Il rivestimento per la finitura può essere realizzato con diversi materiali:

- lamiera in acciaio inox o smaltato o plastificato, alluminio, rame o zinco-titanio;
- intonaco armato;
- lastre in cemento fibrorinforzato o in materiale lapideo;
- elementi in poliestere armato o PVC.

Qualora fossero scelte finiture metalliche o plastiche è necessario impiegare elementi microventilati per evitare fenomeni di condensa interstiziale.

CAPPOTTO ESTERNO	
VANTAGGI	CRITICITÀ
Eliminazione dei ponti termici e della conseguente formazione di condensa, muffe e macchie;	Costi più elevati a causa della necessità di un ponteggio all'esterno degli edifici; Irrealizzabile in caso di edifici storici vincolati.
I muri svolgono la funzione di volano termico, accumulando calore e cedendolo lentamente, riducendo quindi le ore di funzionamento dell'impianto di riscaldamento e migliorando l'inerzia termica anche nelle stagioni più calde e soleggiate;	
Si riducono i movimenti interstrutturali degli edifici evitando così il generarsi di fessurazioni;	
Soluzione realizzabile anche in fase di ristrutturazione edilizia.	

Tabella 8. Vantaggi e criticità dell'isolamento esterno (a cappotto)

Dall'analisi fin ora effettuata pertanto è emerso che la strategia di intervento va valutata sulla base della tipologia dell'edificio nonché della muratura che muta sia per ragioni temporali che geografiche.

Abaco delle soluzioni consigliate per le pareti opache in clima mediterraneo

Riducendo il campo di applicazione alla sola regione Lazio, dagli anni '20 agli anni '90, si sono evidenziate sette principali tipologie murarie:

- Muratura in pietra;
- Muratura a sacco con ricorso di mattoni;
- Muratura in mattoni pieni;
- Muratura in laterizi forati;
- Muratura con forati in cemento precompresso;
- Muratura a cassetta con laterizi forati;
- Muratura a cassetta con isolamento all'intercapedine.

Le strategie di intervento per l'efficientamento dell'involucro opaco possono essere sintetizzate in isolamento all'interno, insufflaggio nell'intercapedine e isolamento a capotto. Le modalità operative di intervento pertanto si definiscono in base alla tipologia muraria e a quella del fabbricato oggetto di intervento, mentre si riporta di seguito una tabella dei materiali utilizzabili che sono stati individuati per economicità e sostenibilità.

MATERIALE	CONDUCIBILITÀ TERMICA λ [W/(m ² K)]	RICICLATO / RICICLABILE	ISOLAMENTO INTERNO	INSUFFLAGGIO	CAPPOTTO ESTERNO
Polistirene espanso sinterizzato	0,035	✓	✓		✓
Fibra 100% poliestere	0,034	✓			✓
Vetro granulare espanso	0,040	✓	✓		✓
Pannello in fibra di lino	0,040	✓	✓		✓
Fibra di cellulosa	0,039	✓		✓	
Fibra di mais	0,036	✓	✓		
Fibre di kenaf e canapa	0,037	✓	✓		✓
Lana di pecora	0,039		✓		✓
Lana di roccia	0,040	✓	✓		✓
Schiuma di poliuretano espanso	0,025			✓	

Tabella 9. Caratteristiche dei materiali utilizzabili per l'efficientamento dell'involucro

Per le schede tecniche relative ai materiali contenenti caratteristiche e indicazioni per una corretta pratica si rimanda all'Allegato A del presente documento.

- *Muratura in pietra*: come precedentemente analizzato essa rappresenta un tipo di muratura economica assai diffusa. Tale tipologia muraria ha una tradizione molto lunga sia in Italia che nel Lazio, infatti, la maggior parte delle pareti perimetrali degli edifici fino agli anni '30 erano realizzate in muratura portante, costituita da blocchi di pietra di varia natura. La parete così realizzata aveva generalmente un grande spessore, superiore ai 40 cm. Inoltre, tale metodo costruttivo, data la sua economicità e facilità di posa in opera, ha continuato ad essere la tipologia più utilizzata nelle zone rurali fino agli anni '80 - '90, in particolare nella realizzazione di fabbricati di modeste dimensioni sia come muratura portante che come tamponamento a strutture in cemento armato. A seconda del tipo di pietra utilizzata la trasmittanza totale U oscilla dai 2,70 W/(m²K) del pietrame ai 1,39 W/(m²K) del tufo. Inoltre, tali valori variano in base allo spessore della muratura stessa. Quindi, in fase di intervento, sulla base di quanto detto, si sceglierà lo spessore del materiale isolante tenendo conto della trasmittanza di partenza. Al fine di rientrare nelle prescrizioni della trasmittanza di legge è evidente che l'isolante avrà uno spessore significativo di circa 8-9 cm. Data, inoltre, la tipologia di fabbricato sul quale si andrà ad intervenire, qualora si riscontrasse un eventuale pregio storico artistico, si prediligerà l'isolamento all'interno rispetto a quello esterno. Si ricorda, che nonostante il sovrapprezzo per l'utilizzo di ponteggio, in caso di isolamento esterno, quello interno non è in grado di correggere i ponti termici e necessita dell'applicazione di barriera al vapore per evitare la formazione di umidità e conseguenti muffe.

- *Muratura a sacco con ricorso di mattoni*: tale tipologia muraria venne utilizzata in particolare nei fabbricati storici di grandi dimensioni, dei primi anni del '900, le cui murature avevano il compito di sostenere i vari piani. Per sopportare tale peso, le murature dovevano essere realizzate con spessori maggiori di 40 cm. Lo spessore della muratura costituisce la massa termica che si oppone al passaggio del calore tra interno ed esterno, pertanto questa tipologia di edifici in muratura portante risulta abbastanza calda in inverno e fresca in estate con una trasmittanza U che oscilla tra gli 1,24 W/(m²K) ai 0,98 W/(m²K) a seconda del materiale utilizzato per i paramenti. La parete, infatti, è costituita da due paramenti (muri) realizzati in pietra di diversa natura o mattoni paralleli e distanziati fra loro (aventi la funzione di cassero di contenimento e finitura superficiale), riempiti all'interno con una miscela di pietrisco e avanzi di lavorazione dei paramenti, legati da malta di cemento o di calce. Per intervenire su tale tipologia muraria è preferibile l'isolamento interno, nonostante le problematiche suddette, poiché la maggior parte degli edifici su cui si riscontra tale tipologia muraria sono fabbricati di interesse storico di grande dimensione e che nella maggior parte dei casi presentano anche vincoli esterni.

- *Muratura in mattoni pieni*: una delle murature più antiche, è costituita tramite sovrapposizione di elementi; in questo modo lo spessore di una struttura laterizia risulterà sempre un multiplo del lato minore del mattone, cioè della testa. I muri si chiameranno di conseguenza ad una testa, 2, 3 ecc. che corrispondono agli spessori. Le pareti realizzate con tale sistema costruttivo solitamente hanno funzione portante grazie alla sua elevata resistenza a compressione. Generalmente la trasmittanza di tali pareti varia tra gli 1,41 W/(m²K) ai 1,24 W/(m²K). Per efficientare tale tipologia muraria

si dovrà agire tramite l'installazione di pannelli isolanti all'interno o all'esterno della muratura, tenendo conto del pregio e delle rifiniture della stessa.

- *Muratura in laterizi forati e muratura in forati di cemento precompresso*: solitamente costituiscono murature di tamponamento ma possono essere usate come sistema portante. Nella maggior parte dei casi vengono utilizzate a tamponamento di pilastri in calcestruzzo armato. Tali tipologie murarie possono essere assimilabili, infatti possiedono i migliori requisiti in termini di coibenza ed hanno una trasmittanza U compresa tra 1,19 W/(m²K) e 0,90 W/(m²K) in base al grado di foratura dei blocchi. La sostanziale differenza tra le due tipologie consiste nelle maggiori dimensioni dei blocchi in cemento che di conseguenza comportano tempi ridotti di posa e costi complessivi minori. Inoltre, questi ultimi hanno un'ottima resistenza meccanica a compressione. Generalmente l'aumento della capacità portante va a discapito dell'isolamento termico, questo a causa della maggior compattezza e omogeneità del calcestruzzo. Ad ogni modo, per efficientare tali tipologie murarie, sono sufficienti pannelli isolanti di circa 5 – 8 cm di spessore. In questo caso le modalità operative che si possono reputare valide sono l'isolamento a cappotto e quello interno tenendo conto di tutte le accortezze del caso.
- *Muratura a cassetta con laterizi forati*: l'intercapedine costituisce la prima forma rudimentale di isolamento termico. In effetti, con spessori di vuoto limitati (2-3 cm), l'aria contenuta nell'intercapedine costituisce una sorta di isolante tra interno ed esterno, mentre con spessori importanti di intercapedine (superiore a 5-6 cm) all'interno del muro si creano dei veri e propri moti convettivi che determinano una notevole dispersione termica. Tale pacchetto murario ha una trasmittanza U di circa 0,87 W/(m²K). La migliore soluzione tecnica prevede l'insufflaggio di materiale isolante all'interno dell'intercapedine, infatti, in questo modo si evita di creare ulteriori spessori nonché di dover intonacare grandi superfici. In questo caso è importante la scelta di un materiale con elevate proprietà coibenti.
- *Muratura a cassetta con isolamento all'intercapedine*: questa tipologia prevede l'inserimento di materiale isolante per ridurre i carichi estivi e disperdere quelli invernali. Il materiale coibente inserito tra i due paramenti può essere in lana di roccia o di vetro. In alcuni casi, se di sufficiente spessore, l'isolamento assicura una trasmittanza U di circa 0,36 W/(m²K). Pertanto, al fine di rientrare nelle prescrizioni della trasmittanza di legge è evidente che sarà sufficiente il montaggio di un pannello isolante dello spessore di soli circa 1-2 cm.

5.3.2 Soluzioni per efficientare l'involucro trasparente

Nell'ambito dell'efficientamento dell'involucro edilizio vengono presi in considerazione solo i serramenti esterni, ovviamente, che contribuiscono in maniera considerevole alla determinazione dei carichi termici invernali e soprattutto estivi. Solitamente dovendo l'infilso esterno permettere, tra le altre cose, il passaggio di luce naturale verso gli ambienti interni,

esso è realizzato montando un componente vetrato su un telaio di supporto. Avendo quindi già descritto le tipologie e le proprietà termofisiche dei componenti vetrati, di seguito i serramenti verranno descritti e classificati esclusivamente in funzione delle tipologie di telaio. I componenti trasparenti contribuiscono in modo significativo al bilancio energetico dell'edificio, sia con riferimento al periodo del raffrescamento estivo sia di quello del riscaldamento. Lo scopo di garantire il comfort indoor richiede un'analisi di aspetti diversi e alle volte tra loro contrastanti: se da un lato ampie finestrate consentono un'elevata illuminazione naturale degli ambienti, dall'altro obbligano a trovare soluzioni per ridurre il notevole carico termico che l'irraggiamento solare produce, i fenomeni di abbagliamento ed il conseguente discomfort locale. Il posizionamento e il dimensionamento delle aperture svolgono un ruolo fondamentale per la riduzione delle dispersioni termiche e variano a seconda della zona climatica. I benefici relativi a una buona progettazione dell'illuminazione naturale sono numerosi e riguardano:

- l'aumento della produttività in ambito lavorativo, in quanto la luce naturale crea ambienti più sani, più efficienti e più creativi;
- la riduzione dei carichi prodotti dalla luce artificiale con un conseguente risparmio economico, in quanto l'utilizzo della luce artificiale comporta da un 20% a un 25% del consumo di energia elettrica di un edificio;
- la diminuzione dei carichi termici, in quanto lo spettro solare si sviluppa maggiormente nel campo del visibile come energia luminosa rispetto alla zona dell'infrarosso associata all'emissione di calore;
- la restrizione dei carichi elettrici di picco soprattutto nel periodo estivo;

- il miglioramento delle condizioni di comfort poiché alcuni studi dimostrano come la variabilità della luce naturale durante l'arco di un giorno costituisce uno stimolo positivo sia dal punto di vista psicologico che biologico per l'essere umano;
- l'ottimizzazione della qualità delle prestazioni visive in quanto la luce naturale rappresenta la migliore sorgente di luce per la visione, sia in termini di qualità per la resa cromatica e le temperature colore, che in termini di quantità per i livelli di illuminamento.
- Un'adeguata progettazione dell'illuminazione naturale richiede la valutazione del parametro del fattore medio di luce diurna (FLDM), ovvero il rapporto fra il livello di illuminamento in un punto posto su un piano orizzontale all'interno del locale (E_{int}) e il livello di illuminamento in un punto posto su di un piano orizzontale sotto l'intero emisfero celeste in assenza di ostruzioni e di irraggiamento solare diretto (E_0) con misure fatte nello stesso momento.

Alcune condizioni necessarie ma non sufficienti per il soddisfacimento del requisito riguardano:

- il rapporto di illuminazione;
- il coefficiente di trasparenza delle superfici vetrate;
- la profondità dell'ambiente illuminato.

Molto spesso l'involucro trasparente, in termini di dispersioni, è il punto debole di un fabbricato, con vetrate composte da vetri singoli e infissi ormai deteriorati. Di conseguenza essi sono la causa di elevate dispersioni termiche in inverno ed eccessivi accumuli di calore in estate. Avere delle finestre performanti può giovare anche agli abitanti stessi dell'edificio, poiché permettono il contatto visivo con l'esterno, l'apporto di luce naturale, la protezione dagli agenti atmosferici e dai rumori esterni. Una riqualificazione energetica prevede di intervenire sulle performance di vetri e telai, riducendo gli apporti solari in eccesso, regolando la permeabilità all'aria - eliminando gli spifferi indesiderati, ma senza trascurare la necessità di un ricambio d'aria adeguato - e riducendo le dispersioni termiche. Le possibilità di intervento sull'involucro trasparente esistente può migliorare notevolmente l'efficienza energetica di un edificio e si può andare dalla totale sostituzione del serramento al rifacimento di alcune singole parti di esso. Di seguito vengono riportate le principali strade percorribili per efficientare l'involucro trasparente.

Inserimento di pellicole basso emissive: questo intervento è particolarmente indicato nel caso in cui gli infissi siano in buone condizioni, vi sia un doppio vetro e nessun problema di infiltrazione d'aria. L'inserimento di queste pellicole permette di migliorare le prestazioni termiche del vetro, che riflette verso l'interno la radiazione a onde lunghe, limitando la dissipazione di calore. Allo stesso tempo durante la stagione estiva gran parte della radiazione solare viene riflessa e tenuta all'esterno, garantendo un buon microclima interno.

Sigillare le infiltrazioni: anche in questo caso, l'intervento trova ragion d'essere nel momento in cui gli infissi siano in buone condizioni e le vetrocamere abbiano prestazioni accettabili. Le capacità di tenuta all'aria delle finestre degli edifici esistenti generalmente decadono con il passare del tempo, incidendo sulle prestazioni globali dell'edificio e, soprattutto, sul comfort interno degli ambienti. Sigillare le infiltrazioni significa ricorrere ad un materiale che può essere silicone, poliuretano o polifosforo a seconda della compatibilità chimica con altri materiali presenti che permette di migliorare la situazione anche del 90% con un intervento veloce ed economico. Inoltre, per risolvere il problema delle infiltrazioni è possibile decidere di inserire delle guarnizioni. Un infisso deve resistere al vento e impedire che vi siano spifferi indesiderati, ma allo stesso tempo permettere un certo grado di permeabilità per evitare fenomeni spiacevoli come la condensa. Per capire su quali infissi e come è opportuno intervenire è possibile ricorrere ad apposite indagini visive e strumentali, come ad esempio il Blower Door Test²⁸.

Inserimento di una doppia finestra: nel caso sia necessario un intervento più incisivo, ma non è possibile intervenire sulla finestra esistente se ne valuta l'inserimento di una seconda più performante. Questo intervento è indicato, ad esempio, in tutti quegli edifici in cui non è possibile modificare l'estetica della facciata e l'infisso originale non possa essere sostituito. Allo stesso modo risulta efficace in un clima rigido, in cui una doppia protezione può solo giovare al comfort interno. L'inserimento di una doppia finestra è da valutare in base allo spazio disponibile e alle prestazioni del serramento esistente. Il risparmio di energia può

²⁸ Sistema per la verifica della permeabilità dell'aria negli edifici.

arrivare anche al 20% e si possono scegliere infissi di diverso materiale e vetri di diversa tipologia, in base alle prestazioni ottenibili dalla combinazione con l'esistente.

Inserimento di un secondo vetro: come per l'inserimento di una doppia finestra, questa operazione può essere utile quando non si ha la libertà di apportare significative modifiche estetiche all'edificio. Se il serramento è composto da un vetro singolo, ma è in buone condizioni e c'è lo spazio sufficiente, è possibile inserire un controvetro, sostenuto dall'infisso esistente. In questo modo aumenta l'isolamento termico della finestra e si riducono anche le dispersioni d'aria. I fattori da considerare sono la capacità dell'infisso esistente di reggere il peso di un nuovo elemento, la quantità di luce che entra nei locali attraverso entrambi i vetri, la trasmittanza termica totale e la necessità di eventuali schermature. Come per i normali serramenti, anche nel caso del controvetro, è opportuno valutare quale tipologia di vetro corrisponda al meglio alle necessità del progetto.

Sostituzione del vetro esistente: quando l'infisso è in buone condizioni, ma è presente un vetro singolo con scarse prestazioni termiche, si valuta la sostituzione del solo vetro. La scelta dovrebbe ricadere su un vetrocamera, composto da più vetri distanziati da intercapedini contenenti del gas di varia natura. La scelta della superficie vetrata si compie una volta verificate le condizioni del telaio e la sua capacità di supportare il nuovo elemento trasparente. I vetri possono essere basso emissivi o selettivi e nell'intercapedine troviamo aria o gas nobili, che aumentano il potere isolante.

Sostituzione dell'intero infisso: con il passare degli anni è normale che gli infissi tendano ad usurarsi e a non garantire più le stesse prestazioni. È utile evidenziare che gli infissi generalmente hanno una durata media di 20/30 anni. Di conseguenza se si è giunti a tal limite la sostituzione è più conveniente. La maggior parte delle aziende che realizzano infissi e serramenti il più delle volte consigliano ai propri clienti di investire nella sostituzione piuttosto che nella manutenzione, vista anche la possibilità di beneficiare delle agevolazioni fiscali. In particolare, è consigliato procedere in tal senso quando si dispone di infissi in legno la cui manutenzione risulta essere più corposa, in termini economici, rispetto alla loro sostituzione. Gli infissi in alluminio che si facevano una volta non comportano vantaggi, anzi. L'alluminio presenta alcuni difetti, a partire dal fatto che non è adatto a garantire un ottimo isolamento termico, di naturale conseguenza predispone a muffe e condensa nell'abitazione. Oggi, tuttavia, esistono soluzioni miste che permettono di godere di enormi benefici. Parliamo delle finestre in legno-alluminio e alluminio-legno, naturalmente a taglio termico, dalle prestazioni eccellenti. Una valida alternativa è inoltre costituita dagli infissi in PVC²⁹, di per sé molto versatili, che dunque richiedono poca manutenzione rispetto a quelli realizzati in solo legno e garantiscono performance migliori. Questo perché il PVC è un materiale isolante, ignifugo, eco-sostenibile e duraturo nel tempo. Sostituire infissi ormai obsoleti con infissi in PVC o in legno-alluminio significa godere di un risparmio energetico grazie all'efficienza garantita, generata dalla caratteristica di essere degli ottimi isolanti.

²⁹ Cloruro di Polivinile, materiale termoplastico ricavato da materie prime naturali.

Tipologie di vetri per efficientamento dell'involucro trasparente

Nella fisica dell'edificio la scelta della tipologia di vetro da impiegare deve essere fatta in funzione delle esigenze progettuali, con particolare riguardo alla trasparenza alla luce solare e alle caratteristiche di resistenza alla trasmissione del calore.

Si possono quindi evidenziare le seguenti tipologie di vetri ad oggi in commercio:

- *vetri stratificati*: un insieme composto da un foglio di vetro e da uno o più fogli di vetro e/o di plastica, uniti assieme con uno o più intercalari; il vetro stratificato può essere realizzato assemblando vetri, fogli di plastica ed intercalandoli in molteplici combinazioni. I fogli di plastica possono essere chiari, colorati o rivestiti, trasparenti o traslucidi. Gli intercalari possono essere chiari o colorati, trasparenti, traslucidi, opachi oppure rivestiti. I vetri stratificati, oltre che essere indicati per le elevate caratteristiche di sicurezza antinfortunistica, svolgono anche le seguenti funzioni di: controllo della visione e della luce, isolamento termico, protezione solare, isolamento acustico, tutto ciò ovviamente con i dovuti abbinamenti vetrati;
- *vetri isolanti*: ovvero quelli con due o più lastre di vetro, detti vetri doppi, tripli, ecc. formanti camere. Le lastre di vetro vengono poste a distanza tra loro e poi vengono sigillate ermeticamente così da costituire un unico elemento con all'interno intercapedini d'aria con funzione di isolante termico. Al posto dell'aria si possono impiegare altri gas di riempimento, con prestazioni termiche più elevate dei normali vetri isolanti; a tal fine si usano gas inerti, che non reagiscono con gli altri materiali ma che aumentano la resistenza al passaggio del flusso di calore rispetto all'aria, riducendo la trasmittanza termica del vetro. Solitamente vengono impiegati gas come Argon o Krypton, quest'ultimo più performante ma anche più costoso e quindi indicato solo per esecuzioni particolari;
- *vetri con rivestimento a bassa emissività*: hanno la possibilità di diminuire ulteriormente il passaggio di calore attraverso i vetri isolanti, garantendo una riduzione delle dispersioni termiche almeno del 30%. Il rivestimento basso emissivo applicato sul vetro è un film di metallo o di ossido di metallo che agisce sia in regime invernale che in regime estivo: per la stagione estiva in zone dai climi caldi, per gli infissi esposti a sud, est, ovest il rivestimento basso emissivo viene applicato sulla lastra esterna del vetro isolante, per il funzionamento invernale deve essere applicato sulla lastra interna del vetro;
- *vetri con rivestimenti riflettenti*: il rivestimento riflettente riduce la componente della radiazione solare che penetra nell'edificio attraverso la superficie del vetro; tali vetri sono in grado quindi di ridurre sia la frazione di radiazione visibile che complessivamente il valore di guadagno di calore solare. Vengono realizzati mediante la deposizione sulla superficie vetrosa di un sottile film metallico che aumenta il coefficiente di riflessione del materiale a discapito di quello di trasparenza e di assorbimento per quasi tutte le radiazioni di lunghezza d'onda compresa nel campo del visibile dell'infrarosso;

- *vetri con rivestimenti spettralmente selettivi*: sono vetri realizzati con particolari rivestimenti basso emissivi che li rendono riflettenti alle radiazioni termiche con una diminuzione del carico termico trasmesso in ambiente tra il 40 e il 70% ma al contempo non riflettono le radiazioni luminose rimanendo così altamente trasparenti alla luce solare;
- *vetri colorati*: hanno la caratteristica di assorbire una buona parte della radiazione solare incidente riducendo sensibilmente il coefficiente di guadagno di luce solare, ma conseguentemente anche la trasmissione di radiazione visibile e l'abbagliamento. Il tipo di colore del vetro influenza i meccanismi di trasmissione delle radiazioni luminose e termiche; ad esempio il bronzo e il grigio riducono allo stesso modo la penetrazione di luce visibile e calore solare, mentre colori come blu e verde offrono una maggiore penetrazione della luce visibile opponendosi maggiormente allo scambio di calore;
- *vetri fotovoltaici*: progettati per sfruttare l'energia del sole, presentano sulla superficie del vetro un film sottilissimo realizzato con materiale fotocatalitico che lo riveste sotto forma di gel. Il gel, nella cui composizione è presente il silicio amorfo, attraverso una serie di processi di lavorazione in laboratorio, viene reso semiconduttore e poi trasformato e lavorato così da poter essere applicato sulle superfici trasparenti;
- *vetri cromogenici*: sono una tipologia di vetri che assumono un diverso comportamento in funzione del tipo di luce incidente, del campo di temperature alla quale sono sottoposti e di un'eventuale differenza di potenziale elettrico applicato dall'esterno. Questi vetri assumono diverse denominazioni a seconda del fattore che ne influenza il cambio di proprietà:
 - *fotocromici*: quando la loro trasparenza ed il controllo solare variano nel tempo in funzione dell'intensità luminosa incidente; maggiore è la radiazione luminosa più riflettono la luce attraverso un cambio di colorazione tendente allo scuro (blu); al buio invece tornano chiari e trasparenti.
 - *termocromici*: è la temperatura a modificarne le caratteristiche di trasparenza alla radiazione luminosa e termica, quindi maggiore è la temperatura, più il vetro si opacizza.
 - *elettrocromici*: una variazione della tensione elettrica appositamente indotta è la causa dell'alterazione del coefficiente di trasmissione della radiazione luminosa. Sono vetri stratificati, la cui struttura è costituita da un elettrolita che è inglobato tra due elettrodi che a loro volta sono incorporati tra due conduttori trasparenti ed inseriti tra due lastre di vetro. Quando viene applicata una tensione elettrica, si verifica una reazione elettrochimica che causa la migrazione di ioni da un elettrodo all'altro provocando una variazione del colore del componente. Quando al sistema viene applicata la tensione, il vetro si colora, a circuito aperto il sistema

conserva la colorazione poiché l'elettrolita ha una bassa conduttività elettronica. Per ottenere il ritorno alle condizioni di trasparenza bisogna invertire la polarità.

- *vetri a cristalli liquidi*: nei quali i cristalli che ne costituiscono la struttura cambiano orientamento nel momento in cui viene applicata una differenza di potenziale tra gli elettrodi del sistema: quando il dispositivo è acceso, la vetrata è trasparente perché i cristalli o le particelle sono allineate mentre quando il dispositivo è spento, la vetrata appare traslucida.
- *vetri ventilati*: in cui l'aria viene aspirata all'interno di una camera ventilata per creare un cuscinetto d'aria a temperatura costante. Un sensore collocato in prossimità della ventola di aspirazione rileva tale temperatura: qualora quest'ultima aumentasse la ventola entra in funzione facendo circolare l'aria e spingendo via quella riscaldata dall'irraggiamento. In inverno invece l'aria viene impiegata per scaldare l'ambiente interno.

Abaco di soluzioni consigliate per le chiusure vetrate in clima mediterraneo

Come analizzato in precedenza è possibile efficientare l'involucro trasparente attraverso vari interventi quali:

- inserimento di pellicole basso emissive;
- sigillare le infiltrazioni;
- inserimento di una doppia finestra;
- inserimento di un doppio vetro;
- sostituzione del vetro esistente;
- sostituzione del serramento completo.

Tali interventi, ad ogni modo, nella maggior parte dei casi non sono in grado di raggiungere la trasmittanza U di $2,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ prescritta nella normativa di legge. Infatti, la sola applicazione di pellicole trasparenti può essere sufficientemente indicata nel caso in cui gli infissi siano in buone condizioni, vi sia un doppio vetro e nessun problema di infiltrazione di aria. Quindi, solo partendo da un infisso con ottime prestazioni energetiche si può raggiungere la prestazione energetica di legge. Anche nel caso in cui si intervenisse solo mediante la sigillatura degli infissi tramite un materiale che può essere silicone, poliuretano o polifosforo a seconda della compatibilità chimica con altri materiali presenti, ad ogni modo, non si otterrebbe un risultato ottimale solo qualora siano in buone condizioni e le vetrocamere abbiano prestazioni accettabili. Mentre per quanto concerne, la possibile introduzione di un secondo infisso risulta valido solo nel caso in cui sia necessario un intervento più incisivo, ma non è possibile intervenire sulla finestra esistente poiché non è possibile modificare l'estetica della facciata e l'infisso originale non possa essere sostituito. Come per l'inserimento di una doppia finestra, la sostituzione del vetro può essere utile quando non si ha la libertà di apportare significative modifiche estetiche all'edificio. Ma come appare evidente le ultime tipologie di intervento citate risultano costose quanto la completa

sostituzione dell'infisso stesso. Al vetro tradizionale è bene preferire un doppio o triplo vetro basso emissivo, con le vetrocamere riempite di gas Argon, il più frequentemente utilizzato, o gas Krypton, più efficace ma anche più costoso e difficile da reperire. La funzione della patina è riflettere il calore, trattenendolo nell'ambiente e riducendo le dispersioni termiche. Il vantaggio si avverte soprattutto d'inverno, con una conseguente diminuzione delle spese di riscaldamento, e anche in termini di comfort ambientale.

INFISSI IN LEGNO	
VANTAGGI	SVANTAGGI
Aspetto gradevole	Costo elevato del legno di qualità
Basso coefficiente di trasmittanza termica (quercia 0,18 W/m ² K, abete 0,126 W/m ² K)	Deformabilità dovuta ad oscillazioni del tasso di umidità
Facilità di lavorazione	Deperibilità causata da agenti biologici come funghi ed insetti

Tabella 10. Vantaggi e svantaggi degli infissi in legno

INFISSI IN ALLUMINIO	
VANTAGGI	SVANTAGGI
Inalterabilità a contatto con molte sostanze liquide	Elevata conduttività termica (209 W/mk)
Maggiore durabilità rispetto agli infissi in legno	
Non richiede riverniciature	
Leggerezza	
Resistenza agli agenti atmosferici	
combinazione con altri materiali per aumentarne le prestazioni	

Tabella 11. Vantaggi e svantaggi degli infissi in alluminio

INFISSI IN ACCIAIO	
VANTAGGI	SVANTAGGI
Elevata resistenza meccanica	Elevata conduttività termica (50 W/mK)
Ingombro limitato	Elevato coefficiente di dilatazione termica
	Maggiore manutenzione nel tempo

Tabella 12. Vantaggi e svantaggi degli infissi in acciaio

INFISSI IN PVC	
VANTAGGI	SVANTAGGI
Elevato isolamento acustico e termico	Elevato coefficiente di dilatazione termica dei profili
Facilità di lavorazione	
Inattaccabilità da parte degli agenti chimici esterni	
Indeformabilità	

Manutenzione minima	
---------------------	--

Tabella 13. Vantaggi e svantaggi degli infissi in PVC

Nell' Allegato B sono riportate le schede tecniche relative ai materiali contenenti caratteristiche e indicazioni per una corretta pratica.