Flavia Fascia, Renato Iovino

L'ELEMENTO DI FABBRICA DI CONFINE

1. PREMESSA

Con il termine *Elemento di fabbrica di confine* viene indicare il sistema tecnologico destinato a separare lo spazio architettonico da quello esterno in direzione orizzontale, rispondendo ad esigenze generali funzionali di sicurezza e di abitabilità, oltre a quelle compositive ed economiche che, anche se di notevole importanza, esulano da questa trattazione.

Gli elementi di confine, in particolare, devono essere in grado di fornire prestazioni adeguate a consentire il pieno svolgimento delle funzioni ospitate nello spazio architettonico ed a garantire condizioni di comfort, sia di tipo termoigrometrico che acustico, di fornire inoltre prestazioni adeguate relativamente alla difesa dagli agenti esterni, alla durabilità ed all'igiene.

L'elemento di fabbrica di confine è costituito, nella generalità dei casi, da più elementi costruttivi: quelli relativi alla parte opaca e quelli relativi alla parte trasparente, i serramenti esterni, la cui presenza è determinata dalle esigenze del collegamento dello spazio esterno con quello interno e della illuminazione ed aerazione naturale degli spazi chiusi.

In relazione alle caratteristiche costruttive gli elementi di confine opachi possono classificarsi in *muri*, ovvero portanti, e in *tamponature*, ovvero portati da una struttura, in generale a gabbia. La resistenza meccanica delle tamponature, quindi, deve essere riferita alla capacità di portare il peso proprio, di resistere alla spinta del vento per azioni di pressione e depressione, di resistere alle azioni sismiche ed agli urti accidentali provenienti sia dall'interno che dall'esterno.

In questo fascicolo di Architettura Tecnica verranno esaminate soltanto le tamponature, rimandando ad altri fascicoli l'esame della tipologia portante.

In vero per moltissimi secoli il muro portante perimetrale ha risposto ottimamente a tutte le prestazioni richieste: la massa e la resistenza della muratura erano tali da sopportare spinte orizzontali, da svolgere il ruolo di accumulatore di energia solare, mentre la continuità della struttura muraria garantiva la più completa difesa dagli agenti esterni, quali la pioggia e il vento.

Oggi, per motivazioni che non sono certamente da ricercarsi nella qualità del servizio prestato, altri sistemi costruttivi hanno sostituito il muro, sia per fattori di ordine economico e sociale che per il grande sviluppo tecnologico che si è avuto negli ultimi decenni.

L'avvento della struttura intelaiata a gabbia, in acciaio ed in cemento armato, ha portato ad una specializzazione funzionale dell'involucro dell'edificio in elementi costruttivi destinati a portare i carichi ed elementi costruttivi destinati a racchiudere lo spazio architettonico. È nato così l'elemento di fabbrica tamponatura che, non più portante ma portato, deve essere di peso ridotto per non costituire un grave sovraccarico per la struttura.

Ridotta al minimo indispensabile la resistenza all'urto, gli operatori del settore hanno ricercato e messo a punto i più svariati espedienti per garantire almeno un minimo di isolamento acustico e termico all'involucro. Inoltre, con l'introduzione generalizzata degli impianti di riscaldamento, sostenuta nel passato dal basso costo dell'energia termica, al nuovo sistema tecnologico tamponatura non è stato garantito un adeguato valore di inerzia termica, capace di non far risentire in tempi brevi all'ambiente confinato le variazioni termiche dell'ambiente esterno.

Pareti esterne sottilissime e grandi vetrate hanno fatto a gara nella corsa allo spreco di energia fino a quando non è intervenuta la crisi del petrolio ed il freno imposto da leggi e dai regolamenti dello Stato sul contenimento dei consumi energetici.

2. LE TIPOLOGIE COSTRUTTIVE DELLE CHIUSURE D'AMBITO

Le tamponature possono essere realizzate in opera oppure prefabbricate; le tamponature realizzate in opera possono essere semplici, o a camera d'aria, e costruite con blocchi leggeri, con mattoni forati e con mattoni pieni; le tamponature prefabbricate possono essere realizzate con pannelli, con grandi elementi parete, con facciate cortina (curtain walls).

Sia per le tamponature in conci, quando sono in vista, che per i pannelli e le pareti cortina vi è il problema della coordinazione modulare con la gabbia portante e tra gli stessi elementi.

Le chiusure d'ambito verticali opache devono possedere requisiti idonei a soddisfare più esigenze funzionali.

In particolare, devono soddisfare:

- **Esigenze di sicurezza**, per la statica, per la resistenza al fuoco, per la resistenza all'intrusione.
- **Esigenze di resistenza termica**, per il contenimento dei consumi energetici, estivi e invernali.
- **Esigenze di igiene**, per la purezza dell'aria, per la condensa e per l'emissione di gas e polveri.
- **Esigenze acustiche**, per l'isolamento dai rumori esterni e per la correzione acustica ambientale.
- **Esigenze di estetica**, per l'aspetto formale sia verso l'ambiente esterno che verso lo spazio architettonico interno.
- **Esigenze di attrezzabilità**, per consentire l'applicazione di arredi interni.
- **Esigenze di durabilità**, per aumentare la vita utile della parete, per pianificare gli interventi manutentivi e contenerne i costi.
- **Esigenze di economia,** per contenere i costi di costruzione compatibilmente con tutte le altre esigenze.

Al fine di soddisfare le molteplici esigenze innanzi indicate, le chiusure d'ambito verticali devono possedere specifici requisiti. In particolare, le chiusure d'ambito devono essere qualificate almeno dai requisiti di seguito indicati.

- **Requisito di stabilità:** la parete deve possedere la capacità di resistere alle sollecitazioni indotte dal peso proprio, dall'azione del vento, dalle azioni sismiche e dai carichi di esercizio in genere, senza perdere la sua funzionalità nel tempo.
- **Requisito di resistenza e di durabilità agli urti:** la parete deve possedere la capacità di resistere alle sollecitazioni indotte dagli urti accidentali, provenienti sia dall'esterno che dall'interno; inoltre la parete deve possedere l'attitudine a mantenere adeguati livelli prestazionali sotto gli effetti degli urti accidentali e, in particolare, non devono verificarsi riduzioni dei livelli prestazionali relativamente alla tenuta all'acqua e all'aria ed al comportamento acustico.
- **Requisito di resistenza al fuoco:** la parete deve conservare per un tempo prestabilito l'attitudine a portare i carichi di esercizio, di non lasciar passare fumi e fiamme, di limitare la trasmissione del calore; in linea generale la parete deve impedire la propagazione dell'incendio, da e verso l'esterno, per un tempo predefinito.
- **Requisito di contenimento della tossicità dei fumi:** la parete deve essere caratterizzata da una limitata produzione, sotto l'effetto dell'incendio, di fumi tossici per il sistema respiratorio, per gli occhi e per la pelle.
- **Requisito di sicurezza alle intrusioni:** la parete deve possedere un adeguato livello di resistenza nei riguardi dei tentativi di intrusione dall'esterno; in particolare, devono essere

caratterizzati da adeguata resistenza meccanica gli elementi di fissaggio, i giunti, ecc.

- **Requisito di sicurezza ai fenomeni elettrici ed elettromagnetici:** la parete deve possedere un adeguato livello di controllo degli effetti indotti da scariche elettriche e da fenomeni elettromagnetici; in particolare, la parete deve consentire la dispersione delle scariche elettriche nel terreno ed impedire lo sviluppo di incendi durante il passaggio della corrente.
- **Requisito di permeabilità all'aria:** la parete deve possedere una adeguata permeabilità all'aria senza, però, compromettere la resistenza termica; la parete, in generale, deve *respirare*, in modo da diffondere verso l'ambiente esterno il vapor d'acqua che si forma all'interno dello spazio architettonico.
- **Requisito di tenuta all'acqua:** la parete deve possedere una adeguata tenuta alla penetrazione dell'acqua piovana, sia negli strati interstiziali, sia all'interno dello spazio architettonico.
- **Requisito di resistenza termica e di controllo della condensazione interstiziale:** la parete deve possedere una adeguata resistenza termica per contenere i consumi energetici, in condizioni invernali ed estivi; per impedire la condensa, sul paramento interno e negli strati interstiziali; per garantire condizioni di benessere fisiologico ai fruitori dello spazio architettonico.
- **Requisito di controllo dell'emissione di odori:** la parete, e gli strati di finitura in particolare, devono possedere l'attitudine a non emettere odori sgradevoli.
- **Requisito di non emissione di gas, di polveri e/o di radiazioni nocive:** la parete, e gli strati di finitura in particolare, devono possedere l'attitudine a non emettere gas, polveri o radiazioni che possano essere nocive per l'uomo.
- **Requisito di isolamento dai rumori aerei:** la parete, e gli strati con massa maggiore in particolare, devono possedere un adeguato livello di isolamento nei riguardi dei rumori aerei provenienti dall'ambiente esterno, limitandone la trasmissione.
- **Requisito di isolamento acustico nei confronti della pioggia e della grandine:** la parete deve possedere una adeguata capacità di isolare l'ambiente interno dai rumori provocati dalla pioggia e dalla grandine battenti all'esterno sulla parete.
- **Requisito di isolamento acustico nei confronti del vento:** la parete deve possedere una adeguata capacità di isolare l'ambiente interno dai rumori provocati dal vento che investe l'edificio.
- **Requisito di planarità:** la parete, e in particolare gli strati di finitura ed i relativi strati di supporto, devono essere caratterizzati da una adeguato livello di planarità sia nel proprio piano che rispetto alle pareti a confine.
- **Requisito di assenza di difetti superficiali:** la parete, e in particolare gli strati di finitura ed i relativi strati di supporto, devono essere caratterizzati da mancanza di difetti visibili.
- **Requisito di omogeneità di colore e di brillantezza:** gli strati di finitura della parete devono essere caratterizzati da limitati livelli di differenze di colore e di brillantezza.
- **Requisito di attrezzabilità:** la parete deve possedere l'attitudine di sopportare i carichi sospesi, sia all'interno che all'esterno, quali gli arredi pensili, le insegne, i cavi, le tende esterne e interne, ecc.
- **Requisito di durabilità sotto l'effetto della temperatura, dell'irraggiamento solare, dell'acqua piovana, del gelo e del disgelo:** la parete deve possedere l'attitudine a mantenere adeguati livelli prestazionali anche se sottoposta alle sollecitazioni indotte da variazioni termiche, dall'irraggiamento solare, dall'acqua piovana e da cicli di gelo e disgelo.

- **Requisito di durabilità sotto l'effetto delle nebbie, delle atmosfere industriali, dei venti di sabbia e polvere:** la parete deve possedere l'attitudine a mantenere adeguati livelli prestazionali anche se sottoposta alle azioni di corrosione indotte dalle nebbie saline e industriali ed all'usura determinata dai venti contenenti sabbia e polvere; in particolare non devono verificarsi riduzioni dei livelli prestazionali relativamente alla tenuta all'acqua e all'aria.

Per soddisfare i molteplici requisiti richiesti dalle esigenze funzionali, le tamponature degli edifici possono essere formate da più strati funzionali elementari che, in alcune soluzioni costruttive, possono anche coincidere in uno o pochi strati.

In generale è possibile distinguere:

- **lo strato portante**, al quale è demandato il compito di sopportare sia le sollecitazioni indotte dal peso proprio e dal peso degli altri strati funzionali ad esso collegati, sia le sollecitazioni indotte dall'azione del vento, degli urti accidentali e dalle azioni sismiche;
- **lo strato di tenuta all'acqua**, al quale è demandato il compito di garantire una prefissata impermeabilità all'acqua meteorica;
- **lo strato di tenuta all'aria**, al quale è demandato il compito di garantire una prefissata tenuta all'aria ed alla pressione del vento;
- **lo strato di isolamento termico**, al quale è demandato il compito di garantire una prefissata resistenza termica per controllare il fenomeno della condensa sul paramento interno, per garantire condizioni di benessere fisiologico e per contenere i consumi energetici;
- **lo strato di barriera al vapore**, al quale è demandato il compito di garantire una prefissata impermeabilità al vapore d'acqua per controllare il fenomeno della condensa negli strati interstiziali della parete;
- **lo strato di collegamento**, al quale è demandato il compito di garantire il fissaggio di uno strato portato allo strato portante;
- **lo stato di protezione e rivestimento**, al quale è demandato il compito di proteggere il sistema costruttivo dagli agenti atmosferici e di svolgere la funzione decorativa;
- **lo strato di regolarizzazione**, al quale è demandato il compito di ridurre le irregolarità superficiali dello strato sottostante sia per rendere continua l'adesione tra due strati contigui, sia per ridurre sollecitazioni meccaniche anomale in fase di esercizio;
- **lo strato di ripartizione dei carichi**, al quale è demandato il compito di diffondere i carichi concentrati, quali gli urti accidentali, sugli starti compressibili;
- **lo strato di ventilazione**, al quale è demandato il compito di contribuire al controllo delle caratteristiche termoigrometriche della chiusura mediante ricambi d'aria, naturali o forzati;
- **lo strato di accumulazione termica**, al quale è demandato il compito di portare la chiusura al valore prefissato di inerzia termica.

REQUISITI																		
stabilità	resistenza agli urti	resistenza al fuoco	contenimento emissività fumi	sicurezza all'intrusione	sicurezza fenomeni elettrici	permeabilità all'aria	tenuta all'acqua	resistenza termica	controllo emissività odori	controllo emissività gas e	isolamento rumori	isolamento rumori pioggia e grandine	isolamento rumori del vento	planarità	assenza di difetti superficiali	omogeneità di colore	attrezzabilità	durabilità

3. IL PROGETTO TERMICO DELL'ELEMENTO DI FABBRICA DI CONFINE

I sistemi di chiusura d'ambito esterno, sia di tipo tradizionale, in pietre naturali e artificiali, sia in pannelli prefabbricati di calcestruzzo, metallo, vetroresina, legno, devono rispondere a molteplici esigenze ed avere caratteristiche prestazionali tali da migliorare l'affidabilità del prodotto edilizio del quale fanno parte.

Oltre ai requisiti relativi alla funzionalità ed alla sicurezza ed a quelli di ordine estetico e di durabilità, le pareti perimetrali devono essere idonee a garantire agli utenti dello spazio architettonico un buon livello di comfort ambientale.

Quest'ultimo, per quanto riguarda il benessere termoigrometrico, è legato a quattro fattori caratteristici, temperatura, umidità relativa, irradiamento e ventilazione, che opportunamente graduati con mezzi naturali e/o artificiali mettono l'organismo umano in condizioni ottimali per l'espletamento di determinate funzioni.

In questi ultimi anni, con l'evoluzione dei sistemi costruttivi, che ha comportato la riduzione dei pesi specifici e degli spessori dei materiali impiegati per gli elementi di confine, l'isolamento termico degli edifici è diventato una preoccupazione essenziale degli operatori del settore edile. Infatti, oggi non è più ammissibile la tendenza, prevalente fino a pochi anni or sono, a risolvere il controllo ambientale con l'impiego di scarse coibentazioni e notevoli apporti termici.

Ottimizzando le caratteristiche di isolamento termico si consegue sia la riduzione dei consumi di combustibile, e quindi dei costi di gestione degli impianti tecnologici senza pregiudicare il livello di comfort termico ambientale, sia il miglioramento delle condizioni di benessere fisiologico dipendenti dai fattori termoigrometrici dell'ambiente interno.

In effetti con l'ottimizzazione dell'isolamento termico degli edifici è possibile conseguire quattro obiettivi.

- Il primo è costituito dal rispetto delle disposizioni legislative vigenti. In particolare, la legge 9 gennaio 1991 n. 10 "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia", il Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993 n. 412 "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia" e il D.L. 29 dicembre 2006 n. 311 "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005 n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/Ce, relativa al rendimento energetico nell'edilizia", prescrivono valori limite degli indici di prestazione energetica EP per la climatizzazione invernale degli edifici. Pertanto, le chiusure d'ambito dell'edificio dovranno essere progettate in modo che le relative resistenze termiche siano adeguate al valore limite del EP.
- Il secondo obiettivo da conseguire è quello di impedire i fenomeni di condensa dell'umidità ambientale sia sullo strato superficiale interno delle pareti perimetrali sia all'interno delle stesse.
- Il terzo è quello di garantire il benessere fisiologico agli utenti del prodotto edilizio contenendo entro limiti accettabili gli scambi di calore per irraggiamento fra le persone e le pareti perimetrali.
- L'ultimo, ma non meno importante, obiettivo che si può conseguire con l'isolamento termico, riguarda l'ottimizzazione dei costi di gestione degli impianti di riscaldamento e/o condizionamento.

3.1 Simboli e Definizioni

T_i	[C]	Temperatura interna del locale riscaldato. Si assume, per norma, non superiore ai 20 C.
T_e	[C]	Temperatura dell'aria esterna di progetto. Si assume in funzione della località.
θ_i	[C]	Temperatura superficiale del paramento interno di una chiusura d'ambito.
θ_e	[C]	Temperatura superficiale del paramento esterno di una chiusura d'ambito.
θ_j	[C]	Temperatura superficiale del paramento esterno dello strato j-mo della chiusura d'ambito.
W	watt	Unità di misura della potenza nel Sistema Internazionale. 1 W = 0,86 Cal/h
kW	kilowatt	È un multiplo del watt. 1 kW = 10^3 W
J	joule	Unità di misura dell'energia nel Sistema Internazionale
MJ	megajoule	È un multiplo del joule. 1 MJ = 10^6 J
Ws	wattsecondo	È un sottomultiplo di una unità di misura dell'energia.
Wh	wattora	È una unità di misura dell'energia. Esprime l'energia fornita dalla potenza di 1 W in 1 ora. 1 Wh= 3600 Ws = 3600 J
kWh	kilowattora	È un multiplo dell'unità di misura dell'energia. 1 kWh = 10^3 Wh 1 kWh = 10^3 W x 3600 = 10^3 3600 Ws = 10^3 3600 J
Φ	[W]	Flusso termico attraverso una chiusura d'ambito esterno. Rappresenta la quantità di calore che si trasmette dall'ambiente interno a quello esterno nell'unità di tempo, per conduzione, convezione ed irraggiamento.
α_i	[W/m²K]	Coefficiente di trasmissione superficiale interno, o adduttanza di ammissione. Rappresenta la quantità di calore che, per irraggiamento e convezione, si trasmette, tra l'ambiente ed il paramento interno di una chiusura d'ambito, in un'ora, per ogni metro quadrato di parete e per un salto termico (Ti – θi) di un grado.
α_e	[W/m²K]	Coefficiente di trasmissione superficiale esterno, o adduttanza di emissione. Rappresenta la quantità di calore che, per irraggiamento e convezione, si trasmette, tra il paramento esterno di una chiusura d'ambito e l'ambiente esterno, in un'ora, per ogni metro quadrato di parete e per un salto termico (θe - Te) di un grado.
λ_j	[W/m²K]	Coefficiente di conduttività dello strato omogeneo j-mo, di una chiusura d'ambito. Rappresenta la quantità di calore che, per conduzione, si trasmette; attraverso uno strato di materiale omogeneo, di spessore un metro, in un'ora, per ogni metro quadrato di parete e per un salto termico di un grado.
s_j	[m]	Spessore dello strato j-mo di una chiusura d'ambito.
S	[m²]	Superficie di una chiusura d'ambito.
C_j	[W/m²K]	Conduttanza dello strato j-mo, non omogeneo, di una chiusura d'ambito. Rappresenta la quantità di calore che si trasmette, attraverso uno strato di materiale non omogeneo, in un'ora, per ogni metro quadrato di parete e per un salto termico di un grado.
r_a	[m² K/W]	Resistenza termica della lama d'aria di una chiusura d'ambito. Rappresenta l'inverso della quantità di calore che si trasmette, attraverso una lama d'aria, in un'ora, per ogni metro quadrato di parete e per un salto termico di un grado.
U	[W/m²K]	Trasmittanza della chiusura d'ambito. Rappresenta la quantità di calore che si trasmette, in un'ora, per irraggiamento, convezione e conduzione, attraverso un metro quadrato di parete e per un salto termico di un grado.

U_j	[W/m²K]	Trasmittanza relativa ai primi j-mi strati di una chiusura d'ambito.
U_l	[W/m K]	Trasmittanza lineare del ponte-termico. Rappresenta la quantità di calore che si trasmette, in un'ora, attraverso un metro lineare di ponte-termico per un salto termico di un grado.
φ	[%]	Grado igrotermico di un ambiente. Rappresenta il rapporto tra la quantità mr [g/kg] di vapore d'acqua contenuta in un kg di aria alla temperatura T e la quantità ms [g/kg] di vapor d'acqua che rende satura l'aria alla stessa temperatura.
T_r	[C]	Temperatura di rugiada. Rappresenta la temperatura corrispondente alla saturazione dell'aria. $T_r = T_i - 31{,}25 \times (2 - \log \varphi)$; per $T_i = 20$ °C e $\varphi = 80$ risulta $T_r = 16{,}97$ °C
R_{crit}	[m² K/W]	Resistenza critica di condensazione. Rappresenta la resistenza termica di una chiusura d'ambito esterno, per la quale si realizza la condizione di condensazione dell'umidità ambientale.
P_i	[mm Hg]	Pressione parziale del vapore d'acqua nell'ambiente interno.
P_e	[mm Hg]	Pressione parziale del vapore d'acqua nell'ambiente esterno.
μ_j	[g/m h mm Hg]	Permeabilità al vapor d'acqua dello strato j-mo di una chiusura d'ambito. Rappresenta la quantità di vapore d'acqua che attraversa uno strato di materiale di spessore un metro, in un'ora, per ogni metro quadro di parete e per una differenza di pressione di un mm di colonna di mercurio.
ϱ	[m² h mm Hg/g]	Resistenza alla diffusione del vapore di una chiusura d'ambito. È data da $\sum sj/\mu j$, dove sj è lo spessore dello strato j-mo e μj è la permeabilità al vapore dello strato j-mo.
C_d	[W/m³K]	Dotazione di calore disperdibile attraverso le strutture opache. Esprime il flusso termico disperdibile per 1 m³ di volume riscaldato e per 1 grado di salto termico tra la temperatura interna e la temperatura esterna. $Cd = \Phi / (V \times \Delta T)$
C_v	[W/m³K]	Dotazione di calore disperdibile per ricambio d'aria. Esprime il flusso termico disperdibile per 1 m³ di volume riscaldato e per 1 grado di salto termico tra la temperatura interna e la temperatura esterna. $Cv = (0{,}29 \times n \times V\ (Ti - Te)) / (V \times (Ti - Te))$ dove n è il numero di ricambi d'aria all'ora
EP	[kWh/m²anno] [kWh/m³anno]	Indice di prestazione energetica. Esprime i kWh disperdibili, per metro quadrato o per metro cubo, in 1 anno. $EP = 10^3 \times \Phi / (V \times anno)$

3.2 Definizioni e Termini

Accertamento	È l'insieme delle attività di controllo pubblico diretto ad accertare in via esclusivamente documentale che il progetto delle opere e gli impianti siano conformi alle norme vigenti e che rispettino le prescrizioni e gli obblighi stabiliti.
Attestato di qualificazione energetica	È il documento predisposto ed asseverato da un professionista abilitato, non necessariamente estraneo alla proprietà, alla progettazione o alla realizzazione dell' edificio, nel quale sono riportati i fabbisogni di energia primaria di calcolo, la classe di appartenenza dell'edificio, o dell'unità immobiliare, in relazione al sistema di certificazione energetica in vigore, ed i corrispondenti valori massimi ammissibili fissati dalla normativa in vigore per il caso specifico o, ove non siano fissati tali limiti, per un identico edificio di nuova costruzione.
Certificazione energetica dell'edificio	È il complesso delle operazioni svolte per il rilascio della certificazione energetica e delle raccomandazioni per il miglioramento della prestazione energetica dell'edificio
Climatizzazione invernale o estiva	È l'insieme di funzioni atte ad assicurare il benessere degli occupanti mediante il controllo, all'interno degli ambienti, della temperatura e, ove presenti dispositivi idonei, della umidità, della portata di rinnovo e della purezza dell' aria
Conduzione	È il complesso delle operazioni effettuate dal responsabile dell'esercizio e manutenzione dell'impianto, attraverso comando manuale, automatico o telematico per la messa in funzione, il governo della combustione, il controllo e la sorveglianza delle apparecchiature componenti l'impianto, al fine di utilizzare il calore prodotto convogliandolo ove previsto nelle quantità e qualità necessarie a garantire le condizioni di comfort
Controlli sugli edifici o sugli impianti	Sono le operazioni svolte da tecnici qualificati operanti sul mercato, al fine di appurare lo stato degli elementi edilizi o degli impianti e l'eventuale necessita di operazioni di manutenzione ordinaria o straordinaria
Diagnosi energetica	Procedura sistematica volta a fornire una adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività e/o impianto industriale o di servizi pubblici o privati, ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati.
Edificio adibito ad uso pubblico	È un edificio nel quale si svolge, in tutto o in parte, l'attività istituzionale di enti pubblici.
Edificio di proprietà pubblica	È un edificio di proprietà dello Stato, delle regioni o degli enti locali, nonché di altri enti pubblici, anche economici, destinato sia allo svolgimento delle attività dell' ente, sia ad altre attività o usi, compreso quello di abitazione privata.
Esercizio e manutenzione di un impianto termico	È il complesso di operazioni, che comporta l'assunzione. di responsabilità finalizzata alla gestione degli impianti. Includente: conduzione, controllo, manutenzione ordinaria e straordinaria, nel rispetto delle norme in materia di sicurezza, di contenimento dei consumi energetici e di salvaguardia ambientale.
Fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale	È la quantità di energia primaria globalmente richiesta, nel corso di un anno, per mantenere negli ambienti riscaldati la temperatura di progetto, in regime di attivazione continuo.
Fonti energetiche rinnovabili	Sono quelle definite all'articolo 2 comma 1, lettera *a),* del decreto legislativo del 29 dicembre 2003, n. 387.

Gradi giorno di una località	È il parametro convenzionale rappresentativo delle condizioni climatiche locali, utilizzato per stimare al meglio il fabbisogno energetico necessario per mantenere gli ambienti ad una temperatura prefissata. Rappresenta la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera. L'unità di misura utilizzata è il grado giorno
Impianto termico	È un impianto tecnologico destinato alla climatizzazione estiva ed invernale degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari o alla sola produzione centralizzata di acqua calda per gli stessi usi; sono compresi negli impianti termici gli impianti individuali di riscaldamento, mentre non sono considerati impianti termici apparecchi quali: stufe, caminetti, apparecchi per il riscaldamento localizzato ad energia radiante, scaldacqua unifamiliari; tali apparecchi, se fissi, sono tuttavia assimilati agli impianti termici quando la somma delle potenze nominali del focolare degli apparecchi al servizio della singola unità immobiliare è maggiore o uguale a 15 kW.
Impianto termico di nuova installazione	È un impianto termico installato in un edificio di nuova costruzione o in un edificio o porzione di edificio antecedentemente privo di impianto termico.
Indice di prestazione energetica EP parziale	Esprime il consumo di energia primaria parziale riferito ad un singolo uso energetico dell'edificio (a titolo d'esempio: alla sola climatizzazione invernale e/o alla climatizzazione estiva e/o produzione di acqua calda per usi sanitari e/o illuminazione artificiale) riferito all'unità di superficie utile o di volume lordo, espresso rispettivamente in kWh/m^2anno o kWh/m^3anno
Indice di prestazione energetica EP	Esprime il consumo di energia primaria totale riferito all'unità di superficie utile o di volume lordo, espresso rispettivamente in kWh/m^2anno o kWh/m^3anno
Involucro edilizio	È l'insieme delle strutture edilizie esterne che delimitano un edificio
Ispezioni su edifici ed impianti	Sono gli interventi di controllo tecnico e documentale in sito, svolti da esperti qualificati incaricati dalle autorità pubbliche competenti, mirato a verificare che le opere e gli impianti siano conformi alle norme vigenti e che rispettino le prescrizioni e gli obblighi stabiliti
Manutenzione ordinaria dell'impianto termico	Sono le operazioni previste nei libretti d'uso e manutenzione degli apparecchi e componenti che possono essere effettuate in luogo con strumenti ed attrezzature di corredo agli apparecchi e componenti stessi e che comportino l'impiego di attrezzature e di materiali di consumo d'uso corrente.
Manutenzione straordinaria dell'impianto termico	Sono gli interventi atti a ricondurre il funzionamento dell'impianto a quello previsto dal progetto e/o dalla normativa vigente mediante il ricorso, in tutto o in parte, a mezzi, attrezzature, strumentazioni, riparazioni, ricambi di parti, ripristini, revisione o sostituzione di apparecchi o componenti. dell' impianto termico.
Massa superficiale	È la massa per unità di superficie della parete opaca compresa la malta dei giunti esclusi gli intonaci, l'unità di misura utilizzata è il kg/m^2
Numero di ore-giorno	Rappresenta il numero di ore del giorno in cui si vuole mantenere costante la temperatura interna di progetto.
Occupante	È chiunque, pur non essendone proprietario, ha la disponibilità, a qualsiasi titolo, di un edificio e dei relativi impianti tecnici.
Parete fittizia	È la parete schematizzata in figura.
Ponte termico	Via di fuga del calore che, in edilizia, si riscontra in corrispondenza dei giunti, delle connessure e nelle zone di discontinuità dell'involucro. (solai e pareti verticali o pareti verticali tra loro, ecc.)
Ponte termico corretto	Si ha quando la trasmittanza termica della parete fittizia (il tratto di parete esterna in corrispondenza del ponte termico) non supera per più del 15% la trasmittanza termica della parete corrente

Potenza termica convenzionale di un generatore di calore	È la potenza termica del focolare diminuita della potenza termica persa al camino in regime di funzionamento continuo; l'unità di misura utilizzata è il kW.
Potenza termica del focolare di un generatore di calore	È il prodotto del potere calorifico inferiore del combustibile impiegato e della portata di combustibile bruciato; l'unità di misura utilizzata è il kW.
Proprietario dell'impianto termico	È il soggetto che, in tutto o in parte, è proprietario dell'impianto termico; nel caso di edifici dotati di impianti termici centralizzati amministrati in condominio e nel caso di soggetti diversi dalle persone fisiche gli obblighi e le responsabilità posti a carico del proprietario dal presente regolamento sono da intendersi riferiti agli amministratori.
Rendimento di combustione o rendimento termico convenzionale di un generatore di calore	È il rapporto tra la potenza termica convenzionale e la potenza termica del focolare.
Rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico	È il rapporto tra il fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale e l'energia primaria delle fonti energetiche, ivi compresa l'energia elettrica dei dispositivi ausiliari, calcolato con riferimento al periodo annuale di esercizio di cui all'art. 9 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. Ai fini della conversione dell'energia elettrica in energia primaria si considera l'equivalenza: 9MJ = 1kWh$_e$
Rendimento di produzione medio stagionale	È il rapporto tra l'energia termica utile generata ed immessa nella rete di distribuzione e l'energia primaria delle fonti energetiche, compresa l'energia elettrica, calcolato con riferimento al periodo annuale di esercizio di cui all'art. 9 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. Ai fini della conversione dell' energia elettrica in energia primaria si considera l'equivalenza: 9MJ = 1kWh$_e$
Rendimento termico utile di un generatore di calore	È il rapporto tra la potenza termica utile e la potenza termica del focolare.
Rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico	Si calcola con la relazione $\eta_g = (75 + 3 \log P_n)$ % dove log P_n è il logaritmo in base 10 della Potenza utile nominale del generatore o dei generatori di calore al servizio del singolo impianto termico, espressa in kW. Per valori di P_n superiori a 1.000 kW la formula precedente non si applica, e la soglia minima per il rendimento globale medio stagionale è pari a 84%.
Ristrutturazione di un impianto termico	È un insieme di opere che comportano la modifica sostanziale sia dei sistemi di produzione che di distribuzione ed emissione del calore; rientrano in questa categoria anche la trasformazione di un impianto termico centralizzato in impianti termici individuali nonché la risistemazione impiantistica nelle singole unità immobiliari o parti di edificio in caso di installazione di un impianto termico individuale previo distacco dall'impianto termico centralizzato.
Schermature solari esterne	Sistemi che, applicati all' esterno di una superficie vetrata trasparente permettono una modulazione variabile e controllata dei parametri energetici e ottico luminosi in risposta alle sollecitazioni solari.
Sostituzione di un generatore di calore	È la rimozione di un vecchio generatore e l'installazione di un altro nuovo, di potenza termica non superiore del 10% alla potenza del generatore sostituito, destinato ad erogare energia termica alle medesime utenze.
Superficie utile	È la superficie netta calpestabile di un edificio.
Trasmittanza termica	Flusso di calore che passa attraverso una parete per m^2 di superficie della parete e per grado K di differenza tra la temperatura interna ad un locale e la temperatura esterna o del locale contiguo.

3.3 Parametri per il progetto termico dell'involucro

Nelle tabelle che seguono sono riportati i valori dei parametri normalmente utilizzati per il progetto termico dell'elemento di fabbrica di confine.

Tab. 3.1 Temperatura dell'aria esterna di progetto

Aosta	-10	Genova	0	Reggio Emilia	-5
Avellino	-2	L'Aquila	-5	Roma	0
Bari	0	Mantova	-5	Salerno	2
Benevento	-2	Milano	-5	Sondrio	-10
Bologna	-5	Napoli	2	Torino	-8
Cagliari	3	Padova	-5	Trento	-12
Campobasso	-4	Palermo	5	Trieste	-5
Caserta	0	Perugia	-2	Udine	-5
Ferrara	-5	Potenza	-3	Venezia	-5
Firenze	0	Reggio Calabria	3	Verona	-5
				Vicenza	-5

Tab. 3.2 Resistenze termiche superficiali ($1/\alpha_i + 1/\alpha_e$) [m² K/W]

Inclinazione della parete e verso del flusso termico	Velocità del vento sul contorno esterno	
	$w \leq 4$ m/sec	$w > 4$ m/sec
Parete verticale o inclinata sul plano orizzontale di un angolo > 60°	0,11 + 0,06 = 0,17	$0{,}11 + 0{,}86 / (2 + 9 \sqrt{w})$
Parete orizzontale o inclinata sul piano orizzontale di un angolo ≤60°		
- flusso ascendente	0,09 + 0,05 = 0,14	$0{,}09 + 0{,}86/ (2 + 9 \sqrt{w})$
- flusso discendente	0,17 + 0,05 = 0,22	$0{,}17 + 0{,}86/ [0{,}7 (2 + 9 \sqrt{w})]$

Tab. 3.3 Conduttività λ [W/m K] dei materiali di uso comune

Materiale	**λ** [W/mK]	**Materiale**	**λ** [W/mK]	**Materiale**	**λ** [W/mK]
Acciaio normale	45,4	Intonaco di calce e sabbia		Perlite conglomerata con cemento	0,227
Alfol (fogli lisci)	0,033	esterno	0,87	(γ = 500 kg/m³)	0,107
Alluminio	209	interno	0,70	(γ = 415 kg/m³)	0,092
Ardesia	1,98	Intonaco di cemento e sabbia	1,40	Plexiglass	2,10

Argilla secca	0,93	Intonaco di gesso e sabbia	0,81	Pomice naturale	0,23
Aria	0,026	Intonaco di gesso per interni	0,52	Pomice conglomerata con cemento	
Asfalto	0,70	Intonaco di gesso e vermiculite		interno	0,29
Basalto	3,50	normale	0,23	(γ = 1000 kg/m^3)	0,37
Calcare		(γ = 500 kg/mc)	0,10	(γ = 1200 kg/m^3)	0,47
(γ = 1900 kg/m^3)	1,50	Lana minerale di rocce		esterno	0,41
(γ = 2100 kg/m^3)	1,70	sfusa	0,037	(γ = 1000 kg/m^3)	0,52
(γ = 2700 kg/m^3)	2,90	in materassini	0,038	(γ = 1200 kg/m^3)	0,74
Calce	0,90	Lana minerale di vetro		Pomice conglomerata con cemento cellulare	0,17
Calcestruzzo armato	1,51	sfusa	0,037	Polistirolo espanso	0,035
Calcestruzzo cellulare		in materassini	0,038	Poliuretano espanso	0,026
(γ = 800 kg/m^3)	0,29	Laterizi comuni		Porcellana piastrelle	1,05
(γ = 600 kg/m^3)	0,23	esterni (2000 kg/m^3)	0,93	Rame commerciale	349
(γ = 400 kg/m^3)	0,14	(γ = 1800 kg/m^3)	0,87	Sabbia secca	0,58
Calcestruzzo magro	0,93	interni (γ = 2000 kg/m^3)	0,81	Sughero conglomerato con catrame	0,058
Calcestruzzo isolante	0,08	(γ = 1800 kg/mc)	0,70	(γ = 400 kg/m^3)	0,081
Carbone in polvere	0,12	Legno (flusso $\perp$ alle fibre)		espanso in lastre	0,058
Carta e cartone	0,16	Abete	0,12	Terreno secco	0,81
Cartone bitumato	0,186	Acero	0,192	leggermente umido	1,74
Ceramica	1,16	Balsa	0,046	umido	2,30
Ferro ordinario	58	Pino	0,15	Torba in lastre	0,058
Fibra di vetro	0,035	Quercia	0,21	In lastre compresse	0,12
Gesso	0,43	Legno (flusso $\parallel$ alle fibre)		In polvere	0,07
Gesso cellulare	0,064	Abete	0,35	Tufo	
Gesso e fibra di legno	0,30	Quercia	0,41	(γ = 1550 kg/m^3)	0,63
Gesso e segatura	0,20	Linoleum	0,186	(γ = 2270 kg/mc)	1,80
Gesso in pannelli leggeri	0,24	Linoleum e sughero	0,08	Vermiculite espansa sciolta	0,07
Ghiaia	0,93	Marmo	3,37	conglomerata	0,085
Gomma per pavim.	0,30	Mattoni	0,80	(γ = 337 kg/mc)	0,091
Granito		Neve in strati (< 3 cm)	0,058	(γ = 442 kg/mc)	0,107
(γ = 3000 kg/mc)	4,07	da 3 a 7cm	0,12	(γ = 487 kg/mc)	0,116
(γ = 2500 kg/mc)	3,14	da 7 a 20 cm	0,23	Vetro monolitico incolore in lastre	0,93
(γ = 1900 kg/mc)	1,10	da 20 a 40 cm	0,70	Vetro cellulare espanso	0,056

Tab. 3.4 Conduttanza C [W/m² K] per alcune strutture non omogenee, esclusi intonaci e solette

Strutture	**Dimensione** [cm x cm]	**C** [W/m²K]	**Strutture**	**Dimensione** [cm x cm]	**C** [W/m²K]
1 Tavolato in mattoni forati di dimensione a x b, con "b" dimensione parallela al flusso			3 Solaio misto con nervature di cm 7 e laterizi di dimensione h x l:		
	12 x 4,5	8,13	- flusso discendente	18 x 33	2,9
	15 x 5,5	7,79		18 x 40	2,9
	12 x 8	4,24		22 x 33	2,5
	8 x12	3,84		22 x 40	2,2
	10 x 15	2,73	- flusso ascendente	18 x 33	3,1
				18 x 40	2,7
				22 x 33	2,8
				22 x 40	2,4
2 Solaio SAP con laterizi di dimensione h x l:					
- flusso discendente	8 x 20	6,3	- flusso ascendente	8 x 20	7,7
	12 x 20	3,8		12 x 20	4,3
	16 x 20	3,2		16 x 20	3,5
	20 x 20	2,9		20 x 20	3,1

Tab. 3.5 Resistenza delle lame d'aria [m²K/ W]

Posizione della lama d'aria e verso del flusso termico	Spessore lama d'aria [mm]						
	5 ÷ 7	7,1 ÷ 9	9,1 ÷ 11	11,1 ÷ 13	14 ÷ 24	25 ÷ 50	55 ÷ 300
Lama d'aria orizzontale o inclinata sul piano orizzontale di un angolo < 60°							
- flusso ascendente	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
- flusso discendente	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20
Lama d'aria verticale o inclinata sul piano orizzontale di un angolo> 60°	0,11	0,13'	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16

Tab. 3.6 Trasmittanza [W/m² K] di alcune strutture

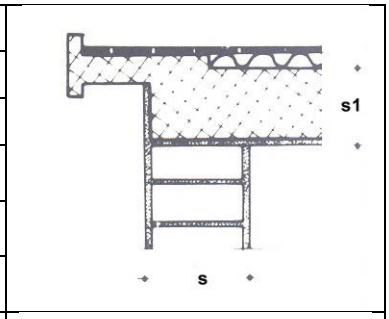
Chiusure d'ambito	**s** [cm]	**s_t** [cm]	**U** [W/m² K]	**Chiusure d'ambito**	**s** [cm]	**s_t** [cm]	**U** [W/m² K]
A) Muri a cassetta				E) Muri in pietra naturale			
A. 1)				E. 1)			
Intonaco esterno	2			Intonaco esterno	2		
Mattoni pieni	12			Granito	40	44	2,90
Camera d'aria	10	34	1,34	Intonaco interno	2		
Mattoni forati	8			E. 2)			
Intonaco interno	2			Intonaco esterno	2		
A. 2)				Arenaria	40	44	2,30
Intonaco esterno	4			Intonaco interno	2		
Mattoni forati	12			E. 3)			
Camera d'aria	10	36	1,14	Intonaco esterno	2		
Mattoni forati	8			Tufo	40	44	1,90
Intonaco interno	2			Intonaco interno	2		
B) Muri in mattoni pieni				F) Pareti in calcestruzzo non armato			
B. 1)				F. 1)			
Intonaco esterno	2			Intonaco esterno	2		
Mattoni pieni	38	42	1,57	Calcestruzzo	20	24	2,80
Intonaco interno	2			Intonaco interno	2		
B. 2)				F.2)			
Intonaco esterno	2			Intonaco esterno	2		
Mattoni pieni	25	29	1,90	Calcestruzzo	15	19	3,10
Intonaco interno	2			Intonaco interno	2		
C) Muri in mattoni forati				G) Pareti in calcestruzzo armato			
C. 1)				G. 1)			
Intonaco esterno	2			Intonaco esterno	2		
Mattoni forati	25	29	1,60	Calcestruzzo	30	34	2,40
Intonaco interno	2			Intonaco interno	2		
				G. 2)			
D) Muri in blocchi stampati e pressati				Intonaco esterno	2		
D. 1)				Calcestruzzo	20	24	2,90
Intonaco esterno	2			Intonaco interno	2		
Blocchi pomi-cemento	38	42	1,06	G. 3)			
Intonaco interno	2			Intonaco esterno	2		
D. 2)				Calcestruzzo	15	19	3,20
Intonaco esterno	2			Intonaco interno	2		
Blocchi pomi-cemento	25	29	1,45				
Intonaco interno	2						

Tab. 3.6 Trasmittanza [W/m² K] di alcune strutture (continua)

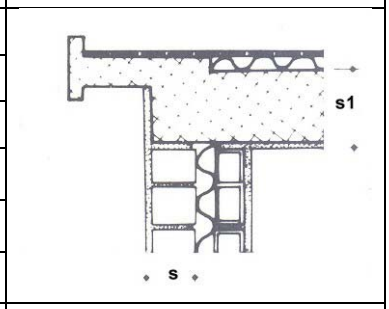
Chiusure d'ambito	**s** [cm]	**s_t** [cm]	**U** [W/m² K]	**Chiusure d'ambito**	**s** [cm]	**s_t** [cm]	**U** [W/m² K]
H) Pareti sandwich				L) Solai			
H. 1)				L. 1) Solaio su porticato			
Vetro	0,5	11,1	0,60	Intonaco esterno	2	28,5	1,33
Camera d'aria	5			Solaio	16,5		
Alluminio	3,3			Caldana	3		
Lana di roccia	5			Sottofondo magro	3		
Alluminio	0,3			Malta allettamento	2		
				Piastrelle	2		
I) Infissi				L. 2) Solaio su vespaio aerato			
I. 1) Finestre di legno				Tavellonato	8	19	1,88
Finestra semplice a un solo vetro			5,20	Calcestruzzo armato	4		
Finestra semplice a doppio vetro distanziato di mm 6			3,2	Impermeabilizzazione			
Finestra semplice a doppio vetro distanziato di mm 12			2,9	Sottofondo	3		
I. 2) Finestre metalliche				Malta allettamento	2		
Finestra semplice a un solo vetro			5,8	Pavimento	2		
Finestra semplice a doppio vetro distanziato di mm 6			3,9	L. 3) Copertura piana a terrazzo			
Finestra semplice a doppio vetro distanziato di mm 12			3,6	Intonaco interno	2	32,5	1,40
I. 3) Vetrate				Solaio	16,5		
Semplice			6,9	Caldana	3		
Doppia			3,4	Pendenza	4		
I. 4) Porte				Lisciatura	1		
in legno			4,0	Impermeabilizzazione sabbia + carta bitumata	2		
in ferro			7,5	Pavimentazione	4		
				L. 4) Copertura a falde			
				Intonaco interno	2	17	2,10
				Solaio	12		
				Caldana	3		
				Travetti e tegole	-		

Tab. 3.7 Coefficiente di trasmissione lineare U_l [W/m K] per alcuni giunti

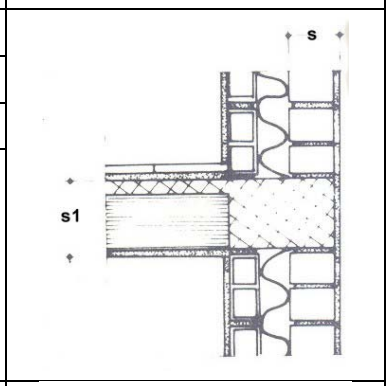
A)	Giunto copertura isolata/muro esterno non isolato								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
da 25 a 29	0,18	0,21	0,24	0,26	0,29	0,32	0,34		
da 30 a 34	0,17	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30	0,32		
da 35 a 40	0,16	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28	0,30		



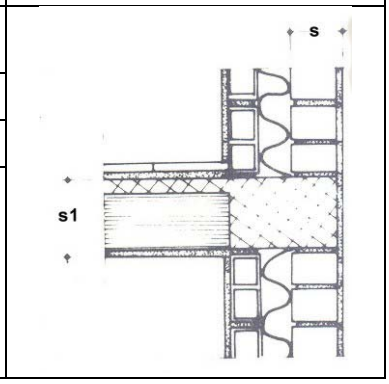
B)	Giunto copertura isolata/muro esterno isolato								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
da 10 a 14	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32	0,35	0,38		
da 15 a 19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,31	0,33	0,35		
da 20 a 25	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,33		



C)	Giunto muro esterno isolato/solaio interpiano								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
da 10 a 14	0,28	0,31	0,35	0,37	0,39	0,43	0,46		
da15 a 19	0,26	0,30	0,32	0,35	0,37	0,40	0,43		
da 20 a 25	0,25	0,28	0,30	0,33	0,36	0,38	0,41		

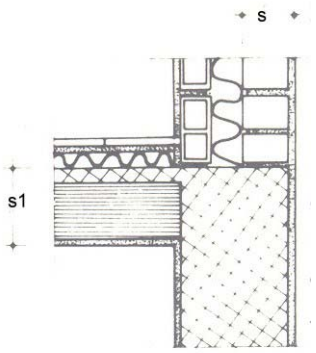


D)	Giunto muro esterno isolato/solaio isolato su locale non riscaldato								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
da 10 a 14	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,26	0,28		
da15 a 19	0,12	0,15	0,17	0,20	0,21	0,23	0,25		
da 20 a 25	0,11	0,14	0,16	0,18	0,19	0,21	0,23		

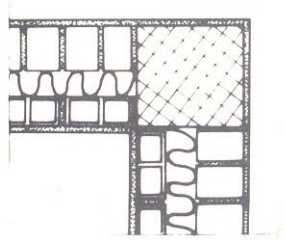


Tab. 3.7 Coefficiente di trasmissione lineare U_l [W/m K] per alcuni giunti (continua)

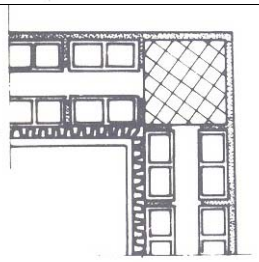
E)	Giunto muro esterno Isolato/solaio non Isolato su locale non riscaldato								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
da 10 a 14	0,21	0,24	0,27	0,29	0,31	0,34	0,37		
da15 a 19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30	0,32	0,35		
da 20 a 25	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,33		



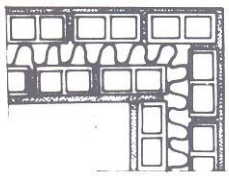
F)	Giunto muri esterni con pilastro d'angolo (isolamento Interrotto)		
	trasmittanza del muro U [W/m²K]		
	da 0,40 a 0,60	da 0,65 a 0,85	da 0,90 a 1,10
da 5 a 9	0,11	0,15	0,21
da 10 a 14	0,12	0,18	0,25



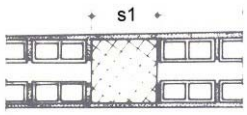
G)	Giunto muri esterni con pilastro d'angolo (isolamento continuo)
	$U_l = 0$



H)	Giunto muri esterni in continuo)
	$U_l = 0$

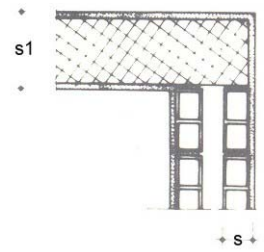


I)	Giunto muro esterno con pilastro (isolamento interrotto)								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
da 10 a 14	0,28	0,31	0,34	0,37	0,41	0,45	0,49	0,53	0,58
da15 a 19	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,43	0,47	0,51	0,55
da 20 a 25	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51

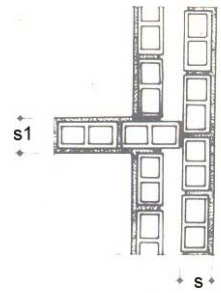


Tab. 3.7 Coefficiente di trasmissione lineare U_l [W/m K] per alcuni giunti (continua)

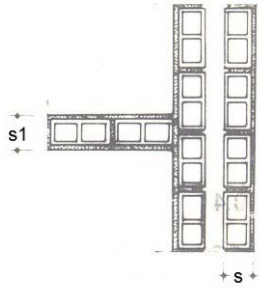
L)	Giunto muri esterni di cui uno isolato								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30		
da 10 a 14	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,36	0,39		
da15 a 19	0,22	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,37		
da 20 a 25	0,21	0,24	0,26	0,28	0,30	0,33	0,35		



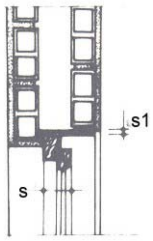
M)	Giunto muro esterno con parete interna								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30		
da 10 a 14	0,16	0,19	0,24	0,28	0,32	0,34	0,37		
da15 a 19	0,15	0,18	0,22	0,26	0,29	0,32	0,35		
da 20 a 25	0,14	0,17	0,21	0,24	0,27	0,29	0,31		



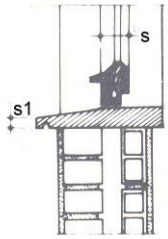
N)	Giunto muro esterno con parete interna (isolamento continuo)								
s[cm]	s_1 [cm]								
	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30		
da 10 a 14	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14		
da15 a 19	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12		
da 20 a 25	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10		



O)	Mazzette finestre								
s_1 [cm]	s [cm]								
	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
da 3 a 5	0,11	0,16	0,22	0,27	0,33	0,38	0,44	0,49	0,55

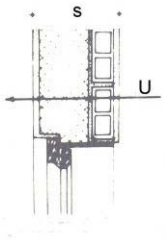


P)	Soglie e davanzali								
s_1[cm]	s [cm]								
	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20		
da 3 a 5	0,12	0,17	0,23	0,28	0,34	0,40	0,46		

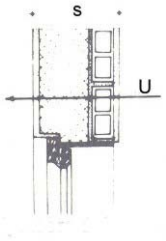


Tab. 3.7 Coefficiente di trasmissione lineare U_l [W/m K] per alcuni giunti (continua)

Q)	Serramento a filo esterno									
s[cm]	Trasmittanza del muro U [W/m² K]									
	0,40 – 0,60	0,65 – 0,85	0,90 – 1,10	1,15 – 1,35	1,40 – 1,60	1,65 – 1,85	1,90 – 2,10		
da 20 a 24	0,10	0,13	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20		
da 25 a 29	0,13	0,16	0,19	0,20	0,22	0,23	0,24		
da 30 a 34	0,15	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,29		
da 35 a 40	0,17	0,22	0,25	0,28	0,30	0,32	0,33		



Q)	Serramento a filo interno									
s[cm]	Trasmittanza del muro U [W/m² K]									
	0,40 – 0,60	0,65 – 0,85	0,90 – 1,10	1,15 – 1,35	1,40 – 1,60	1,65 – 1,85	1,90 – 2,10		
da 20 a 24	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13		
da 25 a 29	0,08	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16		
da 30 a 34	0,09	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19		
da 35 a 40	0,10	0,14	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21		



Tab. 3.8 Permeabilità dei materiali da costruzione

Permeabilità	**μ** (g/m h mm Hg)	**Permeabilità**	**μ** (g/m h mm Hg)
Muratura di mattoni	14÷35 E-3	Poliuretano (40 kg/m³)	2 E-3
Calcestruzzo cementizio	3÷4 E-3	Schiuma PVC (33 kg/m³)	0,35 E-3
Calcestruzzo cellulare	10÷20 E-3	Sughero (175 kg/m³)	3,5 E-3
Calcestruzzo leggero	8÷15 E-3	Schiuma di vetro	0,1÷0,05 E-3
Malta comune	3÷8 E-3	Pannelli di gesso	1,06 E-2
Gesso	13 E-3	Pannelli di cemento amianto	1,70 E-3
Cuscinetto d'aria	90 E-3	Muratura di pietrame	5,67 E-3
Fibre minerali	50÷70 E-3	Mattoni di Klinker	8,50 E-4
Polistirolo espanso (20 kg/m³)		Mattoni forati	8,50 E-3
stato umido	2,25 E-3	Pannelli in fibra di legno	
stato secco	0,80 E-3	d < 15 mm	1,70 E-2
Cartonfeltro bituminato	3,40 E-5	d > 5 mm	4,25 E-2
		Foglio di Alu	0,00

Tab. 3.9 Caratteristiche dei prodotti isolanti minerali

Materiale	**Resistenza**				**C**	**λ** a 20 °C
	AC	AB	F	U	[bar]	[W/m K]
Fibre di vetro	bn	bn	bn	bn	0,002 a 0,5	0,032 a 0,040
Vetro cellulare						
γ = 125kg/m^3	bn	bn	bn	bn		0,050
γ = 135kg/m^3	bn	bn	bn	bn		0,052
Lana di roccia	bn	bn	bn	bn	0,015 a 0,060	0,032 a 0,061
Perlite sciolta	bn	bn	bn	bn		0,050
Perlite conglomerata	bn	bn	bn	bn	15 a 30	0,24 a 0,31
Vermiculite sciolta	bn	bn	bn	bn		0,05 a 0,059
Vermiculite conglomerata	bn	bn	bn	bn	8 a 15	0,13 a 0,23
Argilla espansa sciolta	bn	bn	bn	bn		0,087

Legenda

AC	Agenti chimici	U	Umidità	bn	buona
AB	Agenti biologici	C	Compressione	sf	sufficiente
F	Fuoco			sc	scarsa

Tab. 3.10 Caratteristiche dei prodotti isolanti vegetali

Materiale	**Resistenza**				**C**	**λ** a 20 °C
	AC	AB	F	U	[bar]	[W/m K]
Sughero agglomerato espanso	bn	sf	sc	sc	3	0,038 a 0,043
Pannelli in fibre di legno	bn	sf	sc	sc	2,3	0,054 a 0,067
Pannelli di particelle lignee	bn	sf	sc	sc	2,0	0,15 a 0,16
Pannelli di paglia compressa	bn	sf	sc	sc		0,104 a 0,116
Pannelli in fibre di legno e cemento	bn	sf	bn	sf	2 a 3	0,093 a 0,151
Cellulosa	sf	sf	bn	sf		0,037

Legenda

AC	Agenti chimici	U	Umidità	bn	buona
AB	Agenti biologici	C	Compressione	sf	sufficiente
F	Fuoco			sc	scarsa

Tab. 3.11 Caratteristiche dei prodotti isolanti di sintesi

Materiale	**Resistenza**				**C** [bar]	λ a 20 °C [W/m K]
	AC	AB	F	U		
Polistirolo espanso						
da blocchi ad umido	bn	bn	sf	sc	0,6 a 0,9	0,037 a 0,044
stabilizzato	bn	bn	sf	sc	1,2	0,034 a 0,040
termo-compresso	bn	bn	sf	bn	0,4 a 0,6	0,036 a 0,040
estruso	bn	bn	sf	bn	1,9 a 3,9	0,027 a 0,029
Poliuretano						
y = 35 kg/m³	bn	bn	sf	sf	1,8	0,030
y = 50 kg/m³	bn	bn	sf	sf	3	0,032
y= 60 kg/m³	bn	bn	sf	sf	4	0,034
y = 70 kg/m³	bn	bn	sf	sf	6	0,044
Policloruro di vinyle in schiuma rigida	bn	bn	sf	sf	2 a 12	0,031 a 0,033
Formofenolo in schiuma	bn	bn	sf	sc	2 a 6	0,037 a 0,041
Fornurea in schiuma	bn	bn	sf			0,031

Legenda

AC	Agenti chimici	U	Umidità	bn	buona
AB	Agenti biologici	C	Compressione	sf	sufficiente
F	Fuoco			sc	scarsa

Tab. 3.12 Caratteristiche dei prodotti isolanti prefabbricati

Materiale	**Peso specifico** [kg/m³]	λ a 20 K [W/m K]
Calcestruzzo alleggerito		
con argilla espansa	1000	0,30
	800	0,25
con polistirolo	800	0,25
	500	0,11
con pomice	1000	0,30
	800	0,25
Calcestruzzo cellulare prodotto in stabilimento		
celcon	496 a 800	0,084
durox	592 a 832	0,11
siporex	496	0,10
termolite	452	0,16
siltong	600 a 800	0,12
Calcestruzzo cellulare prodotto in cantiere		
tipo leggero	300 a 600	0,06 a 0,11
tipo medio	700 a 1100	0,12 a 0,24
tipo pesante	1200 a 1600	0,25 a 0,50

Tab. 3.13 - Gradi-giorno di alcune località (D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412 e successive modificazioni)

Comune	Quota [m s.l.m.]	Gradi-giorno	Comune	Quota [m s.l.m.]	Gradi-giorno
Agrigento	230	729	Lecce	49	1153
Alessandria	95	2559	Livorno	3	1408
Avellino	384	1742	Milano	122	2404
Bari	5	1185	Napoli	17	1034
Belluno	383	2936	Palermo	14	751
Benevento	135	1316	Perugia	493	2289
Bergamo	249	2533	Potenza	819	2472
Bologna	54	2259	Reggio Calabria	15	772
Bolzano	262	2791	Roma	20	1415
Caserta	68	1013	Sassari	225	1185
Catania	7	833	Sondrio	307	2755
Cosenza	238	1317	Taranto	15	1071
Firenze	50	1821	Torino	239	2617
Foggia	76	1530	Trento	194	2567
Genova	19	1435	Treviso	15	2378
L'Aquila	714	2514	Trieste	2 .	1929
La Spezia	3	1413	Udine	113	2323
			Venezia	1	2345

Tab. 3.14 - Valori della temperatura massima degli ambienti (DPR n. 412 , 26/08/1993)

Edificio			
Categoria	**Tipo**	**Tmax** [C]	**tolleranza** [C]
E1	edifici per residenze e assimilabili	20	2
E2	edifici per uffici e assimilabili	20	2
E3	edifici per ospedali	20 *	2
E4	edifici per attività ricreative o di culto e assimilabili	20	2
E5	edifici per attività commerciali e assimilabili	20	2
E6	edifici per attività sportive	20 *	2
E7	edifici per attività scolastiche a tutti i livelli	20	2
E8	edifici per attività industriali e artigianali e assimilabili	18 *	2

(*) Il Regolamento DPR n. 412 del 26/8/1993 per questi edifici ammette la concessione di deroghe motivate al valore di Tmax.

Tab. 3.15 - Valori limite della Dotazione di calore disperdibile di Cd in W/m³K ai sensi della legge 10 del 9 gennaio 1991 (L n. 10, 09/01/1991)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	0,49	0,49	0,46	0,46	0,42	0,42	0,34	0,34	0,30	0,30
≥ 0,9	1,16	1,16	1,08	1,08	0,95	0,95	0,78	0,78	0,73	0,73

Tabella 3.16 - Valori limite dell'indice di prestazione energetica EP, in kWh/m² anno, per la climatizzazione invernale, per Edifici della classe E 1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme (DL n. 311, 29/12/2006)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	10	10	15	15	25	25	40	40	55	55
≥ 0,9	45	45	60	60	85	85	110	110	145	145

Tabella 3.17 - Valori limite, applicabili dal 1° gennaio 2008, dell'indice di prestazione energetica EP, in kWh/m² anno, per la climatizzazione invernale, per Edifici della classe E 1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme (DL n. 311, 29/12/2006)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	9,5	9,5	14	14	23	23	37	37	52	52
≥ 0,9	41	41	55	55	78	78	100	100	133	133

Tabella 3.18 - Valori limite, applicabili dal 1° gennaio 2010, dell'indice di prestazione energetica EP, in kWh/m² anno, per la climatizzazione invernale, per Edifici della classe E 1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme (DL n. 311, 29/12/2006)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	8,5	8,5	12,8	12,8	21,3	21,3	34	34	46,8	46,8
≥ 0,9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116

Tabella 3.19 - Valori limite dell'indice di prestazione energetica EP per la climatizzazione invernale, in kWh/m³ anno, per tutti gli altri edifici (DL n. 311, 29/12/2006)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	2,5	2,5	4,5	4,5	7,5	7,5	12	12	16	16
≥ 0,9	11	11	17	17	23	23	30	30	41	41

Tabella 3.20 - Valori limite, applicabili dal 1° gennaio 2008, dell'indice di prestazione energetica EP per la climatizzazione invernale, in kWh/m³ anno, per tutti gli altri edifici (DL n. 311, 29/12/2006)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	2,5	2,5	4,5	4,5	3,5	6,5	10,5	10,5	14,5	14,5
≥ 0,9	9	9	14	14	20	20	26	26	36	36

Tabella 3.21 - Valori limite, applicabili dal 1° gennaio 2010, dell'indice di prestazione energetica EP per la climatizzazione invernale, in kWh/m³ anno, per tutti gli altri edifici (DL n. 311, 29/12/2006)

S/V	**Zona Climatica**									
	A	B		C		D		E		F
	gradi giorno	gradi giorno		gradi giorno		gradi-giorno		gradi-giorno		gradi giorno
	fino a 600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	oltre 3000
≤ 0,2	2,0	2,0	3,6	3,6	6	6	9,6	9,6	12,7	12,7
≥ 0,9	8,2	8,2	12,8	12,8	17,3	17,3	22,5	22,5	31	31

- S, espressa in metri quadrati, è la superficie che delimita verso l'esterno (ovvero verso ambienti non dotati di impianto di riscaldamento), il volume V;
- V è il volume lordo, espresso in metri cubi, delle parti di edificio riscaldate, definito dalle superfici che lo delimitano.

Per valori di S/V compresi nell'intervallo 0,2-0,9 e, analogamente, per gradi giorno (GG) intermedi ai limiti delle zone climatiche riportati in tabella si procede mediante interpolazione lineare. Per località caratterizzate da un numero di gradi giorno superiori a 3.001 i valori limite sono determinati per estrapolazione lineare, sulla base dei valori fissati per la zona climatica E.

Tabella 3.22 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache verticali espressa in W/m²K (DL n. 311, 29/12/2006)

Zona climatica.	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m²K)
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Tabella 3.23 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura espressa in W/m²K (DL n. 311, 29/12/2006)

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m²K)
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0.38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

Tabella 3.24 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento espressa in W/m²K (DL n. 311, 29/12/2006)

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m²K)
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

Tabella 3.25 Valori limite della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi espressa in W/m²K (DL n. 311, 29/12/2006)

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m²K)
A	5,5	5,0	4,6
B	4,0	3,6	3,0
C	3,3	3,0	2,6
D	3,1	2,8	2,4
E	2,8	2,5	2,2
F	2,4	2,2	2,1

Tabella 3.26 Valori limite della trasmittanza centrale termica U dei vetri espressa in W/m²K (DL n. 311, 29/12/2006)

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m²K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m²K)
A	5,0	4,5	3,7
B	4,0	3,4	2,7
C	3,0	2,3	2,1
D	2,6	2,1	1,9
E	2,4	1,9	1,7
F	2,3	1,7	1,3

Tabella 3.27 Limiti di esercizio degli impianti termici (DPR n. 412 , 26/08/1993)

	Zona Climatica					
	A	B	C	D	E	F
periodo	1° dicembre	1° dicembre	15 novembre	1° novembre	15 ottobre	Nessuna limitazione
	15 marzo	31 marzo	31 marzo	15 aprile	15 aprile	
n. ore	6	8	10	12	14	Nessuna limitazione
n. ore totali	630	968	1370	1992	2562	

Tab. 3.28 Condizioni ambientali di equivalente comfort termico

Temperatura secca dell'aria [°C]	**Grado igrometrico** [%]	**Velocità relativa dell'aria e del soggetto** [m/s]	**Temperatura media delle pareti** [°C]	**Temperatura del pavimento** [°C]
18	50	0	18	18
20	40	0	17	17
22	55	3	22	22

Tab. 3.29 Temperatura ed umidità relativa dell'aria

	Temperatura interna [°C]	**Umidità relativa dell'aria** [%]
Ambienti di lavoro	+ 18 a 20	50 a 70
Locali per esposizione	+ 10 a 20	50
Uffici	+ 18 a 20	50 a 60
Docce	+ 22 a 25	70 a 85
Fabbriche ed ambienti di lavoro		
per lavori manuali leggeri	+ 16 a 22	60
per lavori manuali pesanti	+ 12 a14	50 a 60
fonderie	+ 20 a 25	80 a 90
falegnamerie, ecc.	+ 20	50 a 60
reparti verniciatura	+ 25 a 40	65 a 79
reparti verniciatura Cl spruzzo	+ 25 a 40	65 a 79
locali con grande spazio libero		
(industria metallurgica)	+ 10 a 20	50
Esercizi pubblici	+ 18	55
Garage	+ 5	50
Negozi, locali adibiti ad usi commerciali	+ 20	50 a 60
Cinematografi	+ 18	60 a 70
Ospedali, cliniche		
sale operatorie	+ 24 a :30	40 a 60
corsie, locali da bagno	+ 20 a :2	50 a 60
sale di soggiorno	+ 20	50
laboratori per analisi	+ 24	30 a 45
Scuole		
aule, auditori	+ 20	60
corridoi e scale	+ 1 8 a 20	50
gabinetti	+ 15	
lavatoi e bagni	+ 20	80 a 90
Piscine (piscine coperte)	+ 22 a 28	76 a 80
Teatri	+ 18	60 a 70
Locali per assemblee	+ 18	60 a 70
Locali da bagno e docce	+ 20 a 25	70 a 80
Lavanderie	+ 20 a 25	70 a 85
Abitazioni		
ambienti di soggiorno e lavoro	+ 18 a 20	50 a 60
camere da letto	+ 15 a18	55 a 70
cucine e cucine abitabili	+ 16 a18	55 a 80
stanze da bagno	+ 22	

3.4 Materiali isolanti

Nell'ambito della termodinamica l'isolante è un materiale caratterizzato da un basso valore della conduttività e quindi capace di ridurre il flusso termico attraverso una parete di separazione di due ambienti a differente temperatura.

Nel campo delle applicazioni edili, in particolare, si definiscono isolanti termici i materiali caratterizzati da una conduttività inferiore a 0,116 W/m K

L'isolante termico per eccellenza è l'aria secca in stato di quiete, ed è proprio l'aria il componente che consente lo sviluppo delle notevoli proprietà isolanti di questi materiali.

L'impiego dei materiali isolanti nelle chiusure d'ambito esterno è giustificato oltre che da preoccupazioni di natura economica anche dalla necessità di assicurare un adeguato benessere fisiologico agli utenti dello spazio architettonico e di eliminare le cause di umidità nelle tamponature, connesse ai fenomeni di condensa.

Gli isolanti termici, oltre alla proprietà specifica di un basso valore della conduttività, devono possedere, in misura maggiore o minore in relazione alla loro destinazione d'uso, requisiti di durabilità, impermeabilità, incombustibilità e buona resistenza meccanica.

L'acqua che può infiltrarsi nell'isolante termico, possedendo una conduttività superiore all'aria, ne riduce il potere isolante facendo aumentare il flusso termico attraverso la parete.

Quando l'isolante è caratterizzato da scarsa impermeabilità e da un basso valore della permeabilità al vapor d'acqua, deve essere protetto da un idoneo strato di materiale impermeabile. Tale strato, definito *barriera al vapore*, può essere costituito da un foglio di plastica, carta catramata, fogli sottilissimi di alluminio.

Gli isolanti termici possono essere classificati secondo la loro struttura (granulare, alveolare, fibrosa, ecc.), secondo la loro natura (vegetale, minerale, di sintesi, ecc.), ovvero con riferimento ad altri requisiti quali la resistenza agli agenti chimici, al fuoco, all'umidità.

Nella pratica edilizia la classificazione più comunemente adottata tiene conto della natura del materiale. In tal senso i materiali isolanti si possono classificare in isolanti minerali, isolanti vegetali, isolanti sintetici, complessi isolanti prefabbricati.

Per isolanti minerali si intendono tutti quei prodotti i cui componenti di base sono totalmente, o in percentuale maggiore, di tipo minerale (perlite, vermiculite, vetro cellulare, ecc.).

Gli isolanti vegetali sono quei materiali i cui componenti di base sono essenzialmente di origine vegetale (pannelli di fibre di legno, di paglia compressa, ecc.).

Gli isolanti sintetici sono il prodotto della chimica moderna e derivano, per la massima parte, dalla lavorazione dei distillati del petrolio.

I complessi isolanti sono quei prodotti prefabbricati costituiti dall'insieme di un isolante termico e di uno o due paramenti superficiali in pannelli o fogli. Con tale assemblaggio è possibile migliorare alcuni requisiti del materiale isolante, quali la resistenza al fuoco, l'aspetto estetico, la impermeabilità.

Nelle tabelle 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12 sono riportate le principale caratteristiche degli isolanti minerali, vegetali, di sintesi e prefabbricati, di più largo impiego nell'edilizia.

Per quanto attiene la scelta del materiale coibente, osserviamo che generalmente nelle costruzioni prefabbricate, considerata l'alta conducibilità termica del calcestruzzo normalmente impiegato negli elementi di fabbrica di confine, verticali ed orizzontali, vengono utilizzati coibenti con alto potere isolante e, quindi, con spessori contenuti. In particolare, nei pannelli verticali multistrato si impiegano coibenti rigidi quali il polistirolo ed il poliuretano espansi mentre nei pannelli orizzontali si impiegano calcestruzzi cellulari ovvero alleggeriti con espansi minerali.

Nelle costruzioni tradizionali per le tamponature, normalmente del tipo a doppia fodera, vengono utilizzati i materassini di lane minerali e gli espansi sintetici; per le coperture, invece, si preferiscono i conglomerati leggeri a base di vermiculite, perlite e argilla espansa.

3.5 I principi di base della trasmissione del calore

Durante la stagione invernale l'involucro dell'edificio è interessato dal passaggio del calore prodotto all'interno verso l'ambiente esterno, caratterizzato da una temperatura più bassa.

La trasmissione del calore attraverso la tamponatura, dall'ambiente a temperatura maggior all'ambiente a temperatura minore, può avvenire per *convezione*, per *irraggiamento* e per *conduzione.*

Nella ***convezione***, modo di propagazione tipico dei fluidi come l'aria, la propagazione del calore avviene con trasporto macroscopico di materia. Mentre nei fluidi si può avere anche trasporto di calore per convezione, il contrario non avviene mai nei solidi, nei quali la convezione non può aver luogo. La convezione costituisce il modo di trasporto di calore più sfruttato nelle applicazioni, come nelle caldaie e negli impianti di riscaldamento centralizzati. La convezione può essere naturale o forzata. Nella convezione naturale le porzioni di fluido più vicine alla sorgente di calore, quali i radiatori dell'impianto di riscaldamento, si dilatano diventando più leggere e meno dense di quelle sovrastanti. Le porzioni di fluido più calde prendono il posto di quelle più fredde, e viceversa, dando così luogo all'instaurarsi di una corrente fluida con trasporto di calore. Nel caso della convezione forzata, le correnti fluide sono provocate artificialmente e per effettuare il trasporto di calore è necessario compiere un lavoro esterno per mantenere le correnti nel fluido.

Nella ***conduzione*** la trasmissione di calore avviene in un mezzo solido, liquido o gassoso, dalle regioni a più alta temperatura verso quelle con temperatura minore per contatto molecolare diretto. Il principio alla base della conduzione è diverso a seconda della struttura fisica del corpo: nei gas la conduzione è dovuta alla diffusione atomica e molecolare, nei liquidi e nei solidi è dovuta ad onde elastiche; nei materiali metallici è dovuto principalmente alla diffusione degli elettroni liberi mentre è trascurabile il contributo dell'oscillazione elastica del reticolo cristallino. La trasmissione per conduzione avviene quando si mettono due corpi a contatto uno con l'altro: il calore passa naturalmente dal corpo più caldo al corpo più freddo.

Nella conduzione il trasporto di calore avviene senza spostamento di massa. Un corpo caldo, i cui atomi vibrano in maniera sensibile, quando viene messo a contatto con un corpo più freddo cede parte della sua energia cinetica agli atomi del corpo più freddo. In questo modo anche questi ultimi iniziano a vibrare in maniera maggiore, segno che inizia ad aumentare la temperatura del corpo più freddo. Maggiore è la durata del contatto tra i due corpo, più elevata è l'energia cinetica che viene trasferita dagli atomi del corpo più caldo a quelli del corpo più freddo. Tale trasferimento dura fino a quando le due energie cinetiche non sono uguali, cioè fino a quando i due corpi non raggiungono la stessa temperatura. Ad esempio, riscaldando una sbarretta metallica ad una delle sue estremità, il calore si trasmette per conduzione progressivamente fino all'estremità opposta grazie alla propagazione delle vibrazioni tra tutti gli atomi che stanno vicini tra loro.

La velocità con la quale il calore si propaga varia da sostanza a sostanza. Nei metalli è elevata, mentre in altre sostanze come, ad esempio, il vetro, la plastica, ecc., è molto più piccola. Per questo motivi i primi sono definiti buoni conduttori del calore.

La modalità con cui avviene lo scambio di calore è paragonabile a quella che avviene nella conduzione elettrica: tutti i materiali che sono buoni conduttori elettrici, come il rame, l'argento, l'alluminio e i metalli in genere, sono anche buoni conduttori di calore. Reciprocamente tutti i buoni isolanti elettrici, come la plastica, la ceramica e il vetro, sono anche buoni isolanti termici.

Nell'***irraggiamento*** la trasmissione di energia avviene attraverso l'emissione e l'assorbimento di radiazione elettromagnetica. L'irraggiamento è una forma di trasmissione dell'energia che, al contrario della conduzione e della convezione, non richiede contatto diretto tra gli scambiatori e non necessita di un mezzo per propagarsi.

In generale l'irraggiamento avviene tramite la radiazione di corpo nero dal corpo a temperatura

maggiore che irradia più energia, a quello a temperatura minore che ne assorbe finché entrambi non raggiungono la stessa temperatura. In tal caso l'energia irradiata e quella assorbita si compensano. L'irraggiamento si presenta ad ogni temperatura e interessa ogni materiale, solido, liquido e gassoso.

La quantità di calore emessa da un corpo per irraggiamento è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura. Per questo motivo a basse temperature l'irraggiamento è responsabile di una frazione trascurabile del flusso di calore rispetto alla convezione e alla conduzione, ma al crescere della temperatura la sua importanza aumenta rapidamente fino a diventare il principale artefice della trasmissione del calore per temperature medio-alte.

Dal punto di vista fisico l'irraggiamento consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche generate dagli atomi e dalle molecole del corpo che emettono fotoni di lunghezza d'onda proporzionale alla loro temperatura: per esempio i corpi a temperatura ambiente emettono fotoni nella gamma degli infrarossi, che per questo sono anche detti raggi termici; corpi molto freddi irradiano microonde (quelli vicini allo zero assoluto semplici onde radio), mentre i corpi molto caldi arrivano ad emettere luce visibile, dapprima rossa (temperatura del cosiddetto calor rosso, circa 700 C) poi sempre più bianca (temperatura del calor bianco, circa 1200 C).

Con riferimento ad una parete monostrato, costituita da materiale omogeneo (Fig. 3.1), di separazione tra l'ambiente interno, a temperatura Ti, e l'ambiente esterno, a temperatura Te, in condizione invernale (Ti>Te) e in regime stazionario, ovvero con il campo termico indipendente dal tempo, si instaura uno scambio di calore tra l'interno e l'esterno attraverso la parete che avviene in tre fasi: dall'ambiente interno al paramento interno della parete, dal paramento interno al paramento esterno della parete, dal paramento esterno della parete all'ambiente esterno.

Nella prima fase lo scambio avviene tra l'ambiente interno ed il paramento interno della parete per convezione e irraggiamento, ed è espresso dalla relazione:

$$\Phi = \alpha_i * S * (T_i - \vartheta_i)$$

dove:

Φ	è il flusso termico	in [W]
α_i	è il coefficiente di adduzione superficiale interno	in [W/m^{2}K]
S	è la superficie della parete	in [m^2]
T_i	è la temperatura interna	in [C]
θ_i	è la temperatura del paramento interno della parete	in [C]

Dal punto di vista fisico il coefficiente di adduzione superficiale interno esprime il flusso termico che si istaura, tra l'ambiente interno ed il paramento interno della parete, per ogni metro quadrato di parete e per ogni grado di salto termico.

Il coefficiente di adduzione superficiale non dipende dal materiale della parete ma dalla direzione del flusso termico (orizzontale, verticale verso l'alto e verticale verso il basso) e dalla velocità dell'aria che lambisce la parete. L'influenza della velocità dell'aria sul valore di α_i risulta sensibile per valori della velocità superiori ai 4 m/s; considerato, pertanto, che nell'ambiente confinato la velocità dell'aria è certamente inferiore ai 4 m/s, si può ritenere α_i dipendente soltanto dalla direzione del flusso termico. I valori di α_i sono riportati nella Tabella 3.2.

L'inverso del coefficiente di adduzione superficiale interno, $1/\alpha_i$ [m^{2}K/W], rappresenta la resistenza superficiale interna.

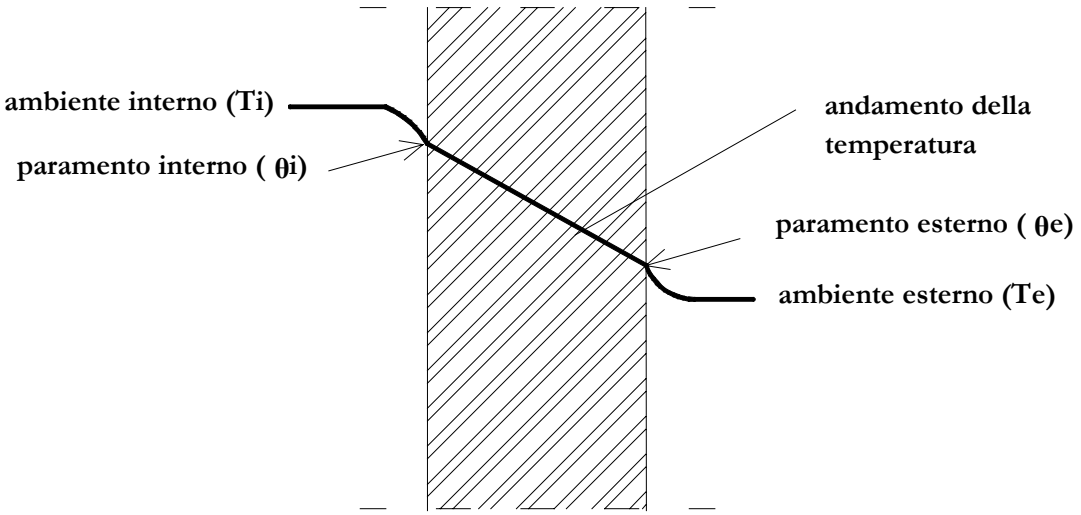


Fig. 3.1 – andamento della temperatura per una parete omogenea (ad esempio in gesso)

Nella seconda fase lo scambio avviene tra il paramento interno ed il paramento esterno della parete per conduzione, ed è espresso dalla relazione

$$\Phi = \frac{s_i}{\lambda_i} * S * \left(\vartheta_i - \vartheta_e\right)$$

dove:

Φ	è il flusso termico	in [W]
λ_i	è il coefficiente di conduttività termica del materiale	in [W/mK]
s_i	è lo spessore della parete	in [m]
S	è la superficie della parete	in [m^2]
θ_i	è la temperatura del paramento interno della parete	in [C]
θ_e	è la temperatura del paramento esterno della parete	in [C]

Dal punto di vista fisico il coefficiente di conduttività termica esprime il flusso termico che si istaura, tra il paramento interno ed il paramento esterno della parete, per ogni metro quadrato di parete e per ogni grado di salto termico e per ogni metro di spessore della parete.

Il coefficiente di conduttività termica dipende soltanto dal materiale costitutivo della parete. I valori di λ_i sono riportati nella Tabella 3.3.

Il rapporto s_i/λ_i [m^2K/W] rappresenta la resistenza termica offerta dalla sola parete al passaggio di calore.

Nella terza fase lo scambio avviene tra il paramento esterno della parete e l'ambiente esterno per convezione e irraggiamento, ed è espresso dalla relazione:

$$\Phi = \alpha_e * S * \left(\vartheta_e - T_e\right)$$

dove:

Φ	è il flusso termico	in [W]
α_e	è il coefficiente di adduzione superficiale esterno	in [W/m^2K]
S	è la superficie della parete	in [m^2]
T_e	è la temperatura esterna	in [C]
θ_e	è la temperatura del paramento interno della parete	in [C]

Dal punto di vista fisico il coefficiente di adduzione superficiale esterno esprime il flusso termico che si istaura, tra il paramento esterno della parete e l'ambiente esterno, per ogni metro quadrato di parete e per ogni grado di salto termico.

Il coefficiente di adduzione superficiale non dipende dal materiale della parete ma dalla direzione del flusso termico (orizzontale, verticale verso l'alto e verticale verso il basso) e dalla velocità dell'aria che lambisce la parete. L'influenza della velocità dell'aria sul valore di α_e risulta sensibile per valori della velocità superiori ai 4 m/s. I valori di α_e sono riportati nella Tabella 3.2.

L'inverso del coefficiente di adduzione superficiale esterno, $1/\alpha_e$ [m^2K/W], rappresenta la resistenza superficiale interna.

In condizione di regime stazionario, ovvero con il campo termico indipendente dal tempo, I tre flussi sono uguali per cui si può scrivere:

$$(T_i - \vartheta_i) = \frac{\Phi}{\alpha_i * S}$$

$$(\vartheta_i - \vartheta_e) = \frac{\Phi * \lambda_i}{s_i * S}$$

$$(\vartheta_e - T_e) = \frac{\Phi}{\alpha_e * S}$$

e, quindi, sommando membro a membro

$$(T_i - T_e) = \frac{\Phi}{S} * \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

e posto

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

si ha l'equazione generale che regola il flusso termico dall'interno all'esterno:

$$\Phi = U * S * (T_i - T_e)$$

Il coefficiente U [W/m^2K] è il coefficiente di trasmissione termica della parete.

Nel caso più generale di parete pluristrato, con strati in materiale omogeneo e strati in materiale non omogeneo e con intercapedine, la resistenza termica della parete, R=1/U, diventa:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum \frac{1}{C_j} + r_a + \frac{1}{\alpha_e}$$

dove:

α_i	è il coefficiente di adduzione superficiale interno	in [W/m^2K]
α_e	è il coefficiente di adduzione superficiale esterno	in [W/m^2K]
s_i	è lo spessore dello strato omogeneo i-mo	in [m]
λ_i	è il coefficiente di conduttività termica dello strato i-mo	in [W/mK]
C_j	è il coefficiente di conduttanza dello strato j-mo non omogeneo	in [W/ m^2K]
r_a	è la resistenza termica della lama d'aria dell'intercapedine	in [m^2K/W]

Il coefficiente di conduttanza degli strati non omogenei esprime, dal punto di vista fisico, il flusso termico che si istaura, tra il paramento interno ed il paramento esterno dello strato, per ogni metro quadrato di parete e per ogni grado di salto termico tra i due paramenti. I valori di Cj sono riportati nella Tabella 3.4.

La resistenza termica della lama d'aria esprime, dal punto di vista fisico, la resistenza termica offerta dalla sola lama d'aria al passaggio di calore. I valori di r_a sono riportati nella tabella 3.5.

In conclusione, può affermarsi che il flusso termico Φ che si istaura attraverso una tamponatura è direttamente proporzionale al salto termico esistente tra lo spazio interno e quello estero, è direttamente proporzionale alla superficie S della parete ed è inversamente proporzionale alla resistenza termica della parete R, comprensiva delle resistenze termiche superficiali.

Nella Tabella 3.30 è riportato, a titolo di esempio, il calcolo del coefficiente di trasmissione termica di una parete pluristrato ed il flusso che si istaura per metro quadrato di parete.

Il flusso termico attraverso la parete determina salti termici sulle facce di ogni singolo strato che dipende, ovviamente, dal coefficiente di conduttività termica e dallo spessore dello strato. In particolare, la caduta di temperatura sarà tanto maggiore quanto minore è λ_i e quanto maggiore è lo spessore s_i dello strato. La caduta di temperatura tra le due facce dei vari strati che formano la tamponatura risulta, pertanto, direttamente proporzionale alla resistenza termica offerta dallo stesso strato.

In particolare, la caduta di temperatura potrà essere calcolata con le seguenti relazioni:

- per gli strati omogenei

$$\Delta\theta_i = \frac{\Phi}{S} * \frac{s_i}{\lambda_i}$$

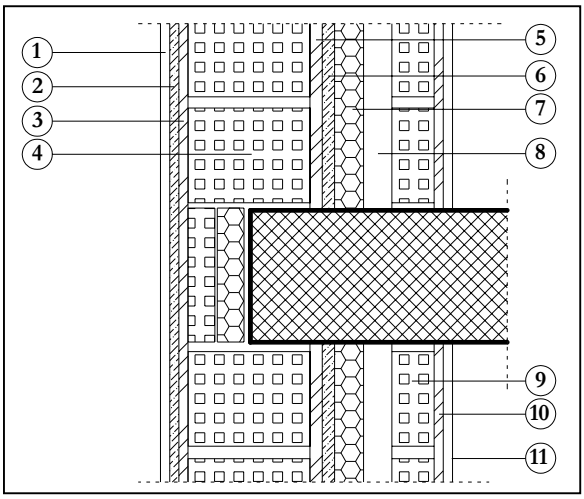
- per gli strati non omogenei

$$\Delta\theta_j = \frac{\Phi}{S} * \frac{1}{C_j}$$

- per le lame d'aria

$$\Delta\theta_i = \frac{\Phi}{S} * r_a$$

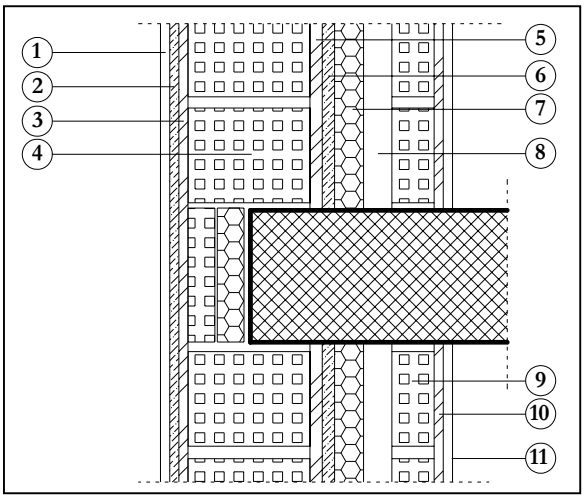
Nella Tabella 3.31 è riportato il calcolo della temperatura superficiale negli strati che formano la parete.



1. Strato di finitura esterno continuo con idropittura traspirante e idrorepellente
2. Strato di collegamento con intonaco di calce e sabbia, sp. 0,5 cm;
3. Strato di regolarizzazione con intonaco di malta bastarda, sp. 1,5 cm;
4. Strato portante con blocchi di laterizi forati 25x25 cm, sp. 25 cm;
5. Strato di regolarizzazione con intonaco di malta di cemento sp. 1,5 cm;
6. Strato di collegamento con collante
7. Strato di coibentazione in vetro cellulare; sp. 1,5 cm;
8. Intercapedine, sp. 3 cm;
9. Strato portante interno con blocchi di laterizi forati 8x12 cm, sp. 8 cm;
10. Strato di regolarizzazione con intonaco di cemento, sp. 1,5;
11. Strato di finitura interno continuo con idropittura traspirante.

Strato esterno di intonaco di calce e sabbia	s_i = 0.005 m	λ_i=0,87	s_i/λ_i=0,0057
Strato esterno di intonaco di malta bastarda	s_i = 0.015 m	λ_i=1,40	s_i/λ_i=0,0107
Strato con blocchi di laterizi 25x25	s_i = 0.250 m	C_j=2,50	$1/C_j$ = 0,4
Strato interno di intonaco di cemento	s_i = 0.015 m	λ_i=1,40	s_i/λ_i=0,0107
Strato coibente con vetro cellulare	s_i = 0.015 m	λ_i=0,050	s_i/λ_i=0,3
Lama d'aria	s_i = 0.003 m		r_a =0,16
Strato con blocchi di laterizi 8x12	s_i = 0.080 m	C_j=4,24	$1/C_j$ =0,2358
Strato interno di intonaco di cemento	s_i = 0.015 m	λ_i=1,40	s_i/λ_i=0,0107
Resistenze termiche superficiali			$1/\alpha_i+1/\alpha_e$=0,17
Resistenza termica della parete			**R=1,2979**
Coefficiente di trasmissione termica della parete			**U=0,7705**
Temperatura interna (edificio E1)	**Ti = 20 C**		
Temperatura esterna (città di Milano)	**Te = - 5 C**		
Flusso per metro quadrato di parete	**Φ= 19,2625 W/m²**		

Tabella 3.30 – Coefficiente di trasmissione termica di una parete pluristrato.



1. Strato di finitura esterno continuo con idropittura traspirante e idrorepellente
2. Strato di collegamento con intonaco di calce e sabbia, sp. 0,5 cm;
3. Strato di regolarizzazione con intonaco di malta bastarda, sp. 1,5 cm;
4. Strato portante con blocchi di laterizi forati 25x25 cm, sp. 25 cm;
5. Strato di regolarizzazione con intonaco di malta di cemento sp. 1,5 cm;
6. Strato di collegamento con collante
7. Strato di coibentazione in vetro cellulare; sp. 1,5 cm;
8. Intercapedine, sp. 3 cm;
9. Strato portante interno con blocchi di laterizi forati 8x12 cm, sp. 8 cm;
10. Strato di regolarizzazione con intonaco di cemento, sp. 1,5;
11. Strato di finitura interno continuo con idropittura traspirante.

Temperatura interna (edificio E1)	**Ti = 20 C**		
Resistenza termica della parete	**R=1,2979**		
Coefficiente di trasmissione termica della parete	**U=0,7705**		
Flusso per metro quadrato di parete	**Φ= 19,2625 W/m²**		
Resistenza termica superficiale interna	$1/\alpha_i$ = 0,11	ΔT = 2,1189	θi = 17,8811
Strato interno di intonaco di cemento	s_i/λ_i=0,0107	ΔT = 0,2061	θ_1 = 17,6750
Strato con blocchi di laterizi 8x12	$1/C_j$ =0,2358	ΔT = 4,5421	θ_2 = 13,1329
Lama d'aria	r_a =0,16	ΔT = 3,0820	θ_3 = 10,0509
Strato coibente con vetro cellulare	s_i/λ_i=0,3	ΔT = 5,7787	θ_4 = 4,2721
Strato interno di intonaco di cemento	s_i/λ_i=0,0107	ΔT = 0,2061	Θ_5 = 4,0659
Strato con blocchi di laterizi 25x25	$1/C_j$ = 0,4	ΔT = 7,7050	Θ_6 = -3,6391
Strato esterno di intonaco di malta bastarda	s_i/λ_i=0,0107	ΔT = 0,2061	Θ_e = -3,8452
Resistenza termica superficiale esterna	$1/\alpha_e$=0,06	ΔT = 1,1557	T_e = - 5,0009
Temperatura esterna (città di Milano)	**Te = - 5 C**		

Tabella 3.31 – Cadute di temperatura all'interno della parete pluristrato

3.6 I ponti termici

L'elemento di fabbrica di confine presenta una serie di punti critici, definiti ponti termici, dovuti a discontinuità, sia geometriche che materiche, nell'organizzazione strutturale della parete. I ponti termici rappresentano vie privilegiate di dispersione del calore in quanto sono caratterizzati da una minore resistenza termica rispetto alla restante parte dell'elemento di fabbrica (Fig. 3.2).

Discontinuità di tipo geometrico si hanno, ad esempio, in corrispondenza degli angoli e delle intersezione degli elementi costruttivi; discontinuità di tipo materiche si hanno, ad esempio, in corrispondenza dei pilastri e delle travi in c.a. inseriti nell'involucro edilizio, in corrispondenza dei collegamenti degli infissi con la tamponatura, ecc..

Nella Tabella 3.7 sono indicati alcuni tipi di ponti termici ricorrenti nella totalità degli involucri edilizi ed i relativi valori di U_l.

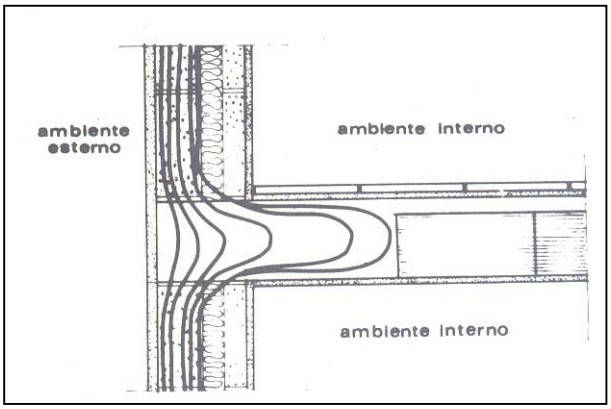


Fig. 3.2 – andamento delle isoterme in un ponte termico

La risoluzione del problema sta in una corretta progettazione dell'involucro, adottando ad esempio una coibentazione a cappotto (Fig. 3.3) o una parete ventilata (Fig. 3.4), prevedendo l'impiego di serramenti con profilo a taglio termico, prevedendo l'impiego di vetri camera.

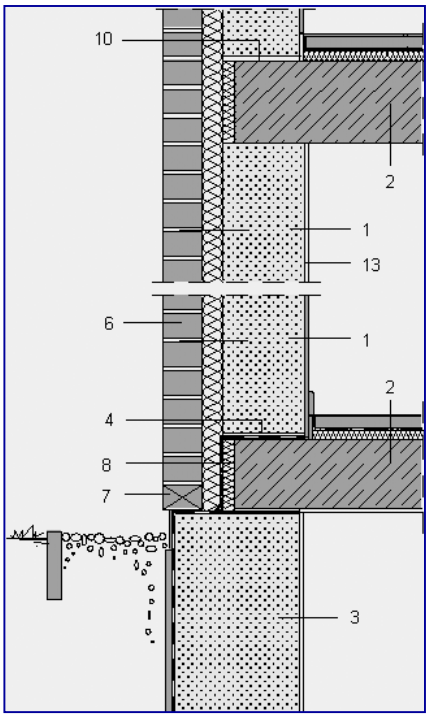


Fig. 3.3 – Parete con coibentazione a cappotto

1. fodera interna in cls. Cellulare
2. impalcato in c.a
3. muratura in cls. Cellulare
4. strato impermeabile
6. fodera in mattoni
7. cordolo
8. strato coibente
10. sigillante
13. intonaco interno

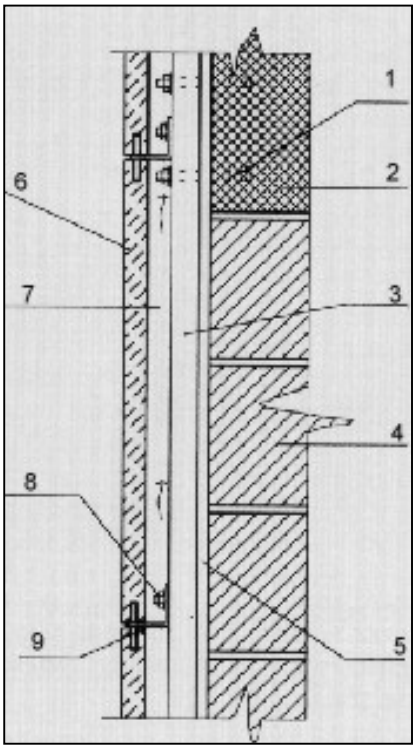


Fig. 3.4 – Parete ventilata

1	tasselli ad espansione per fissaggio profilo verticale
2	trave in c.a.
3	profilo verticale in acciaio inox
4	tamponatura
5	intonaco di regolarizzazione
6	rivestimento in materiale lapideo
7	intercapedine ventilata
8	bullone, rondella e dado per il fissaggio della staffa al profilo
9	staffa in acciaio inox con piolo per il fissaggio della lastra

3.7 Il progetto dell'isolamento termico nel rispetto delle disposizioni di legge

La legge 9 gennaio 1991 n. 10 "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia", il DPR 26 agosto 1993 n. 412 "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia" e il DL 29 dicembre 2006 n. 311 "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005 n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/Ce, relativa al rendimento energetico nell'edilizia", al fine di contenere i consumi energetici impongono il rispetto di specifiche norme nella progettazione, nell'installazione, nell'esercizio e nella manutenzione degli impianti termici degli edifici pubblici e privati.

La normativa, in particolare, suddivide il territorio nazionale in sei zone climatiche che, indipendentemente dalla localizzazione geografica, sono definite in funzione dei gradi-giorno delle località (Tab. 3.13).

La zona climatica A (Tab. 3.15) comprende tutti i Comuni con gradi-giorno inferiori a 600; la zona B i Comuni con gradi-giorno compresi nell'intervallo 601-900; la zona C i Comuni con gradi-giorno compresi nell'intervallo 901-1400; la zona D i Comuni con gradi-giorno compresi nell'intervallo 1401-2100; la zona E i Comuni con gradi-giorno compresi nell'intervallo 2101-3000; la zona F i Comuni con gradi-giorno oltre 3000.

La normativa, inoltre, in relazione alla categoria dell'edificio fissa i valori massimi della temperatura da mantenere all'interno degli ambienti durante il periodo di funzionamento dell'impianto di climatizzazione dell'edificio (Tab. 3.14). In particolare la norma individua le seguenti otto categorie di edifici:

- La categoria E.1 comprende gli edifici adibiti a residenza e assimilabili:
  E.1 (1) abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rura1i, collegi, conventi, case di pena, caserme;
  E.1 (2) abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria, quali case per vacanze, fine

settimana e simili;
E.1 (3) edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari.

- La categoria E.2 comprende gli edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico;
- La categoria E.3 comprende gli edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l'assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici.
- La categoria E.4 comprende gli edifici adibiti ad attività ricreative o di culto e assimilabili:
  E.4 (l) quali cinema e teatri, sale di riunioni per congressi;
  E.4 (2) quali mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto;
  E.4 (3) quali bar, ristoranti, sale da ballo.
- La categoria E.5 comprende gli edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili: quali negozi, magazzini di vendita all'ingrosso o al minuto, supermercati, esposizioni.
- La categoria E.6 comprende gli edifici adibiti ad attività sportive:
  E.6 (l) piscine, saune e assimilabili;
  E.6 (2) palestre e assimilabili;
  E.6 (3) servizi di supporto alle attività sportive.
- La categoria E.7 comprende gli edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili.
- La categoria E.8 comprende gli edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.

La norma, inoltre, stabilisce che qualora un edificio sia costituito da parti individuali come appartenenti a categorie diverse, le stesse devono essere considerate separatamente e cioè ciascuna nella categoria che le compete.

In relazione alle zone climatiche la normativa fissa anche i limiti di esercizio degli impianti termici (Tab. 3.27):

- Per la zona A un numero totale di ore di funzionamento pari a 630
- Per la zona B un numero totale di ore di funzionamento pari a 968
- Per la zona C un numero totale di ore di funzionamento pari a 1370
- Per la zona D un numero totale di ore di funzionamento pari a 1992
- Per la zona E un numero totale di ore di funzionamento pari a 2562
- Per la zona F nessuna limitazione.

Il Regolamento di cui al DPR n. 412 fissava, inoltre, il coefficiente di dispersione volumica dell'involucro dell'edificio

$$C_d = \frac{\Phi}{V * \Delta T}$$

che esprime il flusso disperdibile per metro cubo di edificio riscaldato e per ogni grado di salto termico.

In merito al coefficiente di dispersione volumica il regolamento stabiliva poi che il C_d non doveva superare i limiti fissati da DM 30 luglio 1986, (Tab. 3.15), in funzione della zona climatica di localizzazione dell'edificio e del coefficiente di forma S/V [m^{-1}], rapporto tra la superficie S dell'involucro che delimita le parti di edificio riscaldato ed il volume lordo V di tali parti.

Si doveva quindi procedere al progetto dell'isolamento termico dell'involucro dell'edificio in modo da contenere, nel limite del C_d ammissibile, le dispersioni di calore per trasmissione per ogni metro cubo di edificio riscaldato e per ogni grado di salto termico di progetto $\Delta T = T_i - T_e$.

Il DL 29 dicembre 2006 n. 311 "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005 n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/Ce, relativa al rendimento energetico nell'edilizia", invece, fissa sia i valori limite della trasmittanza termica U dei diversi componenti che definiscono l'involucro dell'edificio (Tab. 3.22 - 3.26) sia i valori limite dell'indice di Prestazione Energetica EP, per le varie categorie di edifici, in funzione della zona climatica d del rapporto di forma (Tab. 3.16 – 3.21).

In particolare il DL n. 311, stabilisce tre livelli per i suddetti limiti: il primo livello in vigore dall'approvazione della norma; il secondo livello in vigore dal 1° gennaio 2008; il terzo livello in vigore dal 1° gennaio 2010.

Premesso che l'indice EP esprime i kWh disperdibili in un anno per metro quadrato (o per metro cubo) di edificio climatizzato, la sequenza logica delle fasi di calcolo può essere schematizzata come di seguito riportato.

a) *Assegnazione della trasmittanza delle chiusure d'ambito dell'edificio*

Con riferimento all'involucro disperdente dell'edificio occorre valutare la trasmittanza relativamente a ciascuna tipologia costruttiva adottata.

In particolare, occorre valutare il valore di U per i seguenti elementi:
- strutture opache verticali, in W/m^2 K;
- strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, in W/m^2 K;
- strutture opache orizzontali di pavimento, in W/m^2 K;
- pareti traslucide, e/o trasparenti, per ciascun tipo, in W/m^2 K;
- ponti termici, per ciascun tipo, in W/m K.

b) *Verifica dei limiti di trasmittanza delle chiusure d'ambito imposti dalla legge*

Occorre verificare che i valori di progetto delle trasmittanza rispettino i limiti della norma di cui alle Tabelle 3.22 – 3.26.

Indicato con U_i la trasmittanza di progetto dell'elemento i-mo dell'involucro e con U_i^* il corrispondente valore massimo di legge, dovrà essere:

$$U_i \leq U_i^*$$

Se la condizione non è soddisfatta, scelto un materiale coibente caratterizzato da conduttività λc, occorrerà incrementare la resistenza termica dell'i-mo elemento dell'involucro della quantità:

$$\frac{s_i}{\lambda_i} = \frac{1}{U_i^*} - \frac{1}{U_i}$$

c) *Determinazione flusso termico per metro cubo (o per metro quadrato) di edificio riscaldato e dell'indice EP*

Assegnati i valori della trasmittanza degli elementi disperdenti dell'involucro nel rispetto dei limiti imposti dalla legge, si procede al calcolo del flusso termico totale che si disperde attraverso l'involucro:

$$\Phi_{tot} = \sum_i U_i * S_i * (T_i - T_e) \qquad [W]$$

dove:

Φ_{tot} è il flusso termico complessivo disperso

Σ_i è la sommatoria dei flussi dispersi estesa a tutti gli elementi disperdenti (strutture opache verticali, strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, strutture opache orizzontali

di pavimento, pareti traslucide, e/o trasparenti, ponti termici)

U_i è il coefficiente di trasmittanza dell'elemento i-mo dell'involucro

S_i è la superficie in metri quadrati dello i-mo elemento disperdente

T_i è la temperatura interna di progetto (Tab. 3.14)

T_e è la temperatura esterna di progetto (Tab. 3.1)

Stabilito il numero di ore N di funzionamento dell'impianto in un anno (Tab. 3.27) si ricavano i kWh corrispondenti ai watt del flusso totale

$$\Phi_{tot}^{kWh} = 10^{-3}\Phi_{tot} * N \qquad [kWh]$$

In relazione alla categoria di edificio si calcola l'indice di prestazione energetica EP, dividendo i kwattore per la superficie totale riscaldata, per gli edifici E1:

$$EP = \frac{\Phi_{tot}^{kWh}}{S_{tot}} \qquad [kWh/m^2]$$

ovvero per i metri cubi riscaldati, per tutti gli altri edifici:

$$EP = \frac{\Phi_{tot}^{kWh}}{V_{tot}} \qquad [kWh/m^3]$$

d) *Determinazione dell'indice EP [a] ammissibile e verifica*

In funzione del rapporto di forma S/V e della zona climatica in cui ricade l'edificio, si determina, mediante interpolazioni lineari, il valore limite dell'indice di prestazione energetica EP^a (Tab.3.16 – 3.21).

Se risulta:

$$EP \leq EP^a$$

le dispersioni dall'involucro rientrano nei limiti imposti dalla legge.

Se, invece, risulta:

$$EP > EP^a$$

si dovrà intervenire aumentando la resistenza termica dell'involucro per ridurre le dispersioni nei limiti della legge.

3.8 Il progetto dell'isolamento termico idoneo a garantire condizioni di benessere fisiologico

La combustione degli alimenti apporta all'uomo un gran numero di calorie necessarie per garantire il dispendio energetico del suo organismo. L'attività vitale di tutte le cellule e degli organi in genere, le reazioni provocate nei tessuti dagli alimenti ingeriti, le funzioni intermittenti dell'organismo quali la digestione, il lavoro esterno compiuto dall'uomo, l'autoregolazione della temperatura corporea da parte dell'organismo, sono tutti fattori che influenzano, in misura maggiore o minore, il dispendio energetico dell'organismo umano.

In genere la vita dell'uomo richiede una temperatura sanguigna di 37° mentre la temperatura cutanea è di 33°.

La differenza di temperatura tra il corpo umano e l'ambiente circostante provoca degli scambi termici a cui l'organismo reagisce regolando la sua temperatura corporea.

Quando l'uomo cede troppo calore, ad esempio durante un intenso lavoro fisico, i vasi sanguigni si dilatano e la temperatura cutanea aumenta per il maggior afflusso sanguigno.

Quando, invece, viene ceduto poco calore, i vasi sanguigni si restringono, l'afflusso sanguigno diminuisce e la temperatura corporea si abbassa. In pratica, il corpo umano reagisce agli stimoli termici esterni, entro certi limiti di temperatura, in modo da mantenere costante la sua temperatura media. Le condizioni di benessere termico, pertanto, si realizzano quando l'uomo può mantenere la sua temperatura corporea costante senza compiere alcun lavoro fisiologico.

Se indichiamo con C le calorie fornite al corpo umano dalla combustione degli alimenti, con M le calorie dissipate dall'attività vitale delle cellule, degli organi ed, in genere, per il lavoro interno del corpo umano, con L le calorie dissipate per il lavoro meccanico esterno e con Q le calorie cedute per scambio termico con l'ambiente circostante, la condizione di benessere fisiologico termico si realizza quando l'equazione del bilancio termico diventa:

$$C-M-Q-L=O$$

Il corpo umano, quindi, consuma energia sotto forma di alimenti per assicurare le funzioni vitali dell'organismo e cede gli eccessi di calorie all'ambiente circostante per mantenere costante la sua temperatura corporea.

Lo scambio termico tra il corpo umano e l'ambiente circostante può avvenire per irraggiamento, conduzione, convezione e mediante la respirazione e la traspirazione cutanea.

In condizioni invernali le pareti, i mobili, e tutti gli oggetti in genere, sono a temperatura inferiore a quella corporea, per cui l'uomo emette radiazioni infrarosse, in massima parte verso le pareti dell'ambiente, cedendo calore per irraggiamento. Quando l'irraggiamento, indipendente dalla temperatura dell'aria e funzione della temperatura delle pareti, è eccessivo l'uomo avverte una sensazione di freddo.

I piedi, ed in genere qualsiasi parte del corpo umano a contatto con una superficie fredda, cedono calore per conduzione. Un salto termico eccessivo tra i piedi e la superficie del pavimento provoca una sensazione spiacevole di freddo.

La circolazione dell'aria sulla pelle provoca, invece, la perdita di calore per convezione.

Differenze eccessive di temperatura fra le pareti e l'aria ambientale accelerano i moti convettivi dell'aria stessa provocando un aumento degli scambi termici per convezione e, quindi, sensazioni spiacevoli per l'uomo.

La respirazione e la traspirazione cutanea sono altre cause di scambi termici con l'ambiente.

L'aria, uscendo dai polmoni, porta con sè una quantità di calore che viene ceduta all'esterno.

L'evaporazione del sudore sulla superficie cutanea comporta un consumo di calore corporeo. In ambienti caratterizzati da un grado igrometrico basso la traspirazione aumenta dando una sensazione di freddo; un grado igrometrico elevato determina una sensazione di afa, impedendo all'organismo umano di cedere calore per evaporazione del sudore.

In definitiva si può affermare che le condizioni di comfort termico si realizzano quando l'ambiente consente una dissipazione di calore da parte dell'uomo in modo regolare.

Sarà compito del progettista incidere su tutti i fattori che influenzano lo scambio termico fra l'organismo umano e l'ambiente circostante in modo che questo avvenga in maniera regolare.

Per quanto innanzi esposto risulta che lo scambio termico tra l'uomo e l'ambiente, e quindi la condizione di benessere termico, è influenzata dalla temperatura delle pareti, dal grado igrometrico della temperatura e dalla velocità di movimento dell'aria ambientale, dalla natura e intensità del lavoro fisico, dal grado di vestizione. La sensazione di comfort termico è, pertanto, la risultante degli effetti prodotti sull'organismo umano da tutti i fattori di cui innanzi.

Valori diversi di un fattore, ad esempio valori diversi della temperatura dell'aria, possono produrre uguali sensazioni di comfort se variano opportunamente gli altri fattori. Nella tabella 3.28 sono indicate le condizioni termoigrometriche di tre ambienti che producono le stesse condizioni di comfort termico a parità di lavoro e di grado di vestizione dell'utente.

Vari studi medici hanno dimostrato che per assicurare condizioni accettabili di comfort le condizioni termoigrometriche ambientali devono essere le seguenti:

- temperatura dell'aria ambientale: 18 ÷ 20°;
- salto termico tra le temperature dell'aria e delle superfici liminari: 3°;
- umidità relativa ambientale: 40 ÷ 70 %;
- velocità dell'aria ad una temperatura di 20°: 0,2 ÷ 0,3 m/s.

Considerato che gli scambi termici per irraggiamento e convezione raggiungono anche il 75% dello scambio totale tra l'uomo e l'ambiente, assume particolare importanza il progetto di un adeguato isolamento termico delle chiusure d'ambito esterno. In particolare sarà necessario prevedere un isolamento termico tale da soddisfare anche la condizione che il salto termico tra la temperatura dell'aria ambientale e la temperatura superficiale del paramento interno sia pari o inferiore a 3°.

Imponendo la condizione:

$$Ti - \theta i = 3°$$

dove:

T_i è la temperatura interna

θ_i è la temperatura del paramento interno della tamponatura

si calcola il valore della trasmittanza U^{ott}, che ottimizza le condizioni di benessere fisiologico, con la relazione:

$$U^{ott} = \frac{3}{T_i - T_e}\alpha_i$$

dove:

T_i è la temperatura interna

T_e è la temperatura esterna

α_i è il coefficiente di adduzione superficiale interno

Determinato il valore ottimale della trasmittanza U^{ott}, lo spessore s_c del materiale coibente, caratterizzato da una conduttività λ_c, si calcola che la relazione

$$s_c = \lambda_c\left(\frac{1}{U^{ott}} - \frac{1}{U}\right)$$

dove U è la trasmittanza della parete non coibentata.

3.9 Il progetto dell'isolamento termico idoneo ad evitare il fenomeno della condensa

Le tracce di umidità e le conseguenti formazioni di muffe che si riscontrano in corrispondenza delle chiusure d'ambito esterno, il più delle volte, non sono dovute ad infiltrazioni di acqua dall'esterno verso l'interno bensì alla condensazione del vapore d'acqua contenuto nell'aria dell'ambiente abitato.

In linea generale possiamo dire che l'umidità da condensazione è influenzata sia dal fenomeno della trasmissione del calore attraverso l'involucro dell'edificio, sia dal fenomeno della diffusione del vapor d'acqua attraverso i materiali che costituiscono il suddetto involucro.

Per quanto attiene il fenomeno della trasmissione del calore, com'è noto, quando la temperatura del paramento interno di una chiusura d'ambito esterno raggiunge la temperatura di rugiada, sull'elemento di fabbrica si avrà la condensazione dell'umidità ambientale con formazione di goccioline d'acqua o di muffe.

In particolare sulle superfici impermeabili, quali quelle rivestite con marmi, piastrelle, vetri e materie plastiche, si formeranno goccioline d'acqua; sulle superfici assorbenti, quali quelle rivestite con intonaci di malta comune, si formeranno macchie e muffe.

La condensazione per trasmissione di calore attraverso le chiusure d'ambito si verifica sia in condizioni invernali, per la parte fuori terra dell'edificio, sia in condizioni primaverili - estive, per le parti interrate o seminterrate dell'edificio.

La condensazione invernale si avrà, a parità delle condizioni termoigrometriche al contorno, in corrispondenza delle chiusure d'ambito contraddistinte da scarsa resistenza termica; a parità di resistenza termica delle chiusure d'ambito, sulle facciate esposte a nord e ad est; ovvero esposte a venti dominanti e quindi a pioggia a vento.

Nel primo caso, infatti, la scarsa resistenza termica provoca un aumento del flusso termico con conseguente raffreddamento della parete; nel secondo caso la temperatura superficiale esterna della chiusura d'ambito risulta più bassa di quella che compete alle altre esposizioni atteso il minore soleggiamento; nell'ultimo caso, infine, il prosciugamento della chiusura d'ambito, dopo una pioggia a vento, provoca il raffreddamento della parete con la conseguente condensazione dell'umidità ambientale sul paramento interno della chiusura d'ambito.

Il fenomeno della condensazione invernale, inoltre, è particolarmente sentito in corrispondenza dei ponti termici, ovvero in quelle zone singolari dell'involucro esterno contraddistinte da una resistenza termica inferiore a quella della restante parte dell'involucro stesso.

Per tale motivo, nelle costruzioni con struttura portante intelaiata in cemento armato, le zone più esposte alla condensazione sono le velette degli avvolgibili, i davanzali e le mazzette delle finestre; gli elementi verticali ed orizzontali della struttura intelaiata, ubicati in corrispondenza dell'involucro esterno; il giunto tra l'elemento di copertura ed il muro esterno; il giunto tra il muro esterno ed il solaio di piano; il giunto tra il muro esterno ed il solaio su locale non riscaldato; il primo solaio a sbalzo dei curtain-walls; le chiusure d'ambito sottili delle chiostrine e dei curtain-walls.

Nelle costruzioni prefabbricate a grandi pannelli, invece, le zone più esposte alla condensazione invernale, oltre alle velette degli avvolgibili, ai davanzali ed alle mazzette delle finestre, sono i giunti tra gli elementi prefabbricati di facciata; i giunti tra gli elementi di facciata e gli elementi orizzontali di solaio; i giunti tra gli elementi di facciata e gli elementi di primo calpestio.

La condensazione estiva, di contro, si verifica in corrispondenza degli ambienti a grande inerzia termica, quali i locali cantinati, le chiese, i palazzi monumentali.

Il fenomeno dipende direttamente dall'inerzia termica della terra nei confronti dei valori minimi e massimi annuali della temperatura T_e dell'aria. In genere, a tre metri sotto il livello

stradale gli strati del terreno raggiungono la temperatura minima invernale dell'aria.

Il fenomeno della condensazione per passaggio di calore attraverso la chiusura d'ambito può essere evitato con un adeguato proporzionamento termico che tenga conto delle condizioni termoigrometriche interne (Tab. 3.29) in rapporto a quelle dell'ambiente esterno.

Come si rileva dalla relazione:

$$\theta_i = T_i - \frac{U}{\alpha_i}(T_i - T_e)$$

per una preassegnata direzione del flusso termico e quindi per un fissato valore di α_i, a parità di salto termico $\Delta T = T_i - T_e$, fra l'ambiente interno e quello esterno, la temperatura superficiale del paramento interno della chiusura d'ambito è tanto più bassa rispetto alla temperatura dell'aria interna, quanto minore è la resistenza termica della chiusura stessa. In tal caso maggiore è la possibilità che si verifichi la condizione di condensazione dell'umidità ambientale.

Indicato con T_r la temperatura di rugiada, funzione delle condizioni termoigrometriche interne, si realizza la condizione di condensazione dell'umidità ambientale quando la resistenza termica della chiusura d'ambito risulta inferiore o uguale alla *resistenza critica*.

Occorrerà, quindi, progettare la chiusura d'ambito in modo che la sua resistenza termica sia sufficientemente maggiore della resistenza critica, funzione delle condizioni termoigrometriche al contorno.

La sequenza logica delle varie fasi di calcolo dell'isolamento termico delle chiusure d'ambito esterne, nel rispetto della condizione che sia evitato il verificarsi della condensa dell'umidità ambientale sul parametro interno, può schematizzarsi come di seguito riportato.

a) Calcolo della temperatura di rugiada

Mediante l'abaco del Mollier, in funzione della temperatura e del grado igrometrico ambientali, è possibile ricavare il valore della temperatura di rugiada T_r.

La temperatura di rugiada può anche essere calcolata con la relazione:

$$T_r = T_i - 31{,}25(2 - \log\varphi)$$

dove:

T_i è la temperatura ambientale

φ è il grado igrometrico espresso in percentuale

b) Calcolo della trasmittanza critica

Determinato T_r, si calcola la trasmittanza critica con la relazione

$$U_{crit} = \alpha_i \frac{T_i - T_r}{T_i - T_e}$$

dove:

Ti è la temperatura interna

Te è la temperatura esterna

Tr è la temperatura di rugiada

α_i è il coefficiente di adduzione superficiale interno

c) Calcolo isolamento

Calcolato Ucrit, e valutato il valore U della trasmittanza della chiusura d'ambito non coibentata, nell'ipotesi che

$$U_{crit} < U$$

si determina lo spessore s_c di materiale isolante, caratterizzato da una conduttività λ_c, idoneo a evitare il verificarsi delle condizioni di condensazione dell'umidità ambientale, con la relazione

$$s_c = \lambda_c \left(\frac{1}{\beta U_{crit}} - \frac{1}{U} \right) \qquad [m]$$

A tal proposito osserviamo che nella relazione precedente la resistenza critica è stata aumentata del coefficiente di sicurezza β per garantire una temperatura superficiale θ_i, sul parametro interno della chiusura d'ambito, maggiore della temperatura limite T_r.

d) Considerazioni sul fenomeno della condensa

Occorre osservare che in senso assoluto non si può ritenere che una parete, caratterizzata da un prefissato valore della resistenza termica, sia causa di formazione di condensa.

Per la stessa parete, in certe condizioni termoigrometriche può verificarsi che la resistenza termica risulta maggiore della resistenza critica; in altre condizioni, invece, la stessa resistenza termica può risultare inferiore a quella critica con formazione di condensa.

In effetti, anche a parità delle condizioni esterne, al variare della destinazione d'uso di un ambiente, al variare delle condizioni di affollamento, al variare dell'uso nel corso della giornata, possono variare le condizioni termoigrometriche interne e quindi il valore della resistenza critica.

Così l'elemento di fabbrica di copertura di un locale destinato a magazzino per la conservazione del malto con T_i = 16° e φ = 40%, può presentare una resistenza termica che si oppone alla formazione della condensa; potrà provocare la condensazione dell'umidità ambientale, invece, se il locale sarà destinato alla fermentazione del malto, con Ti = 6° e φ = 80%.

La tamponatura di un vano letto per due persone potrà evitare la condensa durante la notte, mentre diventerà parete fredda se nello stesso vano dormiranno quattro o più persone. Nel primo caso, infatti, l'umidità ceduta all'ambiente sarà pari, mediamente, a 90 g/h, nel secondo caso sarà superiore a 180 g/h.

Il davanzale dell'elemento costruttivo finestra di un vano cucina potrà evitare la condensa nelle ore del mattino, mentre diventerà parete fredda nelle ore di cottura dei cibi durante le quali maggiore è la produzione di vapor d'acqua.

Analogamente, anche a parità delle condizioni interne, al variare della località climatica, al variare dell'esposizione, al variare della posizione rispetto al vento, possono variare le condizioni termoigrometriche esterne e quindi il valore della resistenza critica.

Così l'elemento di fabbrica di copertura di una palestra realizzata in una località climatica della provincia di Napoli, con T_e = 2°, può presentare una resistenza termica che si oppone alla formazione della condensa; può diventare *parete fredda*, invece, se la palestra è realizzata in provincia di Torino, con T_e = - 8°.

La tamponatura di un vano esposto a sud può risultare idonea ad opporsi alla condensa superficiale, mentre potrà provocare la condensazione dell'umidità ambientale se il locale risulta esposto a nord.

La tamponatura di un vano esposto a pioggia a vento potrà diventare parete fredda, mentre eviterà la formazione della condensa superficiale se non è esposto a venti dominanti. Nel primo caso, infatti, sulla superficie della tamponatura si avrà una caduta della temperatura superficiale

per effetto del raffreddamento provocato dall'evaporazione dell'umidità della parete bagnata.

Pur tuttavia il progetto termico degli elementi di fabbrica costituenti l'involucro dell'edificio, per ottenere una resistenza termica superiore a quella critica, non costituisce oggetto di particolare difficoltà per il progettista.

In pratica si dovrà soltanto definire, con attenzione, sia le condizioni al contorno, ovvero i parametri che influenzano direttamente la resistenza termica critica dell'organismo architettonico in progetto, sia le caratteristiche fisico-termiche dei materiali di base della chiusura d'ambito.

Per quanto attiene il fenomeno della diffusione del vapore, invece, osserviamo che quando l'ambiente interno e quello esterno sono caratterizzati da differenti pressioni del vapor d'acqua, attraverso gli strati funzionali della chiusura d'ambito si innesca il passaggio del vapor d'acqua che può condensare all'interno dell'elemento di fabbrica, per accumulazione ovvero per il fenomeno della parete fredda.

Il fenomeno della condensazione all'interno degli strati costituenti la chiusura d'ambito può avvenire sia in condizioni invernali che estive.

In condizioni invernali, il vapore che permea attraverso gli strati dell'elemento d'ambito esterno, condenserà non appena incontra una parete fredda.

In particolare, quando la parete fredda è prossima al paramento esterno della chiusura d'ambito, l'acqua di condensazione avanza per capillarità fino all'esterno dove può evaporare all'aria aperta. In questo caso, quando cioè l'elemento di fabbrica può *respirare*, la condensazione non risulta dannosa. Quando, invece, l'elemento di chiusura non può respirare, l'acqua di condensazione ritornerà all'interno rendendo l'ambiente malsano.

È il caso delle chiusure rivestite esternamente con strati di intonaco di cemento, ovvero tinteggiate con pitture plastiche impermeabili; è il caso delle coperture, dotate sempre di uno strato di tenuta all'acqua.

In condizioni estive, quando la chiusura d'ambito non è in grado di respirare, potrà verificarsi un accumulo di umidità all'interno della chiusura, con innalzamento del valore della pressione del vapor d'acqua e conseguente condensazione. Allorquando, infatti, uno degli strati dell'elemento di chiusura è caratterizzato da un basso valore della permeabilità al vapore, si verificherà un accumulo del vapore d'acqua con condensazione dello stesso ed impregnazione di acqua degli strati interni dell'elemento di chiusura.

Occorre ancora osservare che, in condizioni invernali, lo strato coibente finisce col suddividere l'elemento di fabbrica in due zone: la parte interna, calda; la parte esterna, fredda.

Da ciò consegue che il fenomeno della trasmissione del calore, unitamente al fenomeno della permeabilità del vapore, possono provocare la condensa dell'umidità ambientale in corrispondenza della zona fredda della chiusura d'ambito. Lo strato termoisolante, quindi, sarà interessato da aumento dell'umidità e da un aumento della conducibilità termica, a cui si accompagna la riduzione della resistenza termica totale dell'elemento di fabbrica.

Il passaggio del vapore può vanificare, pertanto, una corretta progettazione delle chiusure d'ambito nei riguardi della condensazione per passaggio di calore.

Si rende, quindi, necessaria l'adozione di uno strato che svolga la funzione di barriera alla diffusione del vapore all'interno dell'elemento di fabbrica.

In linea generale si definiscono *barriera al vapore* tutti quegli elementi che tendono ad impedire il passaggio del vapor d'acqua in modo da consentire il controllo del fenomeno della condensa all'interno dell'elemento di fabbrica di chiusura, verticale od orizzontale.

Occorre, pur tuttavia, osservare che la barriera al vapore impedisce alla chiusura d'ambito di respirare, riducendo la ventilazione interna che, può rendere malsano l'ambiente confinato.

Per tale motivo, di solito, la barriera al vapore si adotta per le chiusure d'ambito di quegli ambienti caratterizzati da un elevato grado igrometrico interno, mentre risulta più opportuno l'impiego di materiali coibenti poco sensibili all'umidità per le chiusure delle altre costruzioni.

Per i paesi a clima mediterraneo, in particolare, caratterizzati da condizioni climatiche favorevoli, lo studio del fenomeno della condensazione per passaggio di vapore è necessario soltanto per alcune tipologie edilizie, quali le industrie alimentari, tessili e conciarie; i teatri ed i locali con grande affollamento; le piscine e le palestre.

In linea generale la barriera al vapore viene adottata per evitare l'accumulo di vapore all'interno del sistema quando l'ambiente confinato è caratterizzato da elevata umidità relativa e quando il materiale termoisolante è incapace di subire cicli continui di inumidimento ed essiccazione senza subire degradazioni fisiche e riduzione del suo coefficiente di conducibilità termica.

L'elemento barriera al vapore, per assolvere correttamente alla sua funzione, deve essere localizzato sulla faccia del coibente rivolta verso la zona calda della chiusura d'ambito, svolgendo, in tal modo, anche la funzione di strato di tenuta d'aria.

La barriera al vapore, che deve costituire una membrana continua, può essere realizzata con lamine metalliche associate a materiali bituminosi; con fogli o rotoli di prodotti a base di polimeri; con fogli o rotoli di prodotti a base bituminosa o catramosa.

Occorre, però, considerare che la presenza della barriera al vapore all'interno della chiusura d'ambito implica accumuli progressivi di vapore in corrispondenza della barriera stessa con possibilità di condensazione.

Infatti, la quantità di vapore entrante in una chiusura d'ambito vale

$$G_e = \frac{P_i - P_b}{\rho_{ib}}$$

mentre quella uscente all'esterno vale

$$G_u = \frac{P_b - P_e}{\rho_{be}}$$

avendo indicato con

ϱ_{ib} la resistenza alla diffusione del vapore della parte di elemento di fabbrica compresa tra l'interno e la barriera al vapore,

ϱ_{be} la resistenza alla diffusione del vapore della parte di elemento di fabbrica compresa tra la barriera e l'esterno,

P_b la pressione parziale del vapore in corrispondenza della barriera,

P_i la pressione parziale del vapore all'interno,

P_e la pressione parziale del vapore in corrispondenza della barriera.

Pertanto, considerato che la barriera al vapore è caratterizzata da una bassa permeabilità, risulterà che la quantità di vapore entrante è maggiore di quella uscente.

L'accumulo progressivo di vapore può comportare, quindi. un aumento della pressione parziale del vapore all'interno della chiusura d'ambito fino a raggiungere il valore della pressione di saturazione.

Alla barriera al vapore, quindi, occorre sempre affiancare uno strato di diffusione del vapore.

In linea generale si può affermare che, per quanto attiene il fenomeno della diffusione del vapore, gli elementi di fabbrica multistrato delle chiusure d'ambito dovrebbero essere realizzati disponendo gli strati in modo che le relative resistenze specifiche alla diffusione del vapore siano decrescenti dall'ambiente interno verso l'esterno. In generale, quindi, si dovrebbe evitare di inserire all'interno degli elementi di fabbrica strati impermeabili al vapore.

Considerato, però, che ciò è possibile soltanto per le chiusure d'ambito *ventilate*, alla barriera al vapore occorrerà abbinare sempre uno strato che svolga la funzione di diffusione del vapore.

Nella pratica si definiscono *strato di diffusione* tutti quegli elementi che tendono ad impedire la formazione di pressioni anomale all'interno dell'elemento di fabbrica.

Lo strato di diffusione ha il compito, quindi, di uguagliare il valore della pressione del vapore all'interno della chiusura a quello dell'ambiente esterno.

L'elemento strato di diffusione, per assolvere correttamente la sua funzione, deve essere localizzato sulla faccia della barriera al vapore rivolta verso l'ambiente interno e deve essere messo in collegamento con l'ambiente esterno mediante camini di ventilazione o raccordi perimetrali.

Lo strato di diffusione può essere realizzato con fogli di prodotti bituminosi o catramosi, rivestiti su di una faccia con granuli di opportuna dimensione; ovvero con uno strato di materiale lapideo informe, non cementato.

3.10 Il progetto dell'isolamento termico economicamente ottimale

La coibentazione delle chiusure d'ambito esterno, come ogni problema di ingegneria, investe aspetti economici oltre che tecnici. Il continuo aumento del costo dell'energia ha indotto negli utenti un autocontrollo nel consumo di energia e, in particolare in quello per usi civili. Coibentare le chiusure d'ambito degli edifici, comunque, può costituire non solo un investimento economicamente conveniente ma anche un risparmio, in termini assoluti, di energia.

Per calcolare l'isolamento termico economicamente conveniente occorre distinguere i costi di investimento ed i costi di gestione. Lo spessore di coibente che rende minimo la somma dei costi di investimento e di gestione rappresenta lo spessore economicamente ottimale.

Il calcolo dello spessore economico è particolarmente complesso atteso il notevole numero di parametri da cui dipende: la variabilità del costo unitario dell'energia, il costo del denaro, il clima, l'orientamento, la tipologia strutturale, il costo dell'isolamento, il tempo di ammortamento. Comunque, introducendo nel problema alcune semplificazioni, è possibile determinare il richiesto spessore economico in maniera sufficientemente attendibile.
Indicato con:

p il numero di ore-giorno
g il numero di gradi-giorno

ed ipotizzando condizioni di regime stazionario in ogni periodo di tempo, le calorie disperse attraverso una chiusura d'ambito esterno, caratterizzata da una trasmittanza U, per metro quadrato di superficie disperdente e per anno, si calcolano con la relazione

$$Q = p * g * U * 10^{-3} \qquad [\text{KWh/m}^2 \text{ anno}]$$

Se indichiamo con s_c e λ_c, rispettivamente, lo spessore e la conducibilità del materiale coibente con cui si vuole isolare la chiusura, si ha

$$Q = p * g * \left[\frac{U}{1 + s_c / \mu} \right] * 10^{-3}$$

avendo posto $\mu = \lambda_c / U$

Noto il carico stagionale Q e indicato con C_e[€/kWh] il costo unitario utile[1] dell'energia, la relazione tra lo spessore s_c del materiale coibente ed il costo di gestione stagionale C_g, per metro quadrato di superficie disperdente, si scrive:

$$C_g = p * g * \left[\frac{U}{1 + s_c / \mu} \right] * C_e * 10^{-3} \quad [€/m^2]$$

Dalla relazione precedente si rileva immediatamente che, a parità di μ, p e g, il costo di gestione di un impianto termico è inversamente proporzionale allo spessore di materiale coibente adottato (Fig. 3.5).

Maggiore è la resistenza termica della chiusura d'ambito, minore risultano le calorie disperse e quindi il fabbisogno termico che l'impianto di riscaldamento deve coprire per mantenere costante la temperatura dell'aria ambientale sui valori di progetto.

Il costo di investimento C_i, per unità di superficie coibentata, si può calcolare con la relazione

$$C_i = C_0 + C_m + (C_c * s_c) \qquad [€/m^2]$$

dove:

- C_o rappresenta il costo di costruzione per metro quadrato di parete non coibentata e caratterizzata, quindi, dal coefficiente di trasmissione U;
- C_m il costo della posa in opera del coibente, per metro quadrato di parete;
- C_e il costo di un metro cubo di materiale coibente.

Il costo $C_o + C_m$ rappresenta il cosiddetto *costo fisso* in quanto, atteso il modesto peso specifico dei materiali coibenti, risulta indipendente dallo spessore dello strato isolante installato.

Scelto il tipo di materiale coibente, e quindi fissato C_e, il costo d'investimento risulta una funzione crescente dello spessore s_c (Fig. 3.6).

Fissato il numero di anni, n, di durata dell'installazione, il costo globale termico della chiusura C_n, sarà pari alla somma del montante dell'investimento C_i e del montante dei costi stagionali di gestione C_g all'anno n.

Lo spessore s_c di materiale coibente per cui C_n diventa minimo rappresenta lo spessore economicamente ottimale (Fig. 3.7).

Osserviamo che in pratica possono verificarsi tre casi. La retta parallela all'asse delle ascisse, e passante per il punto di coordinata ($s_c = 0$; $C = C_g^0$), dove C_g^0 rappresenta il costo di gestione per una parete priva di coibente, interseca, è tangente, ovvero non interseca la curva $C_n = f(s_c)$.

Nel primo caso (Fig. 3.8) gli spessori s_i ed s_s individuano un intervallo di spessori di materiale coibente tutti economicamente convenienti.

Nel secondo caso (Fig. 3.9) l'ascissa del punto di tangenza costituisce il solo spessore di coibente per cui $C_n = C_g^0$.

Qualsiasi altro spessore risulta economicamente non conveniente. In tal caso, dal punto di vista economico, risulta indifferente effettuare o meno l'isolamento termico.

Nel terzo caso (Fig. 3.10), infine, risulta non conveniente economicamente, ma non certo dal punto di vista della conservazione dell'energia, l'isolamento termico.

[1] Per costo unitario dell'energia si intende il costo dell'energia comprensivo dei costi di conduzione dell'impianto di riscaldamento (rendimento impianto, manutenzione impianto. ecc.).

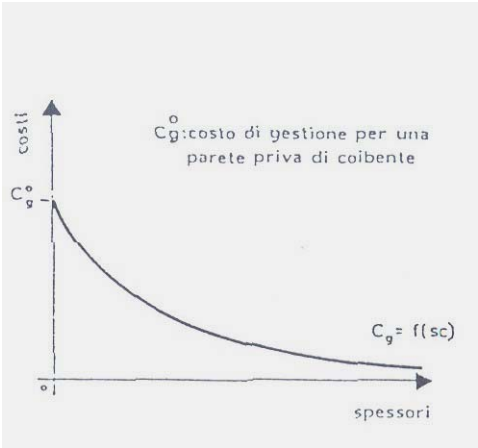


Fig. 3.5 – rappresentazione grafica della legge $C_g=f(s_c)$

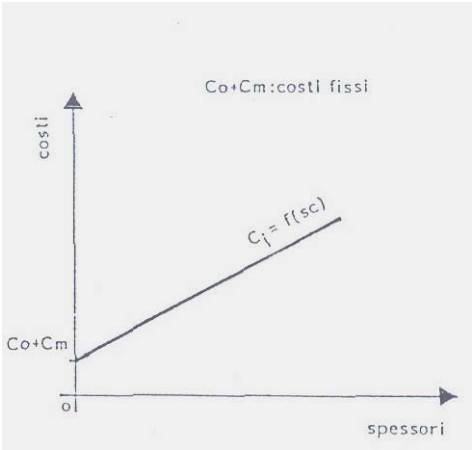


Fig. 3.6 – rappresentazione grafica della legge $C_i=(s_c)$ (

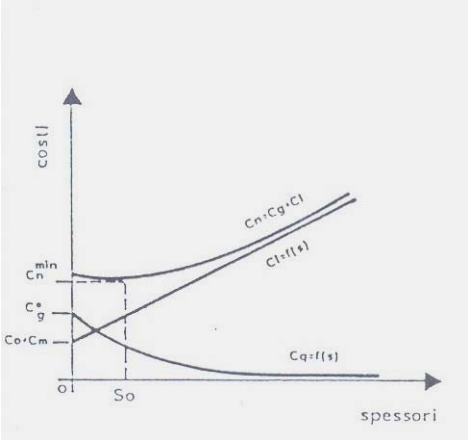


Fig. 3.7 – rappresentazione grafica della legge $C_m=f(s_c)$

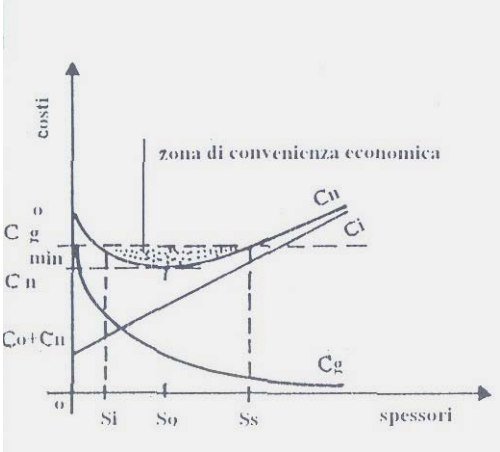


Fig. 3.8 – la retta $C=C_g^0$ interseca la curva $Cn=f(s_c)$

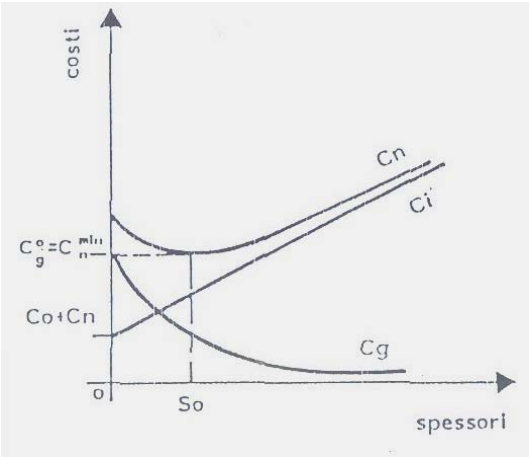


Fig. 3.9 - la retta $C=C_g^0$ è tangente alla curva $Cn=f(s_c)$

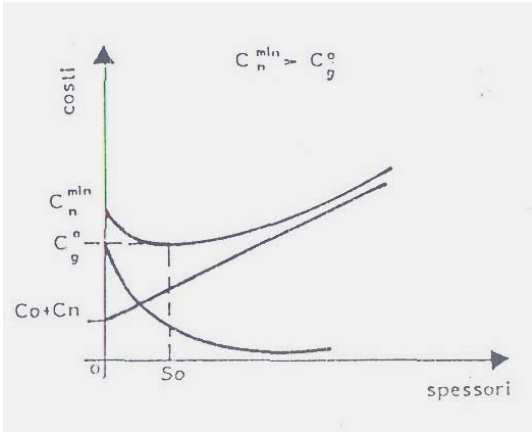


Fig. 3.10 - la retta $C=C_g^0$ non interseca la curva $Cn=f(s_c)$