> Maria Elisabetta Ripamonti
> Francesco Claudio Dolce

PONTI TERMICI

ANALISI E IPOTESI RISOLUTIVE

In allegato un CD contenente tutti i particolari costruttivi
(secco e tradizionale) esportabili in .dwg

Seconda edizione

- Dettagli tecnici e particolari costruttivi esportabili in .dwg
- Testo con esempi grafici e dettagli costruttivi in formato digitale
- Analisi della normativa ed esempi pratici per l'individuazione dei ponti termici
- Strategie d'intervento e soluzioni tecnologiche per edifici passivi

Il sapere non ha confini:
è un mare senza fondo, solcato da un'infinità di domande
Eraclito

A Greta, Marta
e Stefano

Maria Elisabetta Ripamonti Francesco Claudio Dolce

Ponti termici

Analisi e ipotesi risolutive

Dario Flaccovio Editore

Maria Elisabetta Ripamonti – Francesco Claudio Dolce
PONTI TERMICI – Analisi e ipotesi risolutive

ISBN 9788857904368

© 2011 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Seconda edizione: marzo 2015

Ripamonti, Maria Elisabetta <1967->
Ponti termici : analisi e ipotesi risolutive / Maria Elisabetta Ripamonti, Francesco Claudio Dolce. - 2. ed. - Palermo : D. Flaccovio, 2015.
ISBN 9788857904368
1. Edifici – Isolamento termico. Dolce, Francesco Claudio <1968->.
621.4024 CDD-22 SBN Pal0277500
CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, marzo 2015

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.
L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.
La fotocopiatura dei libri è un reato.
Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Ringraziamenti ..... pag. XI
Prefazione ..... » XIII
Premessa ..... » XV

1. Perché un basso fabbisogno energetico

1.1. Cenni introduttivi ..... » 1
1.2. Il concetto di benessere ..... » 3
1.3. Successo delle costruzioni innovative nelle diverse fasce climatiche ..... » 6
1.4. Bilancio energetico ed economico: rapporto involucro e impianti ..... » 9

2. Il ponte termico

2.1. Definizione di ponte termico ..... » 15
2.1.1. Ponte termico strutturale ..... » 16
2.1.2. Ponte termico geometrico ..... » 16
2.1.3. Ponti termici lineari e puntiformi ..... » 16
2.1.4. Ponti termici corretti ..... » 18
2.1.5. Flussi termici e isoterme ..... » 19
2.2. Definizioni correlate alla verifica termoigrometrica ..... » 20
2.2.1. Conducibilità termica (λ = W/mK) ..... » 21
2.2.2. Resistenza termica (R = m^{2}K/W) ..... » 22
2.2.3. Capacità termica (J/K) e massa volumica (kg/m^3) ..... » 23
2.2.4. Fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) ..... » 23
2.2.5. Fattore di attenuazione (F_d) ..... » 25
2.2.6. Trasmittanza termica periodica (λ_{ie} = W/m^{2}K) ..... » 25
2.2.7. Sfasamento ΔT (h) e smorzamento (%) ..... » 26
2.2.8. Capacità termica areica interna periodica (J/m^{2}K) e ammettenza (W/m^{2}K) ..... » 28
2.2.9. Trasmittanza termica totale (W/m^{2}K) e trasmittanza termica lineica (W/mK) ..... » 29
2.2.10. Rapporto superficie/volume ..... » 30
2.3. Perdita di energia attraverso i ponti termici ..... » 30
2.4. Cenni di fisica ..... » 34
2.4.1. Temperatura superficiale e isoterme ..... » 35
2.4.1.1. Calcolo temperatura superficiale interna e f_{Rsi} ..... » 36
2.4.2. Umidità e condensa ..... » 37
2.4.2.1. Temperatura di rugiada ..... » 41
2.4.3. Fattore di temperatura, condensa interstiziale, umidità e muffa ..... » 42
2.4.4. Andamento delle pressioni ..... » 44
2.5. Problemi connessi alla salute ..... » 46
2.6. Danni causati agli immobili ..... » 48

3. Normative e metodi di calcolo

3.1. Norme comunitarie e nazionali ..... » 51
3.2. Metodi di calcolo ..... » 53

3.2.1. UNI 7357 ... » 53
3.2.2. Modelli bidimensionali e tridimensionali ... » 54
3.2.3. UNI EN ISO 14683: 2008 ... » 54
3.3. Atlanti, abachi e manuali ... » 56

4. Conseguenze e risoluzioni dei ponti termici

4.1. Costruire liberi dai ponti termici ... » 59
4.2. Risoluzioni dei ponti termici nelle ristrutturazioni ... » 60
4.2.1. Alcune applicazioni nelle riqualificazioni energetiche degli edifici esistenti ... » 61
4.2.2. Standard delle case passive nelle ristrutturazioni ... » 63
4.2.3. Importanza dell'areazione ... » 65
4.2.4. Sistemi di coibentazione ... » 66
4.2.5. Finestre tra comfort ed esigenze estetiche ... » 68
4.3. Ottimizzazione dell'involucro nelle nuove costruzioni ... » 70
4.3.1. Pareti perimetrali ... » 70
4.3.1.1. Facciata con rivestimenti applicati ... » 70
4.3.1.2. Effetto dei ponti termici nelle facciate ventilate ... » 72
4.3.1.3. Supporti in legno ... » 76
4.3.1.4. Rivestimenti pesanti di facciate ventilate ... » 79
4.3.1.5. Doppia muratura perimetrale ... » 81
4.3.1.6. Sostegni per i materiali isolanti in murature pesanti ... » 82
4.3.2. Fondazioni ... » 83
4.3.2.1. Fondazioni continue ... » 87
4.3.2.2. Fondazioni profonde ... » 89
4.3.3. Serramenti ... » 93
4.3.4. Cassonetti ... » 102
4.3.5. Balconi ... » 104
4.3.6. Coperture ... » 111
4.3.7. Vani scala ... » 114
4.3.7.1. Grandi edifici ... » 114
4.3.7.2. Edifici di ridotte dimensioni ... » 115
4.3.8. Statica e ponti termici ... » 118
4.3.8.1. Separazione termica nel soffitto dello scantinato non riscaldato ... » 119
4.3.8.2. Disinnesco dei ponti termici per sostegni con alto carico di compressione ... » 124
4.3.8.3. Separazione termica con armatura in acciaio inox o fibra di vetro ... » 126
4.3.8.4. Isolamento supplementare ... » 127

5. Soluzioni grafiche per diverse tipologie edilizie

5.1. Generalità ... » 129
5.2. Tecnologia a secco ... » 129
5.2.1. Acciaio ... » 129
5.2.2. Legno ... » 131
5.3. Tecnologia tradizionale ... » 132

6. Low energy building: focus sulle case passive

6.1. La Direttiva Europea 31/2010/UE e la rigenerazione urbana ... » 235
6.2. Cosa sono le case passive ... » 236
6.2.1. Caratteristiche tecniche ... » 236

6.2.2. Bilancio energetico edificio/impianti ..... » 239
6.2.3. Certificazione delle case passive: la progettazione integrata come nuovo approccio strategico e opportunità per progettisti e imprese ..... » 240
6.3. Ponti termici ed edifici passivi ..... » 240
6.4. Tecnologia e innovazione al servizio della qualità architettonica ..... » 242
6.4.1. Coibentazione a cappotto ..... » 244
6.4.2. Strutture in legno ..... » 245
6.4.3. Innovativi sistemi di coibentazione ..... » 246
6.5. Vincere le perplessità nel presente e nel futuro dell'edilizia ..... » 249

7. Conclusioni ..... » 251

Bibliografia ..... » 253

RINGRAZIAMENTI

Siamo grati a Sergio Colombo, direttore dal 2006 al 2011 della rivista *Il Perito Industriale – Progettare, dirigere, costruire, collaudare*, per aver fornito l'occasione per l'ideazione di questo libro e per averne forgiato la stesura.

Desideriamo ringraziare Simone Lomuoio, che in questi anni ha condiviso la sensibilità e l'attenzione agli aspetti energetici nella progettazione, per il suo contributo alla predisposizione delle immagini e alla modifica dei nodi costruttivi della seconda edizione.

Ringraziamo le ditte Nordtex, Röfix, gli Edifici Evoluti Bertelli e Giorgio Cacciaguerra per la gentile collaborazione.

PREFAZIONE

I temi riguardanti l'energia, la sua produzione, conservazione e risparmio sono sempre più d'attualità.
Proprio in merito alla riduzione dei consumi in edilizia, spesso si sottovaluta l'incidenza delle perdite di calore più difficili da individuare e calcolare, tra cui i ponti termici.
Questi hanno assunto importanza crescente da quando è entrato in vigore l'obbligo di isolare termicamente gli edifici: in Italia dal 1976 con la Legge n. 373, nel nord Europa molto prima.
L'influsso dei ponti termici è aumentato in modo progressivo con l'incremento delle restrizioni legislative in materia di efficienza energetica nell'edilizia.
L'isolamento imposto nelle nuove costruzioni a partire dal 1976 era infatti scarso: sembrava più un'intenzione che una regola poi effettivamente applicata.
Con la Legge n. 10 del 1991 si è iniziato a coibentare gli edifici in modo più serio ma sempre molto distante dalla reale esigenza di ridurre gli sprechi di energia; finché non è intervenuta l'Europa, con le sue direttive, a richiamare i Paesi membri al rispetto delle ferree regole condivise. L'Italia si è adeguata nel 2005, emanando il D.Lgs. n. 192, che ha imposto severi limiti ai consumi e alle emissioni di anidride carbonica in atmosfera.
Nel periodo dal 1991 (L. 10) al 2005 (D.Lgs. 192) i ponti termici sono stati in realtà molto trascurati sia in fase di progettazione sia in quella di costruzione causando spesso formazioni di muffe in corrispondenza delle parti più critiche di discontinuità dell'isolamento.
Ora, invece, il ponte termico è al centro dell'attenzione, soprattutto per la tendenza a costruire edifici a basso consumo, condizione che lo rende un elemento cruciale ai fini del risparmio energetico; perché, muffe a parte, esso determina maggiori dispersioni di calore e quindi consumi più elevati, con peggioramento della classe energetica dell'edificio.
Se una costruzione è a basso consumo deve esserlo, non solo sulla carta, ma soprattutto sulle bollette energetiche: l'utente finale è, infatti, il più severo controllore dell'efficienza termica della casa acquistata. Ma ancora prima del semplice cittadino sono i progettisti, i direttori dei lavori, i costruttori e i certificatori a dover considerare i ponti termici: dove sono, come calcolarli e come neutralizzarli. Del resto a cosa serve fare un buon progetto se poi in cantiere non si costruisce a regola d'arte?
Il volume di Maria Elisabetta Ripamonti e Francesco Dolce compie un'analisi accurata dei ponti termici, della loro struttura e collocazione, con una ricerca puntuale per individuare le soluzioni più appropriate alle criticità a essi connesse.
Nell'ampia bibliografia sull'efficienza energetica in edilizia un testo così dettagliato mancava, anche perché la tendenza a costruire edifici cosiddetti *a energia quasi zero* – come chiede la nuova Direttiva Europea n. 2010/31/UE – rende il ponte termico elemento importante cui dedicare molta attenzione per progettare e costruire edifici dalle ottime prestazioni energetiche.

* * *

Dopo il primo capitolo dedicato all'introduzione, nel secondo gli autori spiegano cos'è un ponte termico, richiamano le nozioni di base della fisica applicata alla trasmissione del calore, con le relative definizioni e illustrano, nei dettagli, le varie tipologie dei ponti termici e i danni che possono provocare. Il capitolo successivo illustra come individuare e calcolare i ponti termici, secondo le norme nazionali e comunitarie, con l'ausilio di dati, tabelle, abachi, esempi grafici, per le diverse tipologie edilizie. Nei capitoli quarto e quinto gli autori analizzano le soluzioni per tutti i casi in cui c'è presenza di ponti termici. L'analisi è dettagliata e, per agevolare la comprensione del testo, sono stati riportati diversi esempi pratici di notevole utilità.
Nel capitolo sesto si presentano gli edifici passivi, prescritti dalla nuova normativa europea, nei quali trovano ampia risoluzione i problemi dell'involucro legati alla dispersione del calore.
Per tutto questo e altro ancora, il saggio rappresenta un prezioso strumento di lavoro per i professionisti e le imprese che operano nel settore delle costruzioni edili, ma anche per gli studenti universitari e degli istituti tecnici.
Gli autori, entrambi architetti, hanno svolto un ampio lavoro di ricerca – testimoniato dalla puntuale bibliografia – concluso con un lodevole esercizio di sintesi che favorisce la fruibilità del testo.
Nel libro si cita Eraclito, soprannominato dai suoi contemporanei l'*oscuro*: "la conoscenza è un mare senza fine solcato da un'infinità di domande…".
In questa citazione Eraclito, a dispetto del suo nomignolo, non poteva essere più chiaro. Una massima che, applicata ai giorni nostri, potrebbe essere: il progresso tecnologico è in continua evoluzione, non ci si può fermare.
Occorre studiare sempre, se si vuole restare al passo dei tempi.

Sergio Colombo

PREMESSA

Il libro desidera fornire ai professionisti e ai costruttori un concreto ed efficace strumento operativo. Da una panoramica sui concetti base e sulle normative si giunge a un quadro di soluzioni tecniche relative ai ponti termici nelle varie tipologie costruttive.
Strategie d'intervento e soluzioni tecnologiche, rivolte a ridurre sensibilmente l'entità dei consumi, sono di ausilio sia in fase progettazione sia di realizzazione.
L'obiettivo del risparmio energetico ha come prima risposta progettuale il miglioramento degli elementi che compongono la costruzione. Infatti, forma, volume, orientamento, protezioni solari e anche la risoluzione dei ponti termici incidono sulla qualità dell'involucro ancor prima di qualsiasi soluzione impiantistica.
L'incremento di edifici ben isolati, iniziato nel nord Europa, accelera anche in Italia grazie alla richiesta di qualità e basso consumo che si diffonde in controtendenza a una stagnante congiuntura economica.
L'incremento dei sistemi di climatizzazione estiva, inoltre, richiede strategie migliorative delle prestazioni termiche anche in estate per contrastare i picchi di domanda di energia elettrica che sconvolgono i bilanci degli edifici. Un'ottima coibentazione, che significa anche risoluzione dei ponti termici, è efficace non solo per le rigide temperature invernali ma anche per difendersi dal calore estivo.
Occorre evidenziare che i progettisti hanno anche il dovere di salvaguardare l'ambiente riducendo le emissioni in atmosfera e perseguendo la qualità e la sostenibilità, oltre la mera composizione architettonica. Pur nel rispetto delle tradizioni costruttive delle varie regioni climatiche, frutto di esperienza di secoli, si deve ottenere comfort e benessere senza rimanere ancorati alla staticità di soluzioni ormai inadeguate e superate.
Questa pubblicazione sintetizza strategie e risultati con i quali è possibile orientarsi per impostare la progettazione di dettaglio in specifici contesti. Si presentano a titolo esemplificativo, alcune soluzioni relative a differenti tipologie di ponti termici per fornire, anche attraverso risultati numerici precisi, un immediato riscontro.
Questa analisi è volta all'individuazione di modelli funzionali in grado, non solo di contrastare i ponti termici nell'edificio, ma di trasformare un problema in un'opportunità.

Gli autori

1. PERCHÉ UN BASSO FABBISOGNO ENERGETICO

1.1. Cenni introduttivi

L'obiettivo del risparmio energetico e della conseguente riduzione di emissioni in atmosfera ha come prima risposta progettuale l'ottimizzazione degli elementi disperdenti che compongono la costruzione. Se il ruolo dei ricercatori è quello di individuare materiali e componenti capaci di fornire prestazioni elevate dal punto di vista dell'isolamento termico allo scopo di ridurre le dispersioni di calore, quello del progettista è di operare una scelta tra le diverse soluzioni tecniche disponibili.

La risoluzione dei ponti termici rappresenta un esempio di come la sensibilità all'aspetto energetico abbia stimolato capacità progettuali. Non è sufficiente, infatti, porsi l'obiettivo di isolare o iperisolare l'involucro edilizio, ma occorre anche trovare soluzioni, modelli funzionali e tipologie in grado di realizzare spazi confortevoli.

La sostituzione di fonti energetiche di origine fossile con energie rinnovabili costituisce uno dei primi possibili provvedimenti per ridurre drasticamente le emissioni di gas nocivi nell'atmosfera, soprattutto di anidride carbonica. Infatti, sino a quando i livelli di consumo di combustibili e carburanti non diminuiranno e non sarà sfruttato il potenziale delle fonti rinnovabili, almeno nell'ottimistica ipotesi di giungere al 10-12% delle fonti energetiche, non sarà possibile garantire l'ambita protezione climatica del pianeta. La conseguenza fortemente negativa del mantenimento dell'attuale politica energetica è evidente sia nei cambiamenti climatici sia nei danni causati all'ecosistema di cui sono conosciuti i devastanti scenari.

Si focalizza l'attenzione su un aspetto significativo con notevole influenza sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico: il risparmio energetico derivante dall'efficienza dell'edificio.

Se negli ultimi decenni si è assistito a una forte crescita del settore dei trasporti, che nel 2000 ha raggiunto quasi il 30% del consumo, l'energia necessaria per il riscaldamento degli immobili rappresenta nell'Unione Europea circa il 40% del consumo energetico totale. Per arginare questa preoccupante situazione nel novembre 2009 il parlamento europeo ha disposto che, a partire dal 2021 (per gli edifici pubblici dal 2019), le nuove costruzioni possiedano elevati standard di efficienza energetica e soddisfino una parte di energia mediante fonti rinnovabili. Mentre in Germania – di cui la figura 1.1 mostra la ripartizione in percentuale dei consumi di energia – questi parametri sono già vigenti negli edifici pubblici, in molti altri paesi, tra cui l'Italia, si è ancora ben lontani dall'attuazione delle nuove direttive comunitarie.

La nuova direttiva 2010/31/UE, invitando a rafforzare le disposizioni della 2002/91/CE, chiede di rendere vincolante l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica del 20% entro il 2020 auspicando un numero crescente di edifici dalle ottime prestazioni.

Il risparmio energetico, oltre alla produzione di energia con fonti alternative, costituisce un'ulteriore possibilità di riduzioni di emissioni: agendo sulla qualità degli edifici, si potrebbero ottenere

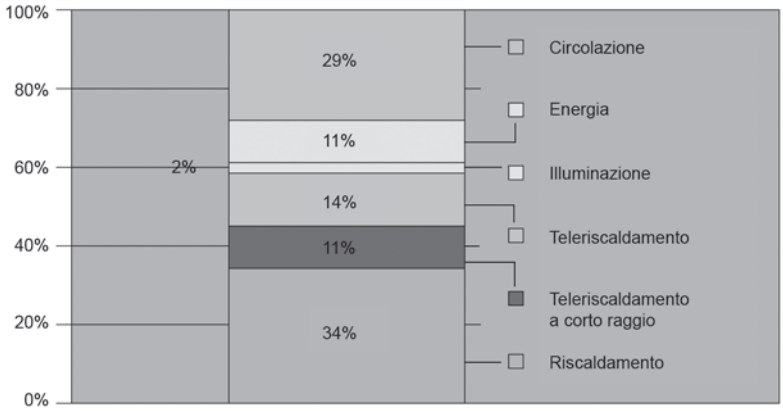


Figura 1.1. Ripartizione del consumo in Germania in funzione dell'applicazione energetica

pregevoli risultati in grado di influenzare sensibilmente il bilancio totale. Si è stimato che l'Unione Europea riuscirebbe a risparmiare, con adeguati interventi, almeno il 20% di energia rispetto all'attuale consumo, pari a circa 60 miliardi di euro all'anno; una famiglia media, a seconda del proprio consumo, potrebbe ridurre i costi da 200 fino a 1000 euro all'anno.
Il potenziale di riduzione di spesa è notevole: gli edifici tradizionali costituiscono una parte consistente del patrimonio immobiliare, in Italia dei 13 milioni di edifici esistenti, 11 milioni sono anteriori alla Legge 373 del 1976[1] e sono caratterizzati da un elevato consumo (185-200 kWh/m^2 annui); se si considera che gli edifici con alte classi energetiche possono raggiungere 10-15 kWh/m^2 annui è evidente la possibile drastica riduzione di consumi e di emissioni.
Negli edifici passivi, connotati da un irrilevante utilizzo energetico, le condizioni di comfort sono raggiunte grazie a caratteristiche dell'involucro e a sistemi di trasporto del calore da e verso l'ambiente circostante senza l'utilizzo di energia fossile o altre fonti convenzionali. Lo standard cosiddetto *Passivhaus*[2] definisce alcuni livelli massimi di fabbisogno energetico per il riscaldamento e requisiti specifichi di comfort che possono essere raggiunti adottando le soluzioni più idonee al luogo e alla destinazione d'uso dell'edificio. Il concetto di *casa passiva* è spesso connotato negativamente da pregiudizi sul funzionamento del modello, ritenuto erroneamente adatto solo al nord Europa e non ai climi mediterranei e troppo massiccio per poter ottenere un adeguato rapporto superficie/volume. In realtà, la casa passiva non ha vincoli estetici e progettuali ma è semplicemente il risultato dell'applicazione simultanea di più misure energetiche, regolate da leggi della termodinamica identiche in tutto il pianeta. La casa passiva è una definizione, un concetto applicabile in ogni contesto.
Nel terzo congresso sulle case passive tenutosi nel 1999 a Bregenz (Austria), la tendenza principale è stata quella di procedere verso la modernizzazione degli edifici con l'aiuto di componentistica altamente efficiente in grado di migliorare il livello energetico di ogni elemento edilizio. Con la stessa aspirazione di contribuire al miglioramento dell'edificio, in questo testo si analizzano i ponti termici, porzioni localizzate dell'involucro in cui, rispetto alle componenti circostanti, si

[1] Fonte: Libro Bianco, *Edificio, Energia, Ambiente*.

[2] Nel 1991 Feist e Adamson applicano l'approccio progettuale ad una casa a Darmstadt con l'obiettivo di fornire un caso studio di abitazione per una casa tedesca a basso consumo energetico e a costo ragionevole. Le stesse condizioni sono applicate nel 1995 a una seconda costruzione a Umstadt. Nel 1998, basandosi sulle esperienze condotte, Feist codifica il progetto passivo delle case a Darmstadt e Umstadt nello standard cosiddetto *Passivhaus*.

Potenzialità del Risparmio Energetico in Edilizia

Fabbisogno invernale di Energia Primaria EPH (kWh)

-	Edifici a consumo energetico nullo	0	(kWh/m²a)
-	Casa passiva	15	(kWh/m²a)
-	Edifici a basso consumo energetico	30 - 50	(kWh/m²a)
-	Edifici degli ultimi 20 - 30 anni	100-150	(kWh/m²a)
-	Vecchi edifici (maggioranza del patrimonio immobiliare)	200 c.a	(kWh/m²a)

Figura 1.2. Potenzialità del risparmio energetico in edilizia

verifica una dispersione di calore particolarmente elevata. Questo avviene nei punti di raccordo fra elementi costruttivi diversi o in punti dove l'isolamento termico dell'edificio è interrotto o più debole.
Accanto al progresso tecnologico per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili, l'efficienza della parte edile ha notevole importanza: l'edilizia di qualità, risolvendo il problema dei ponti termici con una progettazione ed esecuzione attenta a questi dettagli, può garantire consumi contenuti con conseguenze rilevanti anche sul benessere negli ambienti indoor. Inoltre, in considerazione del fatto che l'edificio è costituito da involucro e sistema impiantistico, se il primo è progettato e realizzato in modo efficace, la parte impiantistica riveste un ruolo diverso sul bilancio energetico e può essere rivolta al risparmio delle risorse ambientali. Per valutare le potenzialità di miglioramento di edificio e impianto si devono analizzare le tecniche vigenti e i possibili scenari di trasformazione.

1.2. Il concetto di benessere

Il benessere rappresenta uno stato psichico e fisico che interessa tutti i nostri sensi, da qui la necessità di studiare l'effetto che gli stimoli ambientali, termici, acustici e visivi hanno sulla nostra psiche e sull'organismo umano. Si parla, quindi, di benessere termico, acustico, visivo in una complessa relazione che può essere affrontata in modo esauriente con la collaborazione di fisici, medici, psicologi e statistici. Il concetto di comfort è connesso a una condizione di generica soddisfazione nella quale un individuo si trova e dalla quale non desidera allontanarsi. La progettazione di qualità, non solo dal punto di vista termico, deve porre attenzione allo sviluppo dei dettagli architettonici esecutivi controllandone la corretta applicazione. Ricadute positive sulla durata temporale dell'edificio, sul comfort e sulla salute degli abitanti derivano proprio da questi presupposti fondamentali.
Le condizioni di benessere termo-igrometrico sono quelle in cui l'attività dei meccanismi di termoregolazione del corpo umano è minima, cioè le condizioni di soddisfazione termica nelle quali l'individuo non ha né caldo né freddo.
Quattro parametri fisici ambientali contribuiscono alla determinazione dello stato termico del corpo umano:

- la temperatura dell'aria;
- la velocità dell'aria;
- la temperatura media radiante;
- il grado igrometrico o umidità relativa.

Vi sono anche due parametri soggettivi cioè l'attività svolta (ovvero il metabolismo energetico) e la resistenza termica dell'abbigliamento. Perché ci sia effettivamente comfort, deve essere nullo il disagio termico localizzato dovuto alla non uniformità delle variabili ambientali. Le cause del disagio termico localizzato, considerate dalla norma UNI EN ISO 7730, sono:

- l'elevata differenza delle temperature dell'aria;
- il pavimento troppo caldo o troppo freddo;
- le correnti d'aria;
- l'elevata asimmetria media radiante;
- un'umidità relativa troppo elevata o troppo bassa.

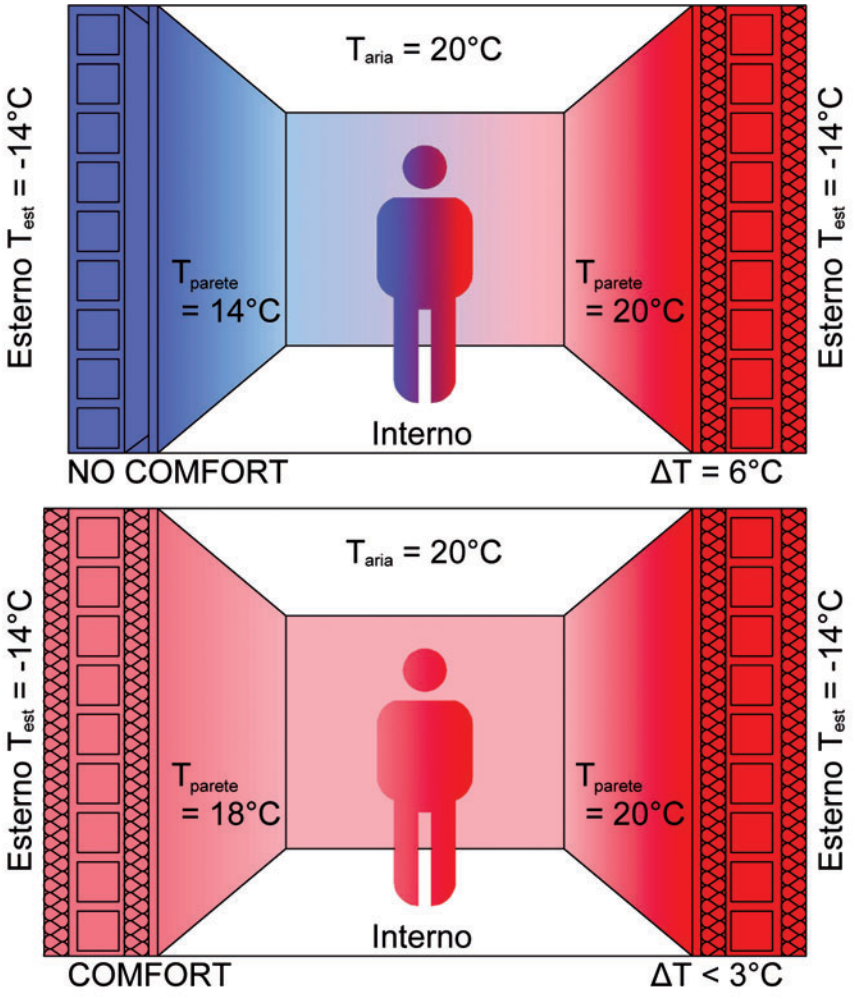


Figura 1.3. Sensazione di comfort

La norma prescrive come valore limite accettabile una differenza massima di temperatura di 3 °C tra un punto e l'altro dell'ambiente. La mancanza di comfort, quindi, non è determinata solo dalla presenza di inquinanti di varia natura, ma anche dalla diversità di temperature interne. Si pensi alla spiacevole sensazione di freddo percepita in corrispondenza di finestre con scarsa qualità termica. La temperatura percepita (definita *temperatura operante*) è:

$$T_{op} = 0{,}5 \cdot (T_{aria\ interna} - T_{media\ radiante\ del\ locale})^3$$

Per esempio, è considerato valore accettabile una temperatura superficiale della pavimentazione compresa tra 19 °C e 26 °C o, in presenza di sistema di riscaldamento radiante a pavimento, di 29 °C. Per la sola stagione invernale il limite di differenza termica in direzione orizzontale, oltre il quale vi è asimmetria in presenza di finestre o superfici verticali fredde, è di 10 °C (vedi figura 1.4). Per il soffitto riscaldato in direzione verticale l'asimmetria si riscontra con valori uguali o superiori a 5 °C.
La figura 1.4 illustra la zona di comfort in relazione alla temperatura interna dell'aria, la temperatura superficiale interna e l'umidità relativa interna. Fattore determinante per il comfort termico non è la temperatura interna ma la sensazione di calore, cioè la differenza tra la temperatura ambiente e quella delle superfici interne degli elementi costruttivi: quanto minore è tale differenza, tanto maggiore è il comfort termico.

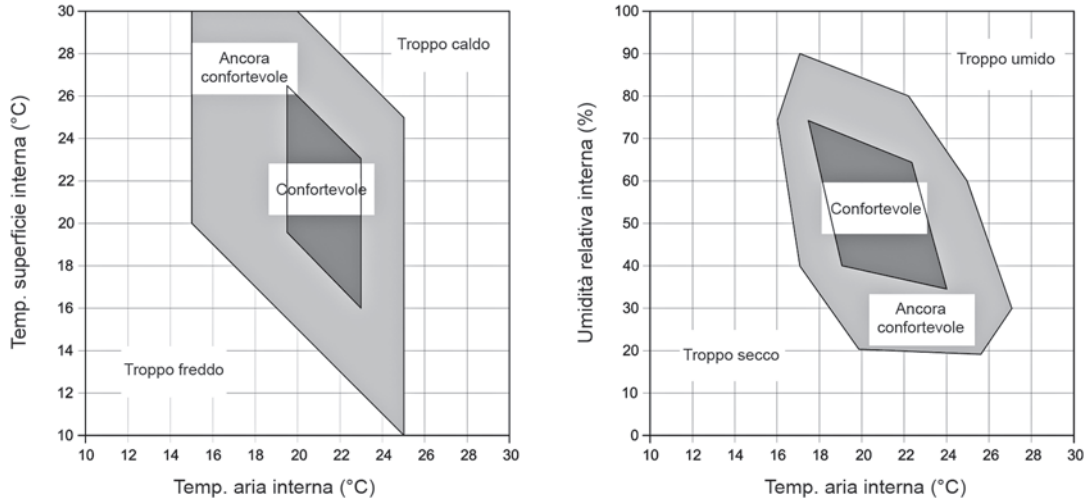


Figura 1.4. Area di comfort in funzione della temperatura dell'aria interna, della temperatura superficiale media interna e dell'umidità relativa dell'ambiente

Un edificio ben coibentato, caratterizzato da uno sviluppo dell'isolamento ottimale anche nei punti critici, non ha problemi di qualità dell'aria dovuti a muffe provocate dai ponti termici né di dispersione di calore eccessiva in alcun punto.
Se si considera che mediamente alle nostre latitudini l'uomo trascorre l'80% della sua vita in un edificio, ne consegue che l'attenzione al consumo energetico e alla riduzione di perdite di calore dall'involucro è ripagata non solo in termini di riduzione dei costi di riscaldamento e raffrescamento, ma anche dal maggior comfort interno e nell'aumento del valore dell'immobile.

[3] $T_{media\ radiante\ del\ locale} = \sum S_i \cdot T_i / \Sigma S_i$ cioè la media delle temperature radianti delle superfici dell'involucro ove S è l'area della superficie che delimita l'ambiente; S_i la superficie *i-esima*.

Tabella 1.3. Costi per l'isolamento termico

Costi fissi a base dell'investimento per ponteggi, colla, intonaco, tasselli	65.00 €/m^2
Costi aggiunti per l'isolamento, variabili in base allo spessore dello strato isolante per centimetro (esempio: sistema isolante con 10 cm di spessore)	0.85 €/m^2 (73.50 €/m^2)
Costi per il nuovo intonaco comunque richiesti che possono essere detratti in quanto non contribuiscono all'isolamento termico	– 40.00 €/m^2

In una ristrutturazione la spesa aggiuntiva per l'isolamento termico è solo quella dello spessore isolante, i costi per le impalcature, l'intonaco nuovo, la colla, ecc. sono comunque imprescindibili in una riqualificazione. Nella figura 1.10 la linea blu indica i costi di investimento per un sistema di isolamento termico comprendendo anche i costi per l'intonaco e le impalcature, ecc.; la linea rossa rappresenta la somma degli investimenti per il nuovo isolamento ed energia. L'energia calorifica risparmiata cresce in maniera più che proporzionale all'aumentare dello spessore dello strato isolante (linea verde) sino a raggiungere l'isolamento ottimale.

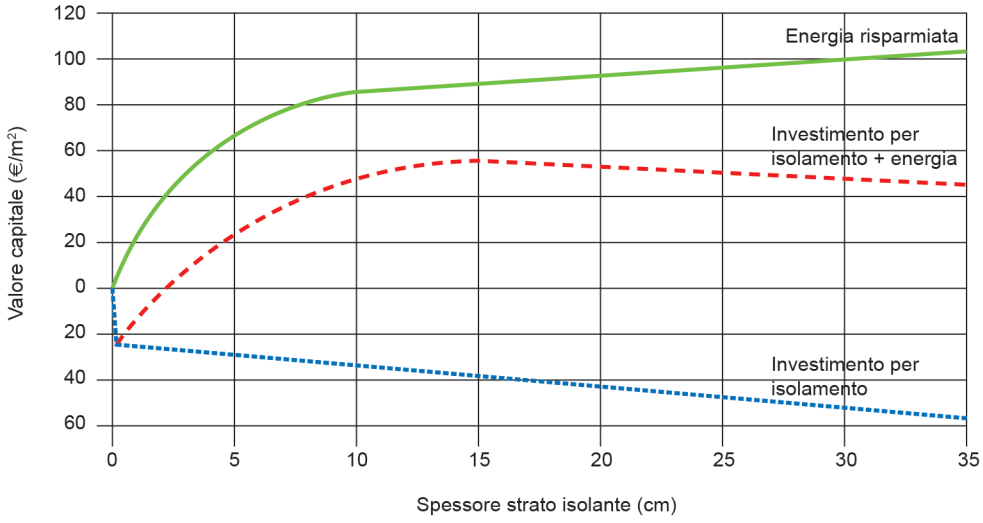


Figura 1.10. Investimenti per isolamento e risparmio di energia

La redditività di un provvedimento è calcolata secondo il metodo del valore capitale. Si valutano i costi energetici risparmiati ogni anno sommandoli per la durata del provvedimento: il valore capitale così calcolato, in rapporto al valore dei costi energetici risparmiati, è paragonato ai costi di investimento. Un provvedimento è definito economico e conveniente quando i costi energetici risparmiati sono maggiori di quelli dell'investimento in un determinato arco temporale, detto *tempo di ritorno dell'investimento*.
La figura 1.11 illustra come, senza incentivi economici statali, la curva migliore a livello finanziario sia raggiungibile con uno spessore dell'isolante compreso tra i 12 e i 20 cm. Il valore ottimale a livello ecologico sarebbe quello corrispondente a uno spessore di più di 25 cm; il massimo della curva continua è tuttavia troppo basso. Solo in presenza di incentivi l'*optimum* finanziario, ottenibile con uno spessore dello strato di 20 cm, si avvicinerebbe al miglior risultato ecologico proposto.

2. IL PONTE TERMICO

2.1. Definizione di ponte termico

Un edificio può essere considerato, dal punto di vista degli scambi energetici, un sistema termodinamico nel quale i flussi termici sono scambiati attraverso il suo involucro. Le leggi della fisica e i metodi di calcolo matematico relativi a conduzione, convenzione e irraggiamento, individuano e quantificano i processi di scambio del calore attraverso le pareti esterne dell'edificio. In queste ultime, quando la resistenza termica cambia in modo significativo per la discontinuità dei materiali, per la variazione dello spessore della costruzione o per discontinuità geometrica, si è in presenza di ponti termici. La loro eliminazione favorisce il risparmio dei costi di riscaldamento, la riduzione delle emissioni di CO_2, la conservazione delle risorse di energia e il mantenimento dell'edificio. A tal fine, una progettazione consapevole e attenta agli aspetti energetici è indispensabile sia nelle ristrutturazioni sia nelle nuove costruzioni.
Il D.Lgs. 311 del 2006 definisce il ponte termico in corrispondenza di innesti di elementi strutturali (quali i solai e le pareti verticali o tra pareti verticali) come discontinuità di isolamento termico. Quando la trasmittanza termica in corrispondenza del ponte termico non supera per più del 15% quella della parete corrente il ponte termico si considera corretto.

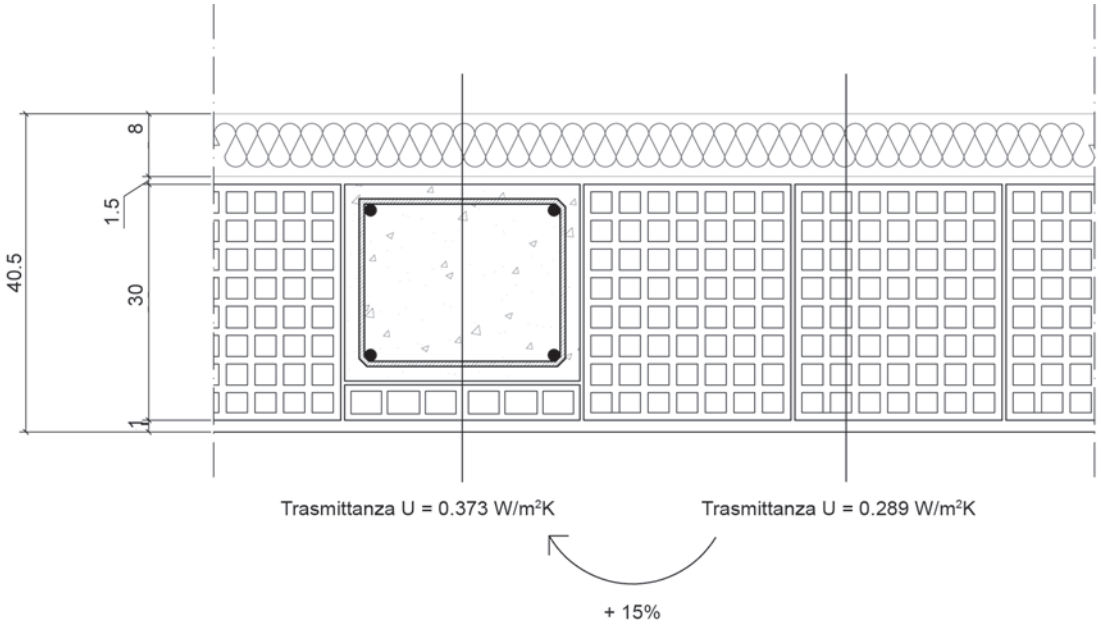


Figura 2.1. Ponte termico causato dalla discontinuità di trasmittanza della parete

La figura 2.21 è riferita all'isolamento termico interno solo nella zona del pilastro con muro di tamponamento in laterizio. Con l'isolamento posto all'interno, in prossimità del pilastro, la temperatura è superiore al centro di detto pilastro e inferiore al termine dell'isolamento, in questa situazione il ponte termico è maggiore.

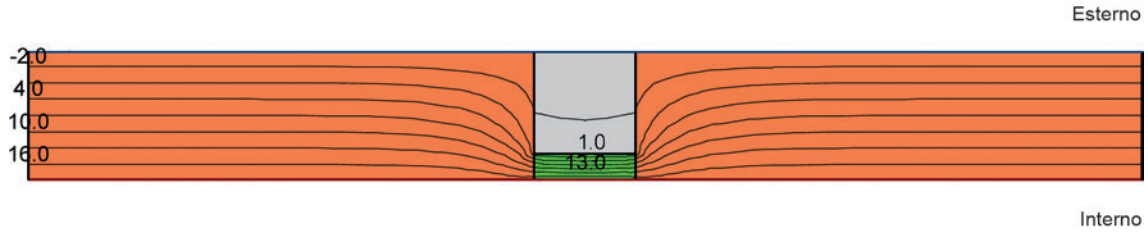


Figura 2.21. Isolamento interno in prossimità del pilastro

Nella figura 2.22 il calcolo delle isoterme avviene in presenza del pilastro, per il flusso di calore il calcolo è eseguito con e senza pilastro, si sommano poi i due ponti termici per trovare il flusso di calore totale.

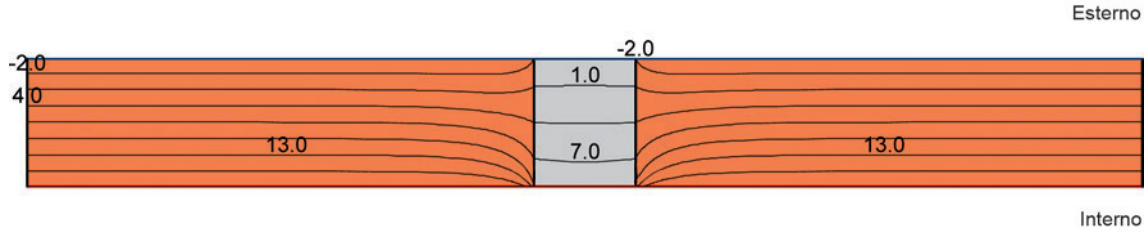


Figura 2.22. Ponte termico causato dalla presenza del pilastro

2.4.1.1. Calcolo temperatura superficiale interna e f_{Rsi}

Il D.Lgs. 311/06 prescrive di garantire un fattore critico $f_{Rsi} = 0.865$.

$$f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e)/(\theta_i - \theta_e)$$

dove

f_{Rsi} = differenza tra la temperatura della superficie interna e dell'aria esterna in rapporto alla differenza tra la temperatura dell'aria interna ed esterna, calcolata con una resistenza superficiale interna R_{si}
θ_{si} = temperatura superficiale interna
θ_e = temperatura dell'aria esterna
θ_i = temperatura dell'aria interna.

Si ricorda che la temperatura superficiale interna è data da:

$$\theta_{si} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot R_{si}/R$$

Per esempio con $R = 0.90$ m²K/W

$\theta_e = 0$ °C
$\theta_i = 20$ °C

D.Lgs. 311/06; con umidità relative superiori al 65% si deve tener conto dei valori indicati dal UNI EN ISO 13788.

Tabella 2.7. Temperatura e pressione di saturazione

Valore pressione di saturazione in Pa → Temperatura ϑ in °C +/- (| ϑ | + Δϑ)										
Δϑ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ϑ										
-20	103	102	101	100	99	98	97	96	95	94
-19	113	112	111	110	109	108	107	106	105	104
-18	124	123	122	121	120	119	117	116	115	114
-17	137	135	134	133	132	130	129	128	127	126
-16	150	149	147	146	145	143	142	141	139	138
-15	165	163	162	160	159	157	156	154	153	152
-14	181	179	177	176	174	173	171	169	168	166
-13	198	196	194	193	191	189	187	186	184	182
-12	217	215	213	211	209	207	205	203	202	200
-11	237	235	233	231	229	227	225	223	221	219
-10	259	257	255	252	250	248	246	244	241	239
-9	283	281	278	276	274	271	269	266	264	262
-8	309	307	304	301	299	296	294	291	288	286
-7	338	335	332	329	326	323	320	318	315	312
-6	368	365	362	359	356	353	350	347	344	341
-5	401	398	394	391	388	384	381	378	375	371
-4	437	433	430	426	422	419	415	412	408	405
-3	475	471	468	464	460	456	452	448	444	441
-2	517	513	509	504	500	496	492	488	484	479
-1	562	557	553	548	544	539	535	530	526	521
-0	611	606	602	597	593	589	584	580	576	572
0	611	615	619	624	629	633	638	642	647	652
1	656	661	666	671	676	680	685	690	695	700
2	705	710	715	721	726	731	736	741	747	752
3	757	763	768	774	779	785	790	796	801	807
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
5	872	878	884	890	897	903	909	915	922	928
6	935	941	948	954	961	967	974	981	988	994
7	1001	1008	1015	1022	1029	1036	1043	1050	1058	1065
8	1072	1080	1087	1094	1102	1109	1117	1124	1132	1140
9	1147	1155	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1219
10	1227	1236	1244	1252	1261	1269	1278	1286	1295	1303
11	1312	1321	1330	1338	1347	1356	1365	1374	1383	1393
12	1402	1411	1420	1430	1439	1449	1458	1468	1477	1487
13	1497	1507	1517	1527	1537	1547	1557	1567	1577	1587
14	1598	1608	1619	1629	1640	1650	1661	1672	1683	1693
15	1704	1715	1726	1738	1749	1760	1771	1783	1794	1806
16	1817	1829	1841	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
17	1937	1949	1961	1974	1986	1999	2012	2024	2037	2050
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2182
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
20	2337	2351	2366	2381	2395	2410	2425	24440	2455	2470
21	2486	2501	2516	2532	2547	2563	2579	2594	2610	2626
22	2642	2659	2675	2691	2708	2724	2741	2757	2774	2791
23	2808	2825	2842	2859	2876	2894	2911	2929	2947	2964
24	2982	3000	3018	3036	3055	3073	3091	3110	3128	3147
25	3166	3185	3204	3223	3242	3261	3281	3300	3320	3340
26	3359	3379	3399	3419	3440	3460	3480	3501	3522	3542
27	3563	3584	3605	3626	3648	3669	3691	3712	3734	3756
28	3778	3800	3822	3844	3867	3889	3912	3934	3957	3980
29	4003	4026	4050	4073	4097	4120	4144	4168	4192	4216
30	4241	4265	4289	4314	4339	4364	4389	4389	4439	4464

3. NORMATIVE E METODI DI CALCOLO

3.1. Norme comunitarie e nazionali

Il quadro legislativo in materia di efficienza energetica è stato interessato negli ultimi anni da un forte dinamismo con molteplici riflessi pratici sulle modalità con cui gli edifici sono costruiti, riqualificati e gestiti.
I temi affrontati nei documenti legislativi sono diversificati e complessi; le finalità della presente analisi si concentrano sulla determinazione e sulla risoluzione dei ponti termici. Si porrà maggior attenzione, pertanto, agli aspetti inerenti l'involucro, alle soluzioni delle stratigrafie delle componenti dell'involucro edilizio, comprese le valutazioni termo igrometriche.
La più recente normativa a livello comunitario è la Direttiva del 19 maggio 2010 (2010/31/UE) che promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione europea e valuta interventi al fine di evitare il surriscaldamento estivo alla luce di una crescente proliferazione degli impianti di condizionamento dell'aria. All'art. 9 la direttiva auspica un numero crescente di edifici dalle prestazioni cosiddette *a energia quasi zero*.
Un ruolo fondamentale è stato svolto dalla Direttiva europea 2002/91/CE (modificata dalla 2010/31/UE che all'art. 29 l'abroga con effetto dal 1 febbraio 2012) e dai relativi decreti nazionali di attuazione: Decreto Legislativo 192/05, Decreto Legislativo 311/06 e il D.P.R. 2 aprile 2009 n. 59.
La Direttiva europea 2002/91/CE ha introdotto una metodologia di calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici imponendo requisiti minimi per fabbricati di nuova costruzione o esistenti di grande metratura, qualora sottoposti a ristrutturazione. Tra i contenuti di maggior rilievo vi sono la certificazione energetica, l'ispezione periodica delle caldaie e degli impianti di climatizzazione. L'Italia, come previsto per ciascun stato membro dell'Unione europea, ha recepito la direttiva con un proprio strumento legislativo, il D.Lgs. 192/05, mentre il D.Lgs. 311/06 ne ha riveduto e integrato i contenuti.
Il D.Lgs. 192/2005 è l'attuazione della Direttiva europea 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia, il D.Lgs. 311/06 si configura come un inquadramento normativo contenente principi di carattere generale rimandando gli aspetti operativi e di carattere applicativo a successivi decreti di attuazione e alle linee guida nazionali per la certificazione energetica.
Il D.P.R. 2 aprile 2009 n. 59, che definisce le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici, costituisce il regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del D.Lgs. 192/05.
La legislazione nazionale in alcune regioni è stata affiancata o sostituita da normative locali in virtù del Decreto legislativo 112/98 (art. 30) che ha conferito alle regioni funzioni in materia di energia e di certificazione energetica. Accanto a regolamentazioni di prestazioni e requisiti minimi, si sono sviluppati strumenti per incentivare politiche di efficienza: la Legge n. 296 del 27

dicembre 2006 introduce la possibilità di accedere a detrazione d'imposta del 55% per le spese sostenute per interventi di riqualificazione energetica su edifici esistenti, riconfermata con la Legge n. 244 del 27 dicembre 2007, attualmente in vigore. Il Decreto legislativo 115/08 introduce agevolazioni di tipo volumetrico e definisce nell'Allegato III i soggetti abilitati alla certificazione energetica degli edifici[1].

Ai sensi del D.Lgs. 311/06 si devono verificare requisiti precisi in termini di isolamento termico dei componenti che delimitano l'ambiente climatizzato. L'indagine sull'assenza di condensazioni superficiali e la verifica di eventuali condensazioni interstiziali delle pareti limitate alla quantità rievaporabile sono prescritti dal comma 8 dell'articolo 11 del D.Lgs. 311/06 (Allegato I) per tutte le categorie di edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3 del D.P.R. 412/93, a eccezione della categoria E.8.

Le strutture edilizie, opache o trasparenti, che costituiscono l'involucro delimitando locali climatizzati, devono essere caratterizzate da valori di trasmittanza termica U (W/m^2K) inferiori ai valori limite imposti dal D.Lgs. 311/06 in funzione della tipologia del componente in esame e delle condizioni climatiche della zona. La trasmittanza termica da considerare, per il confronto con i limiti di legge, coincide con quella del componente (parete corrente) a condizione che i ponti termici siano corretti. Quando la trasmittanza della parete fittizia (zona in corrispondenza con il ponte termico) non supera per più del 15% la trasmittanza termica della parete corrente, il ponte termico si definisce corretto.

La UNI EN ISO 10211-1 e la UNI EN ISO 10211-2 definiscono i ponti termici, la UNI EN ISO 7345 del 1999 ha come tema l'isolamento termico e la definizione delle grandezze fisiche.

La UNI EN ISO 10211-1 del 1998 è stata aggiornata nel 2008 solo in inglese: oggetto della norma sono proprio i ponti termici, i flussi termici, le temperature superficiali e i relativi metodi generali di calcolo. Nell'appendice G.2 della UNI EN ISO 1022-1 si analizzano le temperature interne ed esterne e la variabilità dell'umidità interna. Le oscillazioni delle temperature all'interno e all'esterno degli ambienti determinano differenze di temperatura non costanti nel tempo. Questo regime non stazionario, tipico delle situazioni reali, rende impossibile stabilire in modo preciso la temperatura superficiale di una parete e quindi la possibile formazione di condensa. Si stanno valutando criteri di analisi compatibili con questa variabilità al fine di esaminare il rischio di formazione di muffa.

La UNI EN ISO 10211-2 del 2003 (solo inglese) pone l'attenzione sui ponti termici lineari.

Lo scambio di calore per trasmissione attraverso i ponti termici e il coefficiente di trasmissione termica lineica può essere calcolato secondo la UNI EN ISO 14683 del 2008 che contiene metodi semplificati con i relativi valori di riferimento.

Le norme UNI/TS 11300 del 2008 rinviano per la correzione dei ponti termici alla norma UNI EN ISO 14683: norma semplificata che, a sua volta, rimanda alla UNI EN ISO 10211 per il calcolo analitico.

Le UNI TS 11300 normano le prestazioni energetiche degli edifici: la prima parte è riferita alla determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale; la seconda parte al fabbisogno di energia primaria e ai rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

[1] Decreto legislativo 30 maggio 2008, n. 115 è l'attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e l'abrogazione della direttiva 93/76/CEE (G.U. 3 luglio 2008, n. 154). Il decreto contribuisce al miglioramento della sicurezza dell'approvvigionamento energetico e alla tutela dell'ambiente attraverso la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, stabilisce un quadro di misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia sotto il profilo costi e benefici. La Direttiva 2006/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 aprile 2006 concerne l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici.

4. CONSEGUENZE E RISOLUZIONI DEI PONTI TERMICI

4.1. Costruire liberi dai ponti termici

L'auspicabile traguardo delle case a emissioni zero, ancora ben lungi dall'essere raggiunto, induce allo studio e all'applicazione di nuove tecnologie di costruzione per migliorare gli inquietanti scenari in termini di consumi energetici e di emissioni di anidride carbonica.
Nella progettazione dei nuovi edifici l'orientamento ha un ruolo fondamentale rispetto alle condizioni di soleggiamento e consente il miglior sfruttamento degli apporti gratuiti, così come l'involucro permette di ridurre le dispersioni termiche nella stagione invernale e le entrate di calore in estate. L'eliminazione dei ponti termici favorisce il risparmio dei costi di riscaldamento, la riduzione delle emissioni di CO_2, la conservazione delle risorse naturali e il mantenimento dell'edificio. La progettazione dovrebbe essere sempre consapevole e attenta anche ai dettagli sia nelle ristrutturazioni sia nelle nuove costruzioni.
In questo capitolo si analizza la coibentazione degli edifici nelle riqualificazioni energetiche di fabbricati esistenti e negli elementi costituenti le nuove costruzioni. La disponibilità di diversi sistemi e di materiali isolanti consente d'intervenire nelle più svariate tipologie edilizie.
Il sistema a cappotto rappresenta una soluzione semplice ed efficace per l'isolamento termico: consiste nel rivestire dall'esterno le pareti, riducendo drasticamente l'incidenza dei possibili ponti termici grazie all'uniformità e continuità dello strato isolante.
Isolare un fabbricato intervenendo dall'interno è una pratica alla quale si dovrebbe ricorrere solo in casi di riqualificazione energetica di edifici soggetti a particolari vincoli sull'estetica della facciata o in risposta a specifiche norme tecniche comunali (per esempio limiti alle distanze). In questo sistema d'isolamento, soggetto a fenomeni di condensazione interstiziale in relazione alla propria conformazione e caratteristica igrotermica, è indispensabile l'utilizzo della barriera al vapore per evitare problemi di umidità nei componenti l'involucro degli edifici.
L'utilizzo del materiale isolante all'interno di intercapedini in pareti con doppio paramento murario (a cassa vuota) è una soluzione con un'ampia diffusione in Italia; se questo sistema ha il vantaggio di mantenere lo strato isolante in condizioni riparate, è però maggiormente soggetto alla presenza di ponti termici lineari (travi di bordo e pilastri) che possono interrompere la continuità dell'isolante. Per ridurre l'incidenza della discontinuità della coibentazione è, dunque, indispensabile un'attenta progettazione ed esecuzione dei nodi costruttivi.
L'involucro di un edificio è definito libero da ponti termici quando la somma delle perdite legate a questi ultimi tende allo zero. I regolamenti tedeschi sull'isolamento, con i quali è iniziato il miglioramento termotecnico degli edifici[1], considerano la formula:

$$\Psi \leq 0.01 \text{ W/mK}$$

[1] I primi regolamenti tedeschi risalgono a più di trent'anni fa, cioé al 1977, si sono sviluppati nel 1982 e perfezionati nel 1995.

imprescindibile nei progetti con ottime caratteristiche energetiche. Sviluppati in Germania nel 1999 dal gruppo di lavoro sulle case passive, i principi e gli esempi pratici di costruzioni di allora sono ancora validi[2].
Questo tipo di edificazione si è esteso ben oltre l'applicazione su case unifamiliari; si sono elaborati progetti in altri campi applicativi evidenziando le potenzialità del costruire senza ponti termici.

4.2. Risoluzioni dei ponti termici nelle ristrutturazioni

La maggior parte degli edifici esistenti è di qualità energetica mediamente bassa e, sebbene vi siano tipologie di fabbricati che non possono essere innovati, i possibili miglioramenti sono notevoli nella stragrande maggioranza delle costruzioni. Le riduzioni di consumi possono raggiungere anche il 90% e, inoltre, all'interno di un efficiente sistema edificio/impianto, le fonti di energia rinnovabile possono arrivare a significative sfere applicative.
Attraverso la termografia è possibile individuare, anche nelle ristrutturazioni, i flussi di calore verso l'esterno superiori rispetto al resto dell'involucro edilizio. Si tratta di ambiti caratterizzati da condizioni geometriche particolari o punti critici dal punto di vista costruttivo: solai dei bal-

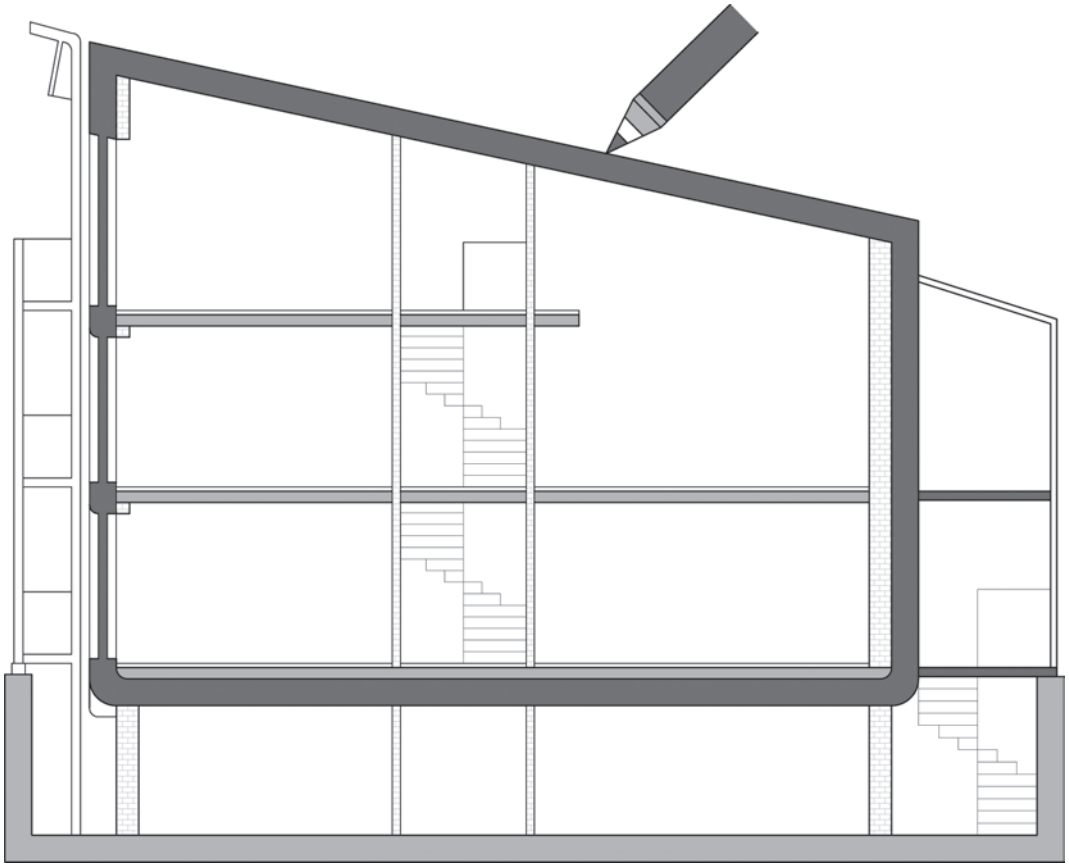


Figura 4.1. Principio del cosiddetto *pennarello rosso* per indicare la continuità della coibentazione

[2] Esempi sono le case passive di Darmstadt, quella unifamiliare di Gernot Vallentin, la casa a schiera con struttura massiccia a Viernheim e altre in legno o in costruzioni miste.

è il valore della trasmittanza termica dell'intera finestra in W/m^{2}K. L'U_w è determinato oltre che dal telaio e dal vetro anche da un valore correttivo variabile, a seconda del materiale impiegato per il distanziale. Quest'ultimo ha un ruolo importante nella conduttività termica del serramento. Il *warm edge* (giunto caldo) è un profilo distanziatore del vetro termicamente migliorato: tipici *warm edge* sono quelli in PVC, in acciaio inox oppure un misto tra i due materiali[20]. L'impiego di questi prodotti a elevato isolamento termico al posto dei tradizionali in alluminio, consente il miglioramento di circa 2-5 °C della temperatura superficiale del bordo del vetro, riduce la condensa, la formazione di muffa e prolunga la vita del telaio. Il giunto caldo, inoltre, riduce di circa un decimo del valore U_w della finestra: per ottenere un simile miglioramento agendo sul telaio occorrerebbe migliorare almeno del 30% il valore di U_f.
L'involucro trasparente svolge l'importante funzione di filtro tra ambiente interno ed esterno in grado di bilanciare il benessere visivo con le esigenze di controllo termico e acustico. La scelta di materiali ad alte prestazioni e di sistemi di vetratura più appropriati al contesto climatico possono trasformare il sistema finestra da elemento critico a opportunità progettuale.
Elemento base del vetro camera è il vetro *float*, dal nome del processo produttivo che prevede il galleggiamento del vetro fuso in un bagno di stagno: è un vetro siliceo composto da sostanze vetrificanti, fondenti e stabilizzanti, cui si aggiungono sostanze per colorare (ossidi metallici)

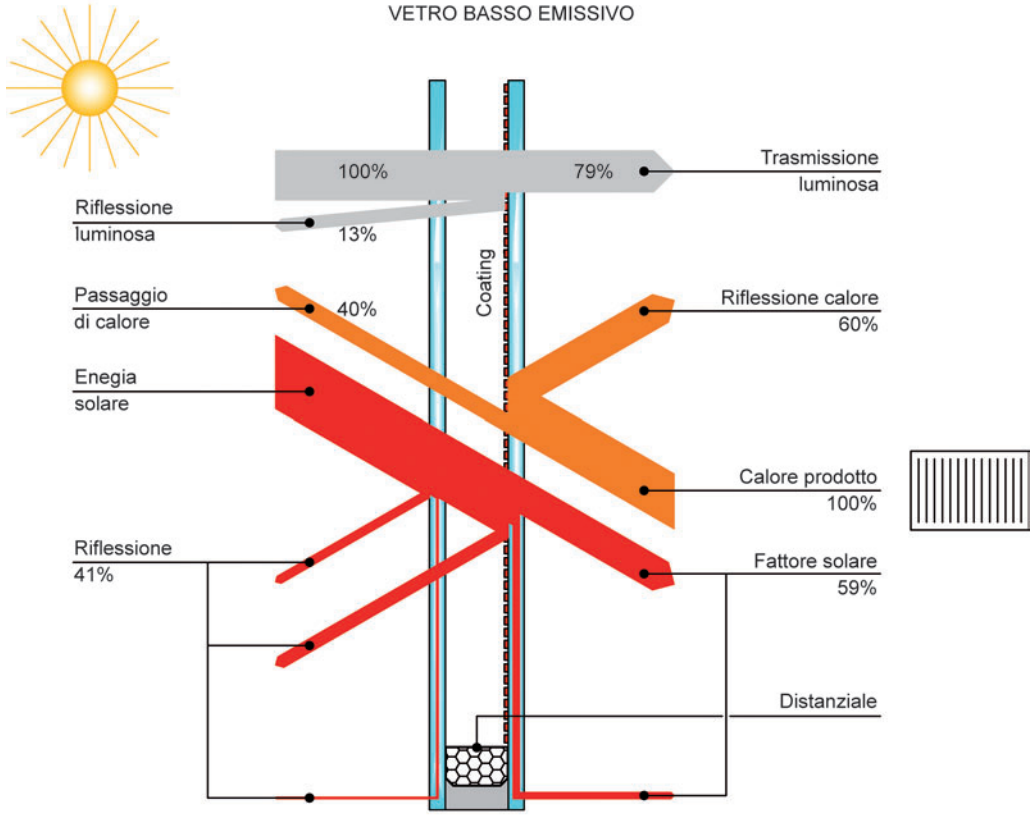


Figura 4.45. Vetro basso emissivo

[20] La conduttività dell'alluminio è 160.00 W/mK, quella dell'acciaio inox 17.00 W/mK, del butyl matrix 0.27 W/mK, ci sono materiali speciali con conduttività di 0.19 W/mK.

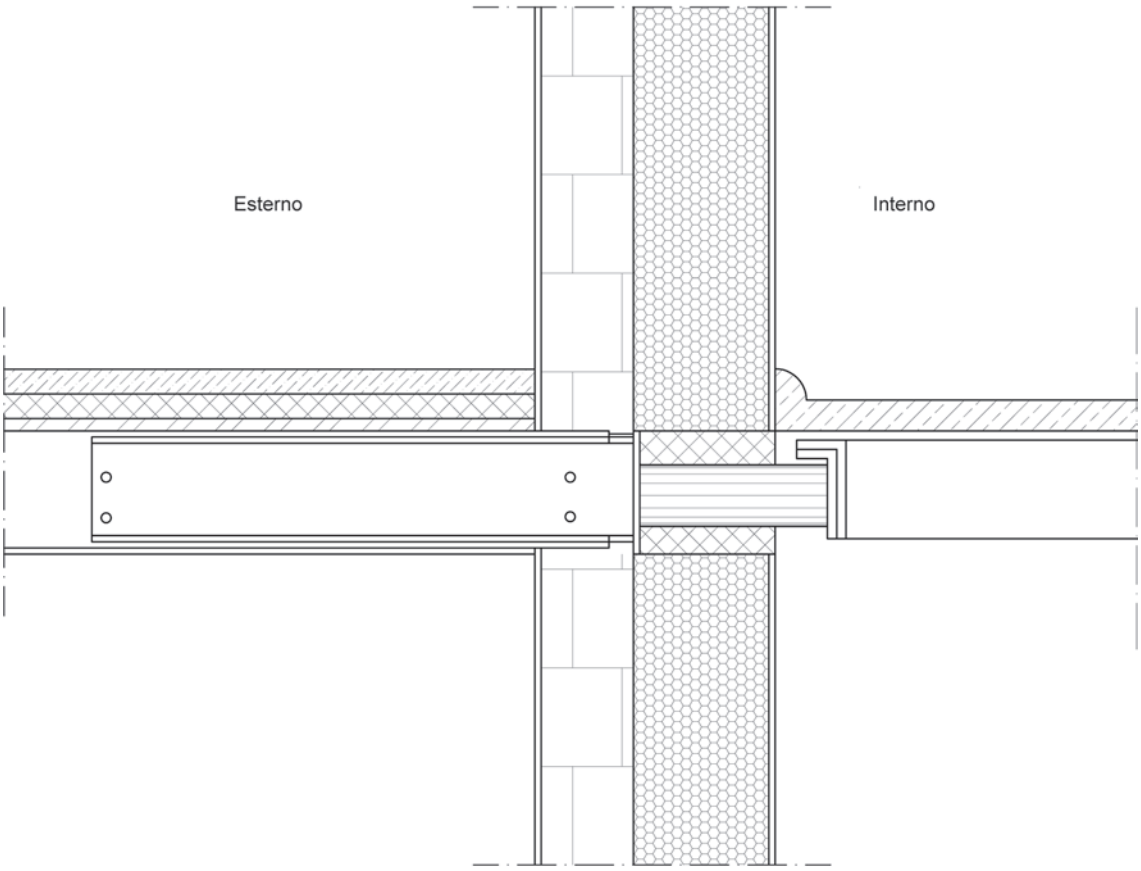


Figura 4.55. Collegamento del balcone a un solaio di travi in legno

Nelle solette a sbalzo (sia in acciaio sia in cemento armato) il trasferimento dei momenti flettenti richiede normalmente un legame massiccio del balcone e provoca ponti termici più alti. Ditte specializzate mettono a disposizione strumenti in grado di separare termicamente gli elementi costruttivi l'uno dall'altro, garantendo, nel contempo, la trasmissione delle sollecitazioni strutturali e la continuità della coibentazione.
Tecnologie innovative consentono l'eliminazione totale dei danni strutturali causati dall'umidità, massime prestazioni e minimo consumo energetico.
L'installazione è semplice (figura 4.58), il montaggio è rapido grazie al peso ridotto e ai reggispinta integrati (inseriti nel materiale isolante) in calcestruzzo leggero ad alte prestazioni e rinforzato con microfibre in acciaio. Il principio si basa sull'uso di un modulo di armatura pronto per il raccordo di balconi. Nel punto in cui è necessaria la coibentazione, il corpo isolante sostituisce il calcestruzzo con il polistirolo e il comune acciaio per cemento armato con acciaio speciale inossidabile.
Sono possibili differenti applicazioni: solai in calcestruzzo armato con travi in acciaio a sbalzo (figura 4.59) o connettori termoisolanti per strutture a sbalzo in legno. L'elemento è costituito da una gabbia di armatura con isolamento integrato per il montaggio sul bordo del solaio e da una piastra per il fissaggio della struttura al legno.
Si possono realizzare giunti isolati termicamente anche nelle strutture in acciaio (figura 4.61). Il sistema rappresenta l'avanguardia della tecnica per le costruzioni in acciaio secondo le norme

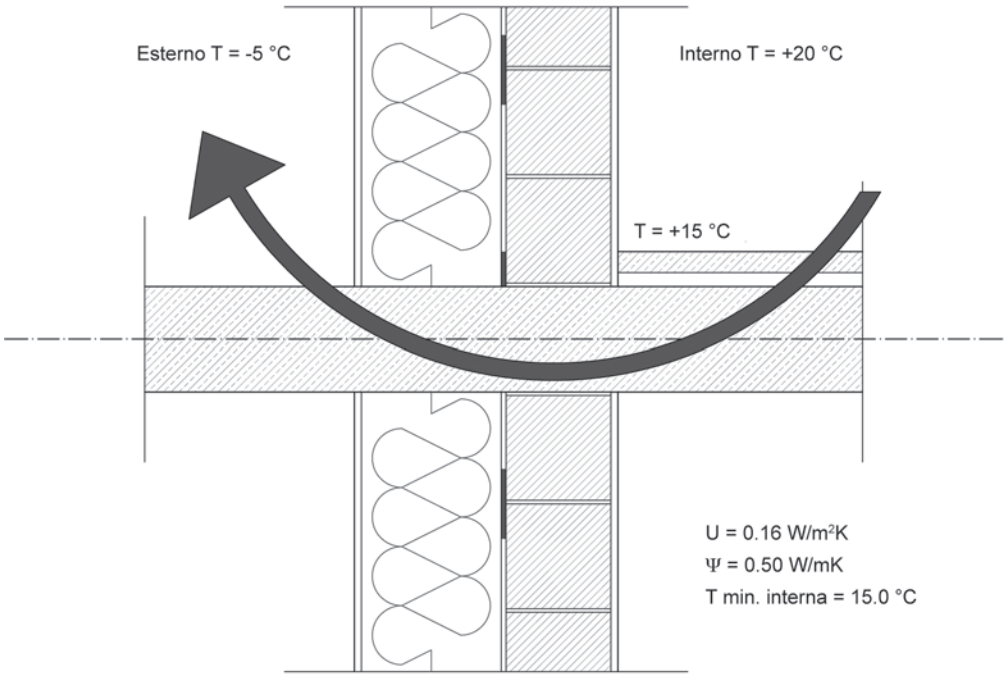


Figura 4.56. Balcone a sbalzo senza taglio termico

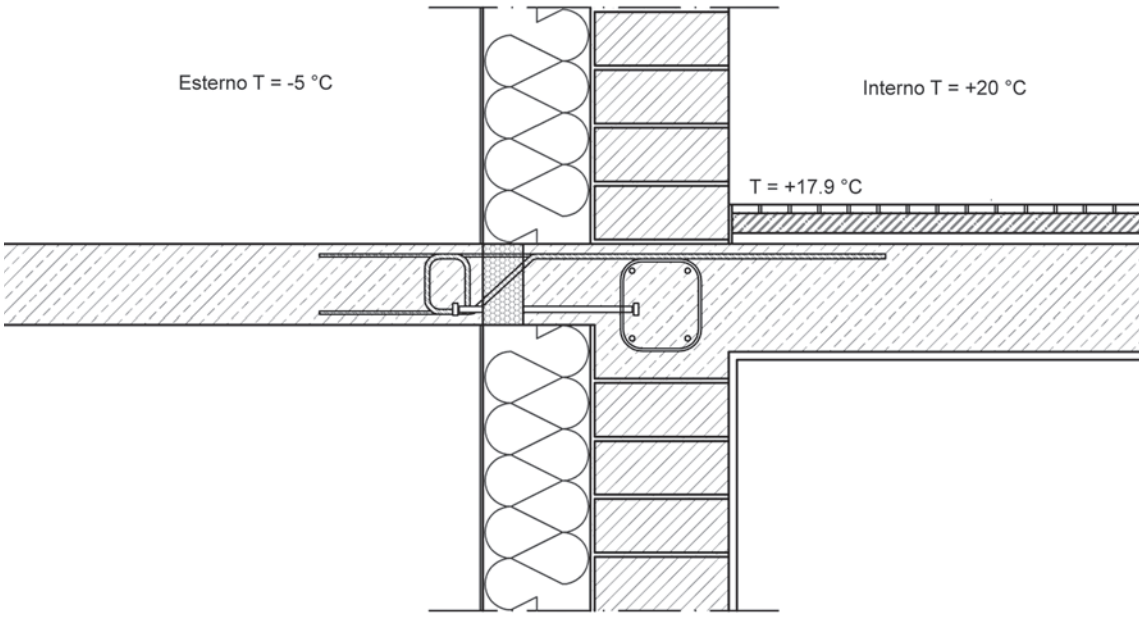


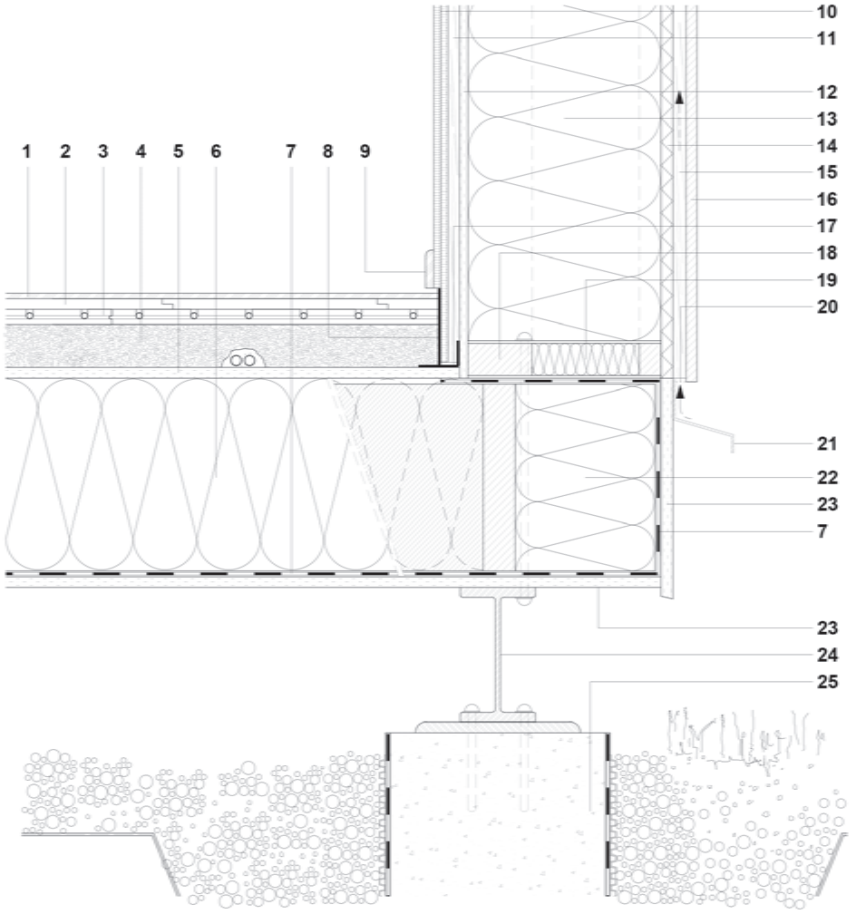
Figura 4.57. Giunto termoisolante per balcone a sbalzo

TECNOLOGIA A SECCO - LEGNO

particolare S-L 01.05

PARETE - ATTACCO A TERRA - chiusura verticale opaca con facciata ventilata e rivestimento in pannelli di legno - solaio rialzato su esterno

scala 1:10



1 pavimentazione interna
2 pannello in fibrogesso
3 pannello radiante in fibrogesso
4 granulato di legno
5 pannello OSB (freno al vapore - tenuta all'aria)
6 isolante in fibra di legno bassa densità entro la struttura del solaio
7 strato di tenuta
8 isolante acustico
9 zoccolino
10 doppia lastra in cartongesso
11 struttura verticale in legno per fissaggio cartongesso
12 pannello OSB (freno al vapore - tenuta all'aria)
13 isolante in fibra di legno bassa densità entro la struttura verticale della parete
14 isolante in fibra di legno alta densità
15 intercapedine - listello in legno per fissaggio pannello di rivestimento
16 pannello di rivestimento
17 banda adesiva
18 struttura orizzontale parete
19 isolante in fibra di legno bassa densità entro la struttura orizzontale
20 griglia di ventilazione
21 scossalina di protezione
22 isolante in fibra di legno bassa densità
23 pannello di rivestimento esterno
24 profilo in ferro per supporto struttura solaio
25 fondazione in cls armato

L'edificio passivo sfrutta al massimo gli apporti gratuiti (solari e interni), la sua progettazione è, perciò, calibrata in funzione del suo reale utilizzo. Fa differenza sapere se si stende la biancheria o si utilizza un asciugatore, se si predilige la vasca da bagno alla doccia, se i computer o i televisori sono in ogni stanza. Importante è conoscere le abitudini della famiglia per ridurre al minimo il sistema impiantistico necessario al comfort di coloro che fruiscono gli ambienti.
Oltre alla progettazione e alla realizzazione diventa fondamentale il corretto uso. Chi abita un edificio passivo dovrebbe, infatti, avere consapevolezza dell'importanza di uno stile di vita attento e sensibile alla sostenibilità. Rilevante è il monitoraggio delle case passive nei primi mesi di utilizzo proprio per calibrare con correttezza le esigenze degli utenti e le risposte del sistema edificio/impianti.

6.2.2. Bilancio energetico edificio/impianti

Se l'involucro è progettato e realizzato in modo corretto, è possibile pensare agli impianti focalizzando l'attenzione a obiettivi più ambiziosi in termini di risparmio energetico e comfort. Nel bilancio energetico dell'edificio passivo l'involucro ha un ruolo fondamentale rendendo il sistema impiantistico una strumentazione accessoria imprescindibile ma di minor rilevanza rispetto a un edificio tradizionale.
Negli edifici ben coibentati il fabbisogno da compensare con l'impianto di riscaldamento o raffrescamento è minimo e, di conseguenza, gli impianti installati hanno una minore potenza rispetto a quelli inseriti in fabbricati non isolati.
Nelle case passive gli impianti regolano il comfort mediante sistemi di ventilazione in grado di ridurre anche gli effetti di gas nocivi; la funzione e le potenzialità degli apparecchi cambiano in maniera radicale.
I consumi per il raffrescamento sono in progressivo aumento in tutti i paesi mediterranei e dal 2003, a causa del surriscaldamento del pianeta, la componente maggiormente energivora in Europa è costituita dalla climatizzazione degli ambienti. Negli edifici passivi l'attenzione posta al comportamento nelle stagioni più calde determina scelte accurate in termini di orientamento dell'edificio, ombreggiatura e schermature solari dell'involucro tali da rendere superfluo un sistema di condizionamento. È, inoltre, possibile studiare la ventilazione naturale durante la stagione estiva con l'apertura notturna di alcune finestre in grado di determinare una piacevole sensazione all'interno dell'abitazione.

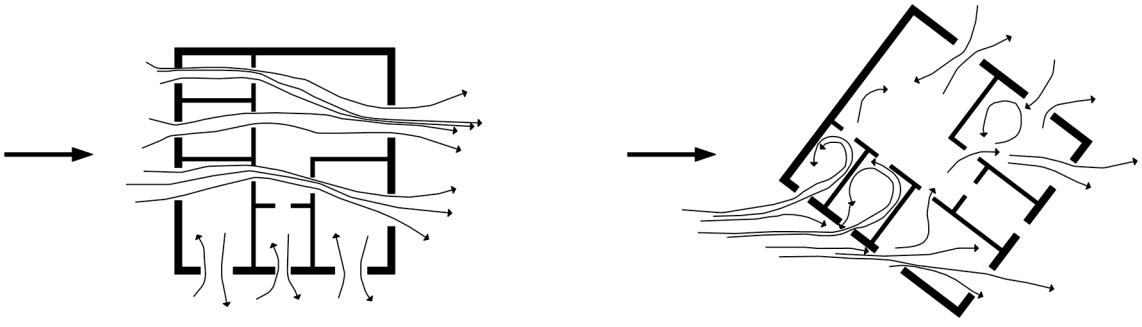


Figura 6.2. Un corretto orientamento favorisce gli apporti solari e la ventilazione naturale

Il vero e proprio sistema di comfort delle case passive permette soluzioni "su misura" per il singolo utente; è possibile bilanciare la ventilazione meccanica in funzione di richieste specifiche consen-