

Si ringraziano:

Il prof. *Ing. Carlo Caldera* - relatore -, che ha, in tempi ordinari e straordinari nonostante i suoi molteplici impegni, assistito, consigliato, corretto, guidato l'organizzazione, la progettazione e la realizzazione del lavoro di ricerca.

Il prof. *Ing. Riccardo Nelva* che ha supervisionato e consigliato puntualmente negli anni l'organizzazione metodologica della ricerca.

I proff. *Arch. Caterina Mele e Paolo Piantanida* che hanno seguito e assistito alle prime fasi di ricerca e sviluppo delle indagini conoscitive.

La dott. sa di ricerca *Ing. Alice Gorrino* per i suoi precisi, mirati e puntuali consigli sull'interpretazione della normativa energetica e per i suggerimenti per la modellazione agli elementi finiti.

L'Associazione Nazionale Costruttori Edili, ANCE Piemonte nella persona dell'*Arch. Andrea Bondi* per i contatti e le segnalazioni sui cantieri attivi e visitabili.

L'associazione *Urban Center di Torino* per "Imprese, Cantieri, Architetture" con visite ai cantieri di costruzioni.

L'impresa edile *Peris Costruzioni* nella persona dell'*Ing. Paolo Peris* per aver acconsentito di accedere alle aree di cantiere ed aver personalmente guidato e illustrato nel dettaglio gli edifici in costruzione.

L'impresa edile *Area Costruzioni* nella persona del *Geom. Paolo Caro* per aver permesso la visita ai cantieri presi in esame e fornito materiale tecnico e documentazione energetica di supporto.

L'impresa edile *ICZ Costruzioni* nella persona del *Geom. Mario Dell'Acqua* per aver dato la possibilità di visita al cantiere preso in esame.

L'impresa edile *Rosso Costruzioni* nella persona del *Ing. Mauro Giorio* per aver acconsentito alla visita del cantiere preso in esame.

L'*Ing. Ferdinando Facelli* per il supporto e per il tempo dedicato alle nostre "chiacchierate" energetiche sull'utilizzo di Therm 6.3.

La dott. sa *Loredana Proglia* per il contributo alle attività di segreteria e di revisione bozze.

Tutti gli amici e colleghi che in questi anni hanno, in vario modo, "supportato e sopportato" i miei studi e il lavoro di ricerca.

SOMMARIO

PARTE PRIMA - DISCONTINUITÀ DELL'INVOLUCRO EDILIZIO E CONTENIMENTO DEI FABBISOGNI ENERGETICI

Abstract

1. Premessa e inquadramento

1.1.	Obiettivi	1-1
1.2.	Metodologia e fasi organizzative della ricerca	1-2

2. Discontinuità dell'involucro e ponti termici

2.1.	Definizioni e tipologie di ponte termico	2-1
2.1.1.	Ponte termico strutturale	2-1
2.1.2.	Ponte termico geometrico	2-2
2.1.3.	Ponte termico lineare o puntiforme	2-2
2.1.4.	Ponte termico corretto	2-3
2.2.	Riferimenti fisico tecnici (di base)	2-4
2.2.1.	Conducibilità termica (λ [W/mK])	2-5
2.2.2.	Resistenza termica (R [m^2K/W])	2-6
2.2.3.	Capacità termica (C [J/K]) e massa volumica (ρ [kg/m^3])	2-6
2.2.4.	Trasmittanza termica (U [W/m^2K])	2-7
2.2.5.	Flusso termico (Φ [W])	2-8
2.2.6.	Temperatura di rugiada (θ_r [$^{\circ}C$])	2-10
2.2.7.	Temperatura di muffa (θ_s [$^{\circ}C$])	2-12
2.3.	Effetti dei ponti termici	2-13
2.3.1.	Umidità e condensa	2-13
2.3.2.	Problemi connessi alla salute	2-14
2.3.3.	Danni e degrado degli elementi edilizi	2-16

3. Normativa di riferimento

3.1.	Riferimenti normativi e calcolo dei ponti termici	3-1
3.1.1.	Normative comunitarie e nazionali	3-1
3.1.2.	La norma uni en iso 14683 - inquadramento	3-3
3.1.3.	La norma uni en iso 14683 - classificazione e tipologie proposte	3-4
3.1.4.	La norma uni en iso 10211	3-4
3.1.5.	Calcolo dei ponti termici	3-5
3.1.6.	Calcolo dei ponti termici con modelli bi-tridimensionali	3-8
3.1.7.	Calcolo dei ponti termici per la città di Torino	3-9

3.2.	Classi esigenziali e requisiti prestazionali in edilizia: uni 8290	3-11
------	--	------

4. *Strumenti di calcolo del coefficiente di dispersione termica lineica e tecniche costruttive*

4.1.	Abaci ed atlanti di calcolo del coefficiente di dispersione – ψ -	4-2
4.1.1.	L'atlante nazionale dei ponti termici	4-2
4.1.2.	L'abaco dei ponti termici	4-4
4.1.3.	Le catalogue des ponts thermiques	4-6
4.2.	Codici e guide di buona pratica	4-8
4.2.1.	Ponti termici – analisi e ipotesi risolutive	4-8
4.2.2.	I ponti termici in edilizia - studio, calcolo e modalità di eliminazione	4-9
4.3.	Manuali di buona pratica	4-10
4.3.1.	Manuale di igrotermia e ponti termici	4-10
4.3.2.	Manuale per l'applicazione del sistema a cappotto	4-11
4.3.3.	Prontuario informativo e formativo	4-12
4.4.	Banche dati telematiche	4-13
4.4.1.	Anit – isola on line	4-13
4.4.2.	Cortexa	4-16
4.4.3.	Construction21	4-18
4.5.	Considerazioni	4-19

5. *Il riscontro delle tecniche costruttive*

5.1.	Le tecniche costruttive nel cantiere edile	5-1
5.1.1.	Cantiere edile a Borgaro T.se	5-2
5.1.2.	Cantiere edile a Castiglione T.se	5-4
5.1.3.	Cantiere edile a Grugliasco	5-6
5.1.4.	Cantiere edile a San Mauro T.se	5-8
5.1.5.	Cantiere edile a Torino	5-10
5.1.6.	Cantiere edile a Torino	5-12
5.1.7.	Cantiere edile a Torino	5-14
5.1.8.	Cantiere edile a Torino	5-16
5.1.9.	Cantiere edile a Torino	5-18
5.1.10.	Cantiere edile a Torino	5-20
5.1.11.	Cantiere edile a Torino	5-22
5.2.	Le tecniche costruttive nella produzione edilizia	5-24
5.2.1.	Granulato di fondazione in vetrocellulare - BACCHI	5-25
5.2.2.	Cassonetto per avvolgibili Roka - BECK+HEUN -	5-28
5.2.3.	Davanzale/soglia con taglio termico DE FAVERI	5-31
5.2.4.	Architrave isolato - EMIC	5-33

5.2.5.	Pannelli termoisolanti in legnomagnesite - ERACLIT	5-36
5.2.6.	Avvolgibile - GRIESSER	5-40
5.2.7.	Sistema a cappotto termico - KNAUF	5-42
5.2.8.	Blocchi in laterizio con isolante integrato - POROTON e perlite	5-50
5.2.9.	Dissuasori termici per balconi e mensole - SCHOCK	5-52
5.2.10.	Serramenti in alluminio - SCHUCO -	5-56
5.2.11.	Davanzale per sistema a cappotto – STO-	5-58

6. Strumenti di ottimizzazione

6.1.	Proposta di classificazione e di codifica	6-1
6.2.	Matrice prestazionale di confronto ed indicatori di priorità	6-6
6.3.	Introduzione all'uso delle schede	6-11
6.4.	Schede di soluzioni tecniche di dettaglio	6-13
6.5.	Schede di calcolo del coefficiente di dispersione termica lineica	6-15
6.5.1.	Calcolo del coefficiente ψ secondo l'abaco Cened	6-16
6.5.2.	Calcolo del coefficiente ψ con Therm 6.3	6-21
6.6.	Schede tipologiche delle specifiche e delle prescrizioni tecniche dei requisiti essenziali	6-30

7. Valutazioni di sintesi e conclusioni

7.1.	Considerazioni generali	7-1
7.2.	Confronto dei risultati	7-2
7.2.1.	Il confronto per ciascuna classe tipologica	7-3
7.2.2.	Il confronto per posizione dello strato isolante	7-12
7.3.	Integrabilità del prodotto	7-15
7.4.	Banca dati telematica open source	7-16

8. Bibliografia e sitografia di riferimento

8.1.	Bibliografia	8-1
8.1.1.	Testi di riferimento	8-1
8.1.2.	Prontuari e articoli di riferimento	8-2
8.1.3.	Normativa di riferimento	8-2
8.2.	Sitografia	8-4

ABSTRACT**DISCONTINUITÀ DELL'INVOLUCRO EDILIZIO E CONTENIMENTO DEI FABBISOGNI ENERGETICI.
STRUMENTO PER L'OTTIMIZZAZIONE DI SOLUZIONI TECNICO-COSTRUTTIVE.**

DISCONTINUITY OF THE BUILDING ENVELOPE AND REDUCTION OF ENERGY NEEDS.
TOOL FOR THE OPTIMIZATION OF TECHNICAL AND CONSTRUCTIVE SOLUTIONS.

Discontinuità involucro edilizio - ponte termico - strumento di ottimizzazione - cantiere edile - dettagli costruttivi - coefficiente di dispersione termica lineica - classe esigenziale - requisito prestazionale - indicazioni di posa

KEYWORDS

La ricerca si prefigge lo scopo di ottimizzare soluzioni tecnico-costruttive nelle discontinuità dell'involucro edilizio per migliorarne le caratteristiche prestazionali e diminuire il fabbisogno energetico dell'edificio.

**DESCRIZIONE GENERALE E
OBIETTIVI DELLA RICERCA**

Attualmente le numerose fonti che propongono coefficienti correttivi di dispersione energetica nei punti di discontinuità dell'involucro non indicano risoluzioni tecniche di dettaglio. La ricerca ha quindi, il preciso intento di fornire soluzioni abbinata alle specifiche tecniche e prestazionali degli elementi tecnologici indagati.

La prima parte dello studio affronta la metodologia e descrive le fasi della ricerca e l'acquisizione dei dati utili come base per l'elaborazione del prodotto.

CONTENUTI DELLA TESI

La seconda parte dello studio è un prontuario di soluzioni costruttive di dettaglio presentate in forma di schede grafico prestazionali utili sia in fase progettuale che costruttiva.

La suddivisione e la classificazione delle discontinuità dell'involucro si basano sulla codifica delle norme UNI EN, individuando e processando nuove casistiche.

I nodi costruttivi proposti derivano, in parte da casi studio selezionati in cantieri di interventi edilizi per nuove costruzioni e, in parte da fonti bibliografiche, per tipologie tipiche dell'edilizia tradizionale. I cantieri hanno avuto la duplice funzione di fornire un preciso quadro dell'attuale pratica realizzativa dei dettagli tecnici per l'ottimizzazione delle discontinuità nell'involucro e sono stati inoltre la base di partenza per sviluppare le soluzioni tecnologiche

presentate.

Nello specifico lo strumento proposto è suddiviso e organizzato in elaborati grafici dei nodi di dettaglio, in schede di calcolo e in schede tipologiche. Le schede di dettaglio di nodi, sono rappresentazioni grafiche corredate da indicazioni tecnico-realizzative. Le schede di calcolo evidenziano le principali caratteristiche termo-fisiche, studiate anche utilizzando un software per la modellazione agli elementi finiti. Le schede tipologiche forniscono indicazioni tecnico-costruttive con sintesi di requisiti prestazionali secondo le classi esigenziali di: sicurezza, benessere ambientale, integrabilità e durabilità nel tempo. La struttura delle schede prodotte consente la possibilità di ulteriori implementazioni e permette un utilizzo versatile delle stesse in funzione di specifiche esigenze del fruitore finale.

Le fasi della ricerca sono articolate in una prima parte di indagine-studio dell'attuale stato dell'arte con esplorazioni sul campo in cantieri edili, in una seconda parte di classificazione e organizzazione dei dati raccolti; si conclude infine, con la elaborazione di classificati schemi grafici di dettaglio, corredate da schede tecniche prestazionali e strumenti di calcolo. Il campo di indagine della ricerca è focalizzato sull'edilizia di tipo convenzionale.

FASI ORGANIZZATIVE E
METODOLOGICHE DELLA
RICERCA

La prima fase concerne lo studio dello stato dell'arte, che si è sviluppato indagando i differenti aspetti della pratica edilizia: la normativa vigente, i codici di calcolo per le dispersioni energetiche e i manuali di buona pratica costruttiva.

FASE 1 - STATO DELL'ARTE

La normativa nazionale di riferimento per le discontinuità dell'involucro è la norma UNI EN ISO 14683 che classifica e codifica i ponti termici fornendo una prima indicazione delle diverse tipologie e del loro coefficiente di dispersione termica lineica, cioè un coefficiente di correzione (Ψ) che tiene conto dell'influenza del ponte termico distribuito lungo una linea, e è utilizzato per determinare il flusso di calore disperso con il ponte termico analizzato. Minore quindi è il valore di Ψ , minore è la quantità dispersa di calore e, di conseguenza migliore è la soluzione tecnica adottata.

NORMATIVA, ABACI E ATLANTI
DI CALCOLO

Sulla base di questa classificazione esistono abaci e atlanti dei ponti termici che schematizzano e illustrano algoritmi di calcolo per individuare il coefficiente di dispersione termica lineica. Nello

specifico sono stati analizzati:

1. "L'atlante di ponti termici" edito da Edilclima che per ciascuna classe di ponte termico individua alcune casistiche, fornendone valori tabellari precalcolati secondo la norma UNI EN ISO 10211 in riferimento alle diverse caratteristiche dimensionali. Con l'interpolazione dei dati forniti è possibile ottenere un valore del coefficiente di dispersione termica lineica;
2. "L'abaco dei ponti termici" edito da CENED che, sulla base di schemi grafici semplificati, propone algoritmi di calcolo validi solo per alcuni campi di esistenza, al di fuori dei quali i risultati ottenuti non sono attendibili;
3. "Le catalogue des ponts thermiques" dell'OFEN di Zurigo che, anche in questo caso offre valori tabellari, sviluppati però su una casistica più ampia in riferimento anche a edilizia non tradizionale quali semiprefabbricato o mista in cemento-acciaio.

Esistono inoltre, associazioni di categoria come consorzi di produttori o collegi costruttori che forniscono linee guida e manuali specifici sui temi e le aree di competenza. Le discontinuità nell'involucro edilizio hanno un carattere trasversale e affine, seppur non di primaria importanza, per ciascuno dei settori indagati. La ricerca e l'analisi permettono di ampliare il quadro conoscitivo con sviluppi sia in campo energetico che in architettura tecnica. Entrambe queste discipline contribuiscono a definire caratteristiche prestazionali e a fornire indicazioni grafiche essenziali per la progettazione e l'ottimizzazione delle discontinuità.

MANUALI DI RIFERIMENTO E
CODICI DI BUONA PRATICA

In particolare sono stati rilevati:

1. il "Manuale per l'applicazione del Sistema a Cappotto" a cura del Consorzio per la cultura del sistema a cappotto - CORTEXA. Le linee guida illustrate nel manuale si focalizzano sul concetto di qualità ai diversi livelli. Promuovono la qualità come filo conduttore nell'intero processo creativo: dall'idea progettuale fino alle fasi di realizzazione dell'opera, passando dalla produzione e dalla scelta di materiali di qualità. Pertanto, qualità significa anche attenzione al dettaglio e cura dei particolari esecutivi. Le discontinuità sono tipiche dei nodi di dettaglio e quindi punti cruciali su cui intervenire per implementare e rendere un prodotto qualitativamente migliore. Il manuale, che ha valenza di carattere europea, presenta una serie di riferimenti normativi e prescrittivi corredati da esempi grafici esemplificativi dei nodi di raccordi più caratteristici come:

- intersezione tra involucro opaco e trasparente, tra copertura e involucro verticale e tra fondazioni e involucro perimetrale;*
2. *l'Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico ed Acustico - ANIT che propone una collana di manuali con approfondimenti specifici sui temi acustici e termici. "I materiali isolanti " e "Igrotermia e ponti termici" illustrano le principali grandezze termo-fisiche e il comportamento termo-igrometrico dei più comuni materiali isolanti in edilizia. L'approccio è di tipo teorico, con pochi riferimenti a casi specifici, ma illustra le peculiarità dei materiali che si possono impiegare nei progetti edilizi;*
 3. *il "Manuale Informativo e Formativo" della impresa Area Costruzioni che è nato con lo scopo di informare e formare gli operatori tecnici edili che lavorano nei cantieri dell'impresa. Ha carattere divulgativo, infatti indaga gli errori con immagini tratte da cantieri, ne illustra le possibili soluzioni della buona pratica costruttiva, ne evidenzia le criticità e propone azioni di intervento per risolverle in maniera ottimale. Anche in questo manuale si nota l'importanza della qualità, intesa sia come buona pratica costruttiva che sicurezza per i lavoratori. La programmazione e la pianificazione degli interventi in cantiere favoriscono la sicurezza degli operatori e la rapidità realizzativa.*

La seconda fase della ricerca concerne le esplorazioni conoscitive in cantieri di edilizia convenzionale: hanno permesso di valutare l'attuale pratica costruttiva, di individuare e riconoscere le discontinuità e, se, e in che modo fossero corrette.

FASE 2 - INDAGINI DI CANTIERE

I cantieri hanno avuto la duplice funzione di fornire un preciso quadro dell'attuale pratica realizzativa dei dettagli tecnici per la correzione delle discontinuità nell'involucro e sono stati anche la base per sviluppare le soluzioni tecnologiche ricercate.

I cantieri presi in esame si riferiscono principalmente ad interventi di nuova costruzione in Torino e Provincia. Il campo di indagine si è focalizzato su edifici con tecnica costruttiva convenzionale con la struttura principale in latero-cemento. Le imprese costruttrici selezionate spiccano nel panorama territoriale per l'attenzione prestata alla qualità realizzativa e all'orientamento verso la sostenibilità energetico-ambientale con utilizzo di materiali a basso impatto ambientale.

In ciascuna esperienza conoscitiva si sono riscontrati nodi tipologici con caratteristiche e positive, e negative, in riferimento

all'ottimizzazione delle discontinuità a fronte di un abbattimento delle dispersioni termiche.

I nodi costruttivi, pur essendo riconducibili alla suddivisione proposta dalla normativa ed ai codici di calcolo, a causa delle diverse variabili delle condizioni al contorno, sia progettuali che operative dovute a tipicità morfologiche o vincoli particolari, possono dare origine a innumerevoli casistiche di studio e analisi.

La fase produttiva della ricerca si propone una classificazione e codifica dei nodi di discontinuità, e sviluppa uno strumento per l'ottimizzazione delle soluzioni tecnologiche di dettaglio.

Il materiale collezionato, nella fase 1 e nella fase 2, ha permesso di sviluppare una ripartizione e una codifica più approfondita dei nodi tipologici di discontinuità dell'involucro. Questa distinzione non si basa più solo su elementi caratterizzanti il nodo, ma anche sulla posizione dell'isolante e sul tipo di materiale utilizzato. Le famiglie tipologiche individuate sono otto e la codifica si basa sulla norma UNI EN ISO 14683. Il codice alfanumerico identificativo di ciascun dettaglio costruttivo proposto, oltre a comprendere la sigla stabilita della normativa, prosegue indicando la posizione spaziale, il numero d'ordine sequenziale per la specifica famiglia, la posizione dell'isolante principale e l'eventuale cambio di materiale impiegato senza variarne la posizione o la conformazione.

In un'ottica di analisi integrata e sinergica degli aspetti termici con quelli costruttivi generali, il campo di indagine si è ampliato alla individuazione e allo studio dei requisiti tipici dei nodi costruttivi. Dalla studio della norma UNI 8290 si sono estrapolate le classi esigenti utili per le discontinuità dell'involucro edilizio. Esse comprendono: la sicurezza, in termini di stabilità strutturale e di resistenza al fuoco, il benessere ambientale, secondo aspetti termo-igrometrici e acustici, l'integrabilità geometrica e materica e la gestione nel tempo. Ciascuna classe esigente è composta da sottolivelli di requisiti che incrociati con ciascun nodo tipologico originano celle di una matrice di riferimento e di confronto. Per ciascuna cella matriciale si propone un livello di attenzione che si divide in tre gradi che indicano l'importanza del singolo requisito prestazionale per lo specifico dettaglio analizzato. La classificazione è di tipo qualitativo e non quantitativo poiché non è possibile individuare per ogni requisito un indicatore prestazionale

FASE 3 - STRUMENTI DI OTTIMIZZAZIONE

CLASSIFICAZIONE E CODIFICA DEI NODI DI DISCONTINUITÀ DELL'INVOLUCRO

MATRICE DI CONFRONTO E INDICATORI DI PRIORITÀ

univoco.

La matrice ha anche la funzione di prospetto riassuntivo e di confronto generale per l'intera sequenza dei nodi indicati. Inoltre, per ciascun nodo, la ricerca offre uno strumento composto da una soluzione grafica del dettaglio tecnico corredata da una scheda di calcolo e da una scheda tipologica.

**SCHEDE DI
CARATTERIZZAZIONE**

Ogni soluzione grafica è corredata da indicazioni di tipo funzionale e materico per i principali elementi o sistemi componenti il particolare costruttivo. La continuità di isolamento è messa in evidenza da una campitura tenue di colore giallo, per un istantaneo riscontro visivo tra ambiente interno ed esterno dal punto di vista termico. Durante la fase di elaborazione delle soluzioni grafiche, in parallelo, è stata eseguita una ricerca per individuare i principali prodotti, presenti sul mercato, utili all'elaborazione e alla definizione delle soluzioni tecnologiche proposte. Sebbene si tratti di materiali o prodotti specifici, le soluzioni di dettaglio elaborate si possono integrare o adattare secondo le specifiche esigenze del singolo fruitore finale poiché i materiali e le caratteristiche dimensionali sono variabili con conseguenza per la scelta dei modelli e dei prodotti impiegati. Per ciascun articolo, ritenuto significativo, si riporta una breve descrizione, un'immagine di riferimento e un codice a barre bidimensionale (QR Code) che permette il collegamento diretto con il sito internet di riferimento per il prodotto analizzato.

SOLUZIONI GRAFICHE

Le schede di calcolo evidenziano le caratteristiche termo-fisiche principali. Sono strutturate in modo da apparire quasi del tutto automatiche; ovvero un menù a tendina permette di selezionare i materiali che compongono e caratterizzano il dettaglio studiato e attraverso algoritmi a cascata si ottengono i valori delle principali grandezze termofisiche. Se il caso studiato rientra nel campo di validità delle funzioni proposte dall'Abaco dei ponti termici del CENED la scheda prevede anche un sezione dedicata in cui si ottengono i valori del coefficiente di trasmissione lineica. Parallelamente al calcolo secondo l'Abaco CENED tutte le soluzioni proposte sono state studiate anche con l'utilizzo di un software per la modellazione agli elementi finiti.

SCHEDE DI CALCOLO

La verifica agli elementi finiti tramite il programma della LBNL, THERM 6.3 permette di visualizzare l'andamento delle curve isoterme all'interno del modello schematizzato da cui si desume come la temperatura e il flusso termico cambino all'interno dei

singoli componenti. In particolare si può verificare che la temperatura superficiale in corrispondenza degli angoli interni (che in genere rappresentano i punti critici di un edificio) sia superiore a 12 °C, che è la soglia per evitare la formazione di muffe o condensa.

La terza ed ultima parte costituente il prodotto della ricerca, è una sintesi complessiva ed è composta, per ciascun dettaglio costruttivo, da una scheda tipologica. Fornisce: indicazioni tecnico-costruttive (con riferimento all'organizzazione proposta dalla matrice di confronto), e presenta al suo interno sia i dati grafici del disegno che i valori numerici ricavati dalla scheda di calcolo. A completamento di tale scheda si aggiungono indicazioni di tipo prescrittivo e indicazioni di posa, desunte in parte anche dalle note dei produttori dei materiali scelti.

SCHEDE TIPOLOGICHE

Lo strumento proposto costituisce un manuale d'uso, in linea con la vigente ed evoluta normativa in tema di discontinuità edilizie, in particolare per la stesura di disciplinari tecnici utili ai progettisti e agli operatori dei cantieri edili.

RISULTATI RAGGIUNTI

Il risultato della ricerca può essere utilizzato come strumento in fase progettuale, organizzativa e costruttiva. La struttura proposta risulta facilmente assimilabile, flessibile e applicabile dagli operatori edili per l'ottimale realizzazione di soluzioni tecnico-costruttive nelle discontinuità dell'involucro edilizio.

In conclusione, il prodotto illustrato non ha valenza esaustiva, ma, grazie alla possibilità di implementazione e versatilità di utilizzo, in funzione delle specifiche esigenze del fruitore finale, è facilmente esportabile e assimilabile.

ESPORTABILITÀ DEL PRODOTTO

In un'ottica di maggiore diffusione e facilità di utilizzo il manuale, oltre alla classica diffusione cartacea sarà inserito in una banca dati digitale open source, da cui attingere sia per scopi di ricerca che di progettazione.

1. PREMessa E INQUADRAMENTO

Le attività nel settore edilizio assumono un ruolo sempre più rilevante nello sviluppo sostenibile, in quanto risultano essere le principali consumatrici di risorse e, di conseguenza, il tema della sostenibilità e la sua applicazione nella progettazione tecnologica degli edifici sono argomenti che caratterizzano il panorama della ricerca contemporanea. L'applicazione di principi di sostenibilità ambientale e risparmio delle risorse in architettura hanno un ruolo sempre più considerevole all'interno del processo edilizio e le problematiche, inerenti al risparmio energetico e a una progettazione attenta alla qualità ambientale e all'utilizzo di risorse rinnovabili, sono obiettivi prioritari da seguire sia nelle fasi progettuali, costruttive e gestionali.

1.1. OBIETTIVI

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.

IL RISPARMIO ENERGETICO

Strategie di intervento e soluzioni tecnologiche, rivolte a ridurre sensibilmente l'entità dei consumi energetici, sono d'ausilio sia in fase di progettazione che di realizzazione. Per questo motivo la ricerca desidera fornire ai professionisti e ai costruttori uno strumento operativo. Da una panoramica, da concetti base e dalla normativa si giunge a un quadro di soluzioni tecniche relative alle diverse tipologie dei ponti termici nella tecnologia costruttiva tradizionale italiana.

L'aumento di edifici ben isolati, iniziato nel Nord Europa, è continuato anche in Italia grazie alla sempre maggiore richiesta e ricerca di qualità edilizia e basso consumo energetico. 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.

I progettisti hanno il duplice compito di salvaguardare l'ambiente, riducendo le emissioni in atmosfera, perseguendo la qualità e la sostenibilità ambientale, e di rispondere alle specifiche esigenze funzionali e di composizione architettonica nel rispetto delle tradizioni costruttive locali. Pur nel rispetto di queste tradizioni

che rappresentano il frutto di esperienze di secoli di pratica edilizia, si deve raggiungere un comfort e un benessere per i moderni stili di vita.

Attualmente ci sono diverse fonti che offrono coefficienti di dispersione energetica correttivi, ma non propongono soluzioni di architettura tecnica di dettaglio. La ricerca ha il preciso scopo di proporre tali soluzioni abbinate alle specifiche tecniche e prestazionali degli elementi studiati utili sia in fase progettuale che realizzativa.

UNO STRUMENTO OPERATIVO

Vengono, di seguito illustrati i risultati con i quali è possibile orientarsi per impostare la progettazione di dettaglio in specifici contesti. Si presentano a titolo esemplificativo e non esaustivo, alcune soluzioni relative alle differenti tipologie dei ponti termici per fornire anche, mediante dati numerici precisi, un immediato riscontro.

La ricerca propone uno strumento per l'ottimizzazione di soluzioni tecnico-costruttive delle discontinuità dell'involucro edilizio per migliorarne le caratteristiche prestazionali e per diminuirne il fabbisogno energetico.

1.2. METODOLOGIA E FASI ORGANIZZATIVE DELLA RICERCA

La ricerca è suddivisa in tre punti metodologici principali:

LE 3 FASI METODOLOGICHE

- studio e analisi dello stato dell'arte;
- indagini conoscitive in cantieri edili;
- proposta di strumenti operativi per l'ottimizzazione.

Le fasi sono suddivise dapprima in una parte di indagine e studio dell'attuale stato dell'arte ed esplorazioni sul campo in cantieri edili; in seguito in una parte di classificazione e organizzazione dei dati raccolti per concludersi, poi, con la produzione di schemi grafici di dettaglio corredati da schede tecniche di calcolo e prestazionali.

Il campo d'indagine della ricerca si focalizza sull'edilizia di tipo convenzionale.

La prima fase riguarda lo studio dello stato dell'arte che si è sviluppato indagando i differenti aspetti della pratica edilizia:

**FASE 1 - STUDIO E ANALISI
DELLO STATO DELL'ARTE**

- normativa vigente;

- codici di calcolo per le dispersioni energetiche;
- manuali di buona pratica costruttiva.

La normativa nazionale di riferimento per le discontinuità dell'involucro è la norma UNI EN ISO 14683¹ che classifica e codifica i ponti termici fornendo una prima indicazione delle diverse tipologie e del corrispettivo **coefficiente di correzione per la dispersione termica lineica $[\Psi]$** .

Questo coefficiente tiene conto dell'influenza del ponte termico distribuito lungo una linea e è utilizzato per determinare il flusso di calore disperso attraverso il ponte termico analizzato. Minore quindi è il valore di $[\Psi]$ minore è la quantità di calore dispersa e di conseguenza migliore è la soluzione termica adottata.

Sulla base di questa classificazione esistono Abaci ed Atlanti dei ponti termici che schematizzano ed illustrano algoritmi di calcolo per l'individuazione del coefficiente di dispersione termica lineica.

La seconda fase della ricerca riguarda le esplorazioni conoscitive in cantieri di edilizia convenzionale che hanno permesso di valutare l'attuale pratica costruttiva e di individuare e riconoscere, se e in che modo, le discontinuità fossero corrette.

FASE 2 - ESPLORAZIONI

CONOSCITIVE IN CANTIERI EDILI

I cantieri hanno avuto la duplice funzione di:

- fornire un preciso quadro dell'attuale pratica realizzativa dei dettagli tecnici per la correzione delle discontinuità nell'involucro;
- essere la base per sviluppare le soluzioni tecnologiche ricercate.

I cantieri individuati riguardano maggiormente interventi di nuova costruzione in Torino e Provincia ed il campo d'indagine si è focalizzato principalmente su edifici con tecnica costruttiva convenzionale, ovvero con la struttura principale in latero-cemento.

Le imprese costruttrici selezionate spiccano nel panorama territoriale per l'attenzione prestata alla qualità realizzativa e all'orientamento per la sostenibilità attraverso l'utilizzo di materiali di basso impatto ambientale.

Il materiale raccolto nelle prime fasi della ricerca ha posto la base su cui sviluppare **una classificazione e una codifica più**

FASE 3 - STRUMENTI DI

OTTIMIZZAZIONE

1 NORMA EUROPEA. UNI EN ISO 14683:2008. Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineica. Metodi semplificati e valori di riferimento.

approfondita dei nodi tipologici di discontinuità dell'involucro.

La classificazione proposta non si basa solamente su elementi caratterizzanti il nodo², ma anche sulla posizione dell'isolante e sul tipo di materiale utilizzato.

Da un'ottica di analisi integrata e sinergica degli aspetti termici con quelli costruttivi generali il campo d'indagine si è ampliato all'individuazione e allo studio dei requisiti prestazionali tipici dei nodi costruttivi.

Dall'analisi della norma UNI 8290³ sono state estrapolate le **classi esigenziali utili per le discontinuità dell'involucro edilizio**. Ciascuna classe esigenziale individuata è composta da sottolivelli di requisiti prestazionali che, incrociati con ciascun nodo tipologico, danno origine a celle di **una matrice prestazionale di riferimento**.

La matrice ha la funzione di prospetto riassuntivo e di confronto generale per l'intera sequenza di nodi indicati, ma, **per ciascun nodo, la ricerca offre uno strumento composto da:**

- **una soluzione grafica di dettaglio tecnico;**
- **una scheda di calcolo;**
- **una scheda tipologico-prestazionale.**

Il prodotto illustrato non ha valenza esaustiva, ma, grazie alla possibilità di implementazione e versatilità di utilizzo in funzione delle specifiche esigenze dell'utilizzatore finale, è facilmente trasportabile ed assimilabile. Fornisce, infatti, un supporto sia in fase di progettazione che di realizzazione di un'opera.

ESPORTABILITÀ DEL PRODOTTO

2 Classificazione proposta dalla norma UNI EN ISO 14683:2008.

3 UNI 8290-1:1981. Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
UNI 8290-2:1983. Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.

Di seguito viene riportato lo schema metodologico riassuntivo della ricerca.

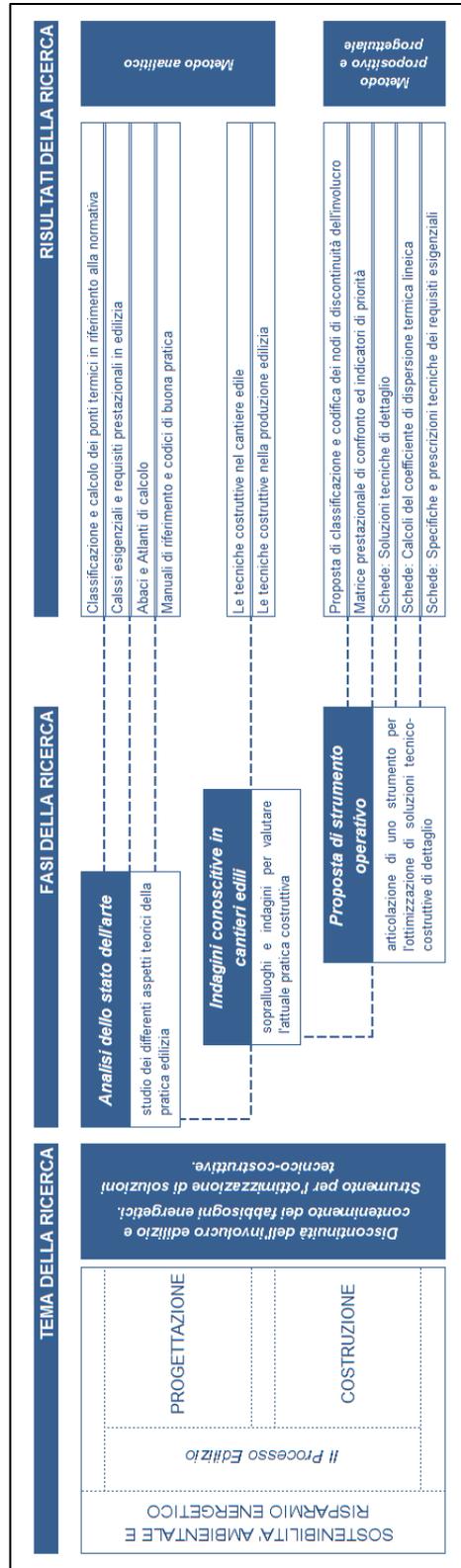


Tabella 1.1. Schema concettuale e metodologico della ricerca

2. DISCONTINUITÀ DELL'INVOLUCRO E PONTI TERMICI

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, convezione 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 o disomogeneità dei materiali, per la variazione dello spessore degli elementi 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 anidride carbonica, la conservazione delle risorse di energia. A tal fine una progettazione consapevole e attenta agli aspetti energetici e ai conseguenti aspetti costruttivi è indispensabile sia nelle ristrutturazioni, sia nelle nuove costruzioni.

Il decreto legislativo 311 del 2006 definisce il ponte termico in corrispondenza di innesti di elementi strutturali come discontinuità di isolamento termico. Quando la trasmittanza termica in corrispondenza del ponte termico non supera più del 15% quella della parete corrente, il ponte termico si può considerare corretto.

2.1. DEFINIZIONI E TIPOLOGIE DI PONTE TERMICO

I ponti termici sono zone localizzate nell'involucro edilizio nei quali sussiste un'elevata perdita di calore. Questa elevata dispersione di calore risulta dal fatto che la zona dell'elemento costruttivo si discosta dalla forma piana ("ponte termico geometrico") o dal fatto che nella zona interessata sono localmente presenti materiali con conducibilità termica più elevata ("ponte termico determinato dai materiali").

2.1.1. Ponte termico strutturale

Quando la compenetrazione riguarda una superficie ampia o nel caso di disomogeneità di materiali dovuti a compenetrazione totale o parziale dell'involucro edilizio si parla di ponti termici strutturali. E' il caso, ad esempio, dell'attacco cordolo/pareti dei balconi, dei davanzali e soglie, della presenza di canne fumarie nelle pareti. Più i materiali sono omogenei, minori sono le discontinuità, le distorsioni e aumenti del flusso termico.

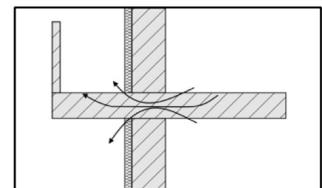


Figura 2.1. Esempio di ponte termico strutturale - balcone

2.1.2. Ponte termico geometrico

La discontinuità nella geometria dell'edificio (giunti: tra parete pavimento, parete e soffitto, parete e parete) cioè la differenza tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella sul lato esterno, causa ponti termici geometrici. La dispersione varia in questo caso in rapporto alla geometria dell'angolo. La mancanza di omogeneità dei materiali che compongono la struttura o la non coincidenza tra la geometria dell'involucro e lo sviluppo tridimensionale del flusso termico disperdente possono essere facilmente risolte con semplici accorgimenti da attuare in fase progettuale e successivamente in fase costruttiva. Esistono, in commercio, numerosi elementi prefabbricati da utilizzare per ovviare al problema di interruzione della continuità dell'isolamento termico.

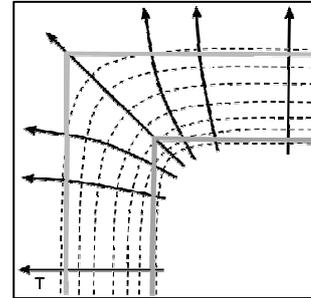


Figura 2.2. Esempio di ponte termico geometrico

2.1.3. Ponte termico lineare o puntiforme

Esistono due tipologie di ponti termici: puntiformi e lineari. Esempi del primo caso si osservano se la compenetrazione interessa una superficie molto limitata: è il caso, ad esempio, di chiodi o tasselli di ancoraggio per il cappotto isolante, flange di attacco dei balconi.

I ponti termici lineari presentano un flusso di calore bidimensionale e possono essere stabiliti in funzione della lunghezza del componente costruttivo interessato dal ponte termico (per esempio lunghezza del balcone sporgente). Il coefficiente di perdita dei ponti termici Ψ (psi) indica il flusso di calore perso, proporzionale allo sviluppo lineare del componente edilizio, per un determinato elemento costruttivo.

Si calcola il coefficiente Ψ facendo la differenza fra la situazione nella quale il flusso di calore per un componente costruttivo è calcolato con il ponte termico e quella senza ponte termico.

Coefficienti di trasmissione termica Ψ e χ

- Il coefficiente di trasmissione termica longitudinale Ψ (psi) rappresenta la perdita aggiuntiva di calore per metro lineare di un ponte termico lineare:

- Il coefficiente di trasmissione termica puntiforme χ (chi) rappresenta la perdita aggiuntiva di calore di un ponte termico puntiforme.

Si distingue fra coefficiente Ψ interno ed esterno a seconda che per il calcolo del coefficiente si impieghino superfici riferite alle misure interne o alle misure esterne. Nella verifica dell'isolamento termico, ai sensi delle norme sul risparmio energetico, si impiegano coefficienti Ψ riferiti alle misure esterne. Generalmente, se non diversamente indicato, tutti i valori di Ψ di seguito riportati sono riferiti a misure esterne.

2.1.4. Ponte termico corretto

Il decreto legislativo 311 del 2006 definisce il ponte termico in corrispondenza di innesti di elementi strutturali come discontinuità di isolamento termico. Quando la trasmittanza termica in corrispondenza del ponte termico non supera più del 15% quella della parete corrente il ponte termico si può considerare corretto.

SECONDO IL D.LGS 311/2006

La valutazione di efficienza energetica delle Passivhaus considera il ponte termico corretto e non lo inserisce nella valutazione delle perdite dell'involucro quando:

SECONDO PASSIVHAUS

$$\Psi < 0,01 \text{ W/mK}$$

altrimenti il suo valore deve essere inserito all'interno del calcolo. Valori di Ψ così bassi ($< 0,01 \text{ W/mK}$) sono necessari perché un edificio Passivhaus con consumi annui sotto i 10 kWh/m^2 , in cui dovrebbe essere garantita una temperatura superficiale interna di tutta la superficie, sempre $> 17^\circ \text{ C}$, non dovrebbe avere ponti termici.

Per il calcolo del ponte termico puntuale χ (chi) viene utilizzato un programma tridimensionale ad elementi finiti; il suo valore, comunque, non è considerato per la valutazione di efficienza energetica delle Passivhaus.

2.2. RIFERIMENTI FISICO TECNICI (DI BASE)

Le condizioni climatiche quali l'altitudine, la latitudine, il vento, la piovosità condizionano il comportamento di ogni struttura costruita, in continuo equilibrio, fra vincoli climatici interni ed esterni. Il comportamento termico è relativo ai requisiti di temperatura sia invernali che estivi; quello igrometrico invece è in risposta alle condizioni di umidità esterna, interna, estiva e invernale.

E' importante comprendere il comportamento complessivo di un elemento costruttivo con esami e verifiche per passi successivi. Prima dell'analisi dei vari ponti termici degli edifici sono utili chiarimenti in merito ad alcune definizioni.

L'energia si trasmette in forma di calore in tre modi diversi:

per conduzione, cioè trasmissione di energia attraverso un materiale inerte;

per convezione, cioè trasmissione attraverso trasporto in un materiale caldo;

per radiazione termica (più calda è la temperatura di un corpo più energia viene irradiata sotto forma di onde elettromagnetiche).

Nella conduzione termica la quantità di calore condotta aumenta all'aumentare della differenza di temperatura tra corpi, all'aumentare della superficie e del tempo di contatto tra questi, al diminuire dello spessore del materiale.

La convezione indica il trasporto mediante spostamento di massa d'aria: grandi quantità di fluido possono essere trasportate in breve tempo. Da questo si evince il requisito tecnico fondamentale riguardo all'umidità: l'involucro dell'edificio a tenuta d'aria è il presupposto indispensabile per impedire i flussi dall'interno all'esterno ed evitare che grandi quantità di vapore acqueo siano trasportate all'interno dell'elemento costruttivo.

L'irraggiamento, infine, consiste nella propagazione senza contatto di energia termica sotto forma di onde elettromagnetiche.

Le caratteristiche dei materiali che influiscono sulla analisi termoigrometrica sono:

- **la conducibilità termica;**
- **la resistenza termica;**
- **la capacità termica e la massa volumica;**
- il fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo;
- il fattore di attenuazione;

- **la trasmittanza termica;**
- **il flusso termico;**
- l'ammettenza e lo spessore d'aria equivalente.
Le caratteristiche relative alla sezione sono:
- la massa superficiale;
- la trasmittanza termica totale;
- lo sfasamento e lo smorzamento dell'onda termica.

Di seguito sono illustrate le caratteristiche fisiche di maggiore rilevanza.

2.2.1. Conducibilità termica (λ [W/mK])

Per conducibilità termica λ (lambda) s'intende il flusso di calore che passa in condizioni di regime stazionario attraverso uno strato di materiale omogeneo di spessore un metro per m^2 di superficie e per la differenza di temperatura di un grado Kelvin tra le due facce opposte e parallele dello strato di materiale considerato. L'unità di misura è Watt per metro Kelvin (W/mK). A parità di spessore del materiale quanto più piccolo è il valore λ tanto minore è la quantità di calore che fuoriesce attraverso il materiale stesso.

Quanto più un materiale conduce calore tanto meno è indicato per isolare.

La conduttività termica dipende soprattutto dal peso specifico, dalla temperatura e dal grado di umidità del materiale.

Il valore ideale del peso specifico varia da 20 kg/m^3 a 100 kg/m^3 ; con la diminuzione del peso specifico la dispersione termica aumenta per effetto radiante; con l'aumento del peso specifico, la dispersione aumenta per conduzione.

Anche la temperatura dell'ambiente ha effetti sulla continuità termica: con valori molto bassi migliora lievemente l'azione isolante e viceversa.

Il grado di umidità, inoltre, influisce sulla conduttività termica: al crescere del grado di umidità diminuisce l'azione isolante del materiale da costruzione analizzato. Questo effetto è più accentuato nelle fibre minerali rispetto agli isolanti a celle chiuse.

2.2.2. Resistenza termica (R [m^2K/W])

La resistenza termica è il rapporto tra lo spessore e la conducibilità termica: un alto valore garantisce elevate prestazioni di isolamento termico. La resistenza termica di una stratigrafia non è solo la somma dei rapporti tra spessori e conducibilità dei materiali che compongono la parete, ma comprende anche le resistenze termiche superficiali interna ed esterna, dette coefficienti liminari. Questi ultimi variano in funzione della struttura (solaio, parete verticale, ecc...) e della soluzione costruttiva (tetto, parete ventilata, ecc...) come è evidenziato nella tabella¹ seguente².

Il flusso di calore si considera orizzontale quando non si discosta di più di 30° dalla posizione orizzontale vera e propria.

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
Resistenza termica superficiale interna (R_{si})	0,10	0,13	0,17
Resistenza termica superficiale esterna (R_{se})	0,04	0,04	0,04

Tabella 2.1. Coefficienti liminari

2.2.3. Capacità termica (C [J/K]) e massa volumica (ρ [kg/m^3])

I tempi di reazione di un materiale sollecitato termicamente determinano la sua capacità termica che dipende dalla composizione e dal peso specifico. La capacità termica indica la quantità di calore necessaria per innalzare di un grado Kelvin la temperatura di un chilogrammo del materiale stesso. Una buona sezione dovrebbe garantire valori crescenti di resistenza dall'interno verso l'esterno in modo da favorire l'equilibrio igrometrico con le condizioni esterne e l'evaporazione³ dell'umidità in eccesso; per questo motivo è sempre consigliabile utilizzare l'isolamento termico, quando è possibile, di tipo a cappotto.

Il rapporto tra il peso di un materiale e il suo volume è la massa

1 NORMA EUROPEA UNI EN ISO 6946:2008. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.

2 Occorre distinguere tra le condizioni per la determinazione del flusso di calore (ponte termico) e quelle per il calcolo della temperatura superficiale come da DIN 4108-2.

3 In riferimento all'umidità dell'aria il vapore è trasportato per convezione o per diffusione.

volumica, detta anche densità. La densità dipende dalle proprietà del materiale: quelli con densità maggiore hanno inerzia termica più idonea alla condizione estiva, quelli con densità minore risultano più idonei nei mesi invernali.

Per massa superficiale totale s'intende la somma delle masse superficiali dei singoli materiali ed elementi che compongono la struttura. Il peso unitario di un m^2 di un elemento costruttivo è un dato importante sia nelle verifiche termo-igrometriche, sia in quelle acustiche. Le condizioni ambientali e climatiche insieme alla destinazione d'uso dell'edificio determinano la scelta della massa superficiale totale più idonea.

2.2.4. Trasmittanza termica (U [W/m^2K])

La trasmissione del calore avviene attraverso un corpo quando esso è sottoposto ad una differenza di temperatura. L'energia si trasferisce dal punto a temperatura maggiore al punto a temperatura minore. La schematizzazione che si applica alla trasmissione di calore si basa su tre meccanismi fondamentali:

- Conduzione;
- Convezione;
- Irraggiamento.

L'analisi rigorosa di questo fenomeno si basa su basi teoriche molto complesse, e quindi per rendere più agevole lo sviluppo dei calcoli si ipotizzano le seguenti condizioni:

- regime stazionario (flusso di calore costante nel tempo);
- parete piana di estensione infinita;
- materiale componente perfettamente omogeneo ed isotropo;
- le due facce esterne della parete sono considerate come superfici isoterme.

La trasmittanza U^4 [W/m^2K] si definisce come il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad $1^\circ C$ ed è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio

4 NORMA EUROPEA UNI EN ISO 6946:2008. Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.

Per il calcolo della trasmittanza termica dei componenti edilizi finestrati si fa riferimento alla NORMA EUROPEA UNI EN ISO 10077-1:2001. Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità.

termico liminare e si assume pari all'inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati:

$$U = 1/R_T$$

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

con:

R_{si} = resistenza superficiale interna [m^2K/W];

$R_1; R_2; \dots; R_n$ = resistenze termiche utili di ciascuno strato [m^2K/W];

R_{se} = resistenza superficiale esterna [m^2K/W];

dove:

$$R = d/\lambda$$

con:

d = spessore dello strato di materiale nel componente [m];

λ = conduttività termica utile calcolata secondo ISO/DIS 10456.2 oppure ricavata da valori tabulati [W/mK].

2.2.5. Flusso termico (Φ [W])

I ponti termici sono punti dell'involucro in cui localmente si verificano cambiamenti del flusso di calore e delle temperature: in conseguenza a tali flussi le temperature superficiali interne nelle aree prossime al ponte termico diminuiscono e le perdite attraverso l'involucro aumentano. Le pareti si articolano tra loro nello spazio tridimensionale per delimitare gli ambienti formando angoli. Nei punti di discontinuità non si può parlare di flusso di calore monodimensionale, ma bidimensionale, le variazioni di temperatura si distribuiscono in modo mediato e senza salti repentini di temperatura superficiale. I diversi materiali costituenti ciascuna parete, non sono posti secondo una successione ordinata di strati, ma si intersecano, per esigenze costruttive, anche in modo complesso.

All'interno delle pareti con discontinuità di isolamento si osserva un andamento curvilineo delle isoterme⁵ a differenza di un andamento rettilineo in una parete uniforme. Il flusso di calore è perpendicolare alle isoterme ed è orientato dal lato caldo verso il lato freddo (disperdente). Si parla di zone di ponte termico quando l'area della parete interessata dal ponte termico non si limita ai

⁵ Le isoterme sono linee (nel modello di simulazione)/ superfici (nella realtà) alla stessa temperatura che attraversano un elemento della struttura.

confini dell'elemento di discontinuità, ma coinvolge anche le parti limitrofe.

Le rappresentazioni grafiche delle temperature superficiali interne indicano un andamento curvilineo e convergente delle isoterme che crea una concentrazione di flusso termico in corrispondenza delle discontinuità.

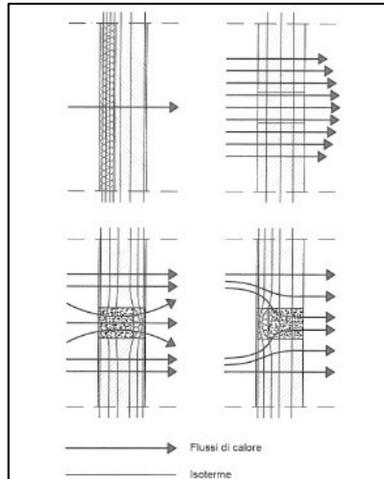


Figura 2.3. Flussi di calore e isoterme

Gli effetti più rilevanti dei ponti termici sono:

1. la variazione del flusso di calore;
2. la modifica della temperatura interna superficiale⁶.

Utilizzando metodi numerici agli elementi finiti o metodi semplificati basati sull'utilizzo del parametro della trasmittanza termica lineica si può calcolare il primo effetto; per il secondo invece,

si ricorre al fattore di temperatura superficiale per il quale devono essere note le condizioni termo-igrometriche di contorno e le resistenze termiche superficiali dipendenti dai coefficienti radiativi, convettivi e dalla distribuzione delle temperature nell'ambiente considerato.

Non si possono calcolare i parametri che definiscono il flusso termico e le temperature superficiali in corrispondenza di un ponte termico né determinarli attraverso l'uso di formule normalmente utilizzate per il flusso mono dimensionale. Le misurazioni possono essere svolte attraverso calcoli teorici oppure con metodi sperimentali come ad esempio l'utilizzo di termocamere ad infrarossi.

**VARIAZIONI DI FLUSSO TERMICO
E DI TEMPERATURA
SUPERFICIALE**

⁶ La temperatura interna superficiale diminuisce rispetto alla temperatura dell'aria interna.

Con la termografia a infrarossi è possibile registrare le **ANALISI TERMOGRAFICA** radiazioni termiche di un corpo, normalmente non visibili all'occhio umano, e capire quali sono i punti in cui si verificano le maggiori perdite di calore, evidenziando eventuali anomalie costruttive come la non corretta coibentazione di un tetto o di una parete perimetrale.

Un'analisi termografica volta ad individuare ponti termici e dispersioni di calore deve essere effettuata in inverno, ovvero quando vi è una significativa differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'edificio. Individuata la presenza di dispersioni nell'edificio e le loro cause, sarà possibile pianificare il tipo di interventi da effettuarsi per risolvere i ponti termici esistenti.

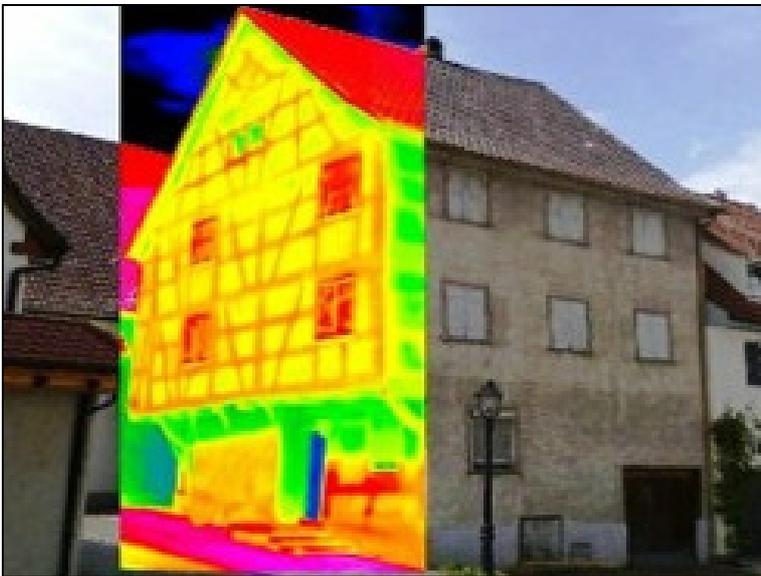


Figura 2.4. Esempio di analisi termografica

2.2.6. Temperatura di rugiada (θ_r [$^{\circ}\text{C}$])

La temperatura di rugiada θ_r (theta) di un ambiente, è la temperatura alla quale l'umidità presente nell'aria non può più essere da essa trattenuta e quindi viene ceduta sotto forma di goccioline d'acqua. In tal caso l'umidità relativa⁷ dell'aria in ambiente è pari al 100%.

Gli strati di aria a diretto contatto con la superficie di elementi costruttivi più freddi assumono la temperatura di questa; se la

⁷ L'umidità relativa (o UR) è un indice della quantità di vapore contenuto in una miscela aeriforme-vapore. È definita come il rapporto della densità del vapore contenuto nel miscuglio (per esempio quello di vapore acqueo nell'aria umida) e la densità del vapore saturo alla temperatura della miscela.

temperatura minima di un ponte termico è inferiore alla temperatura di rugiada anche lo strato d'aria direttamente a contatto con questo punto sarà ad una temperatura inferiore a quella di rugiada con la conseguenza che l'umidità di questo strato sarà ceduta sotto forma di condensa sulla superficie fredda.

La temperatura di rugiada dipende solo dalla temperatura e dall'umidità dell'aria in ambiente, come illustrato nella tabella seguente: quanto maggiore è l'umidità dell'aria ambiente e quanto maggiore è la temperatura dell'aria ambiente tanto maggiore è la temperatura di rugiada ossia tanto prima si forma condensa sulle superfici fredde.

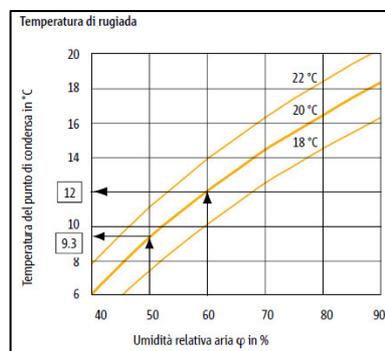


Tabella 2.2. Rapporto tra la temperatura di rugiada, l'umidità relativa e la temperatura dell'aria in ambiente

Convenzionalmente il clima usuale negli ambienti interni è caratterizzato in media da una temperatura di circa 20° C e da un'umidità relativa circa del 50%, a cui corrisponde una temperatura di rugiada di 9,3 °C, come indicato dalla tabella seguente⁸. In ambienti molto umidi, come ad esempio i bagni o le cucine, vengono raggiunti i valori di umidità anche superiori al 60%; pertanto in misura corrispondente aumenta la temperatura di rugiada e il rischio di formazione di condensa. Infatti, con un'umidità relativa del 60% la temperatura di rugiada è di 12° C.

DATI CONVENZIONALI

Dalla pendenza della curva del diagramma è facilmente riconoscibile questa sensibile dipendenza della temperatura di rugiada per l'umidità dell'aria in ambiente: bastano pochi gradi di aumento dell'umidità dell'aria in ambiente per accrescere notevolmente il valore della temperatura di rugiada; aumentando, così, notevolmente il rischio di formazione di condensa sulle superfici degli elementi costruttivi.

⁸ Cfr. <http://www.carlisi.info/rugiada.asp>.

Temperatura di rugiada J_s in °C con umidità relativa del:													
°C temp. aria	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%
30 °C	10,5 °C	12,9 °C	14,9 °C	16,8 °C	18,4 °C	20,0 °C	21,4 °C	22,7 °C	23,9 °C	25,1 °C	26,2 °C	27,2 °C	28,2 °C
29 °C	9,7 °C	12,0 °C	14,0 °C	15,9 °C	17,5 °C	19,0 °C	20,4 °C	21,7 °C	23,0 °C	24,1 °C	25,2 °C	26,2 °C	27,2 °C
28 °C	8,8 °C	11,1 °C	13,1 °C	15,0 °C	16,6 °C	18,1 °C	19,5 °C	20,8 °C	22,0 °C	23,2 °C	24,2 °C	25,2 °C	26,2 °C
27 °C	8,0 °C	10,2 °C	12,2 °C	14,1 °C	15,7 °C	17,2 °C	18,6 °C	19,9 °C	21,1 °C	22,2 °C	23,3 °C	24,3 °C	25,2 °C
26 °C	7,1 °C	9,4 °C	11,4 °C	13,2 °C	14,8 °C	16,3 °C	17,6 °C	18,9 °C	20,1 °C	21,2 °C	22,3 °C	23,3 °C	24,2 °C
25 °C	6,2 °C	8,5 °C	10,5 °C	12,2 °C	13,9 °C	15,3 °C	16,7 °C	18,0 °C	19,1 °C	20,3 °C	21,1 °C	22,3 °C	23,2 °C
24 °C	5,4 °C	7,6 °C	9,8 °C	11,3 °C	12,9 °C	14,4 °C	15,8 °C	17,0 °C	18,2 °C	19,3 °C	20,3 °C	21,3 °C	22,3 °C
23 °C	4,5 °C	6,7 °C	8,7 °C	10,4 °C	12,0 °C	13,5 °C	14,8 °C	16,1 °C	17,2 °C	18,3 °C	19,4 °C	20,3 °C	21,3 °C
22 °C	3,6 °C	5,9 °C	7,8 °C	9,5 °C	11,1 °C	12,6 °C	13,9 °C	15,1 °C	16,3 °C	17,4 °C	18,4 °C	19,4 °C	20,3 °C
21 °C	2,8 °C	5,0 °C	6,9 °C	8,6 °C	10,2 °C	11,6 °C	12,9 °C	14,2 °C	15,3 °C	16,4 °C	17,4 °C	18,4 °C	19,3 °C
20 °C	1,9 °C	4,1 °C	6,0 °C	7,7 °C	9,3 °C	10,7 °C	12,0 °C	13,2 °C	14,4 °C	15,4 °C	16,4 °C	17,4 °C	18,3 °C
19 °C	1,0 °C	3,2 °C	5,1 °C	6,8 °C	8,3 °C	9,8 °C	11,1 °C	12,3 °C	13,4 °C	14,5 °C	15,5 °C	16,4 °C	17,3 °C
18 °C	0,2 °C	2,3 °C	4,2 °C	5,9 °C	7,4 °C	8,8 °C	10,1 °C	11,3 °C	12,5 °C	13,5 °C	14,5 °C	15,4 °C	16,3 °C
17 °C	-0,6 °C	1,4 °C	3,3 °C	5,0 °C	6,5 °C	7,9 °C	9,2 °C	10,4 °C	11,6 °C	12,6 °C	13,3 °C	14,5 °C	15,3 °C
16 °C	-1,4 °C	0,5 °C	2,4 °C	4,1 °C	5,6 °C	7,0 °C	8,2 °C	9,4 °C	10,5 °C	11,6 °C	12,6 °C	13,5 °C	14,4 °C
15 °C	-2,2 °C	-0,3 °C	1,5 °C	3,2 °C	4,7 °C	6,1 °C	7,3 °C	8,5 °C	9,6 °C	10,6 °C	11,6 °C	12,5 °C	13,4 °C
14 °C	-2,9 °C	-1,0 °C	0,6 °C	2,3 °C	3,7 °C	5,1 °C	6,4 °C	7,5 °C	8,6 °C	9,6 °C	10,6 °C	11,5 °C	12,4 °C
13 °C	-3,7 °C	-1,9 °C	-0,1 °C	1,3 °C	2,8 °C	4,2 °C	5,5 °C	6,6 °C	7,7 °C	8,7 °C	9,6 °C	10,5 °C	11,4 °C
12 °C	-4,5 °C	-2,6 °C	-1,0 °C	0,4 °C	1,9 °C	3,2 °C	4,5 °C	5,7 °C	6,7 °C	7,7 °C	8,7 °C	9,6 °C	10,4 °C
11 °C	-5,2 °C	-3,4 °C	-1,8 °C	-0,4 °C	1,0 °C	2,3 °C	3,5 °C	4,7 °C	5,8 °C	6,7 °C	7,7 °C	8,6 °C	9,4 °C
10 °C	-6,0 °C	-4,2 °C	-2,6 °C	-1,2 °C	0,1 °C	1,4 °C	2,6 °C	3,7 °C	4,8 °C	5,8 °C	6,7 °C	7,6 °C	8,4 °C

Tabella 2.3. Valore della temperatura di rugiada in funzione dell'UR e della temperatura dell'aria in ambiente

2.2.7. Temperatura di muffa (θ_s [°C])

L'umidità sulla superficie degli elementi costruttivi necessaria affinché si formi la muffa è raggiunta già a partire da valori dell'umidità dell'aria superiori all'80%. Ciò significa che sulle superfici degli elementi costruttivi si formano delle muffe quando la loro temperatura è almeno così fredda da determinare negli strati dell'aria direttamente a contatto con essi un'umidità dell'80%. La temperatura alla quale si verifica ciò è la così detta temperatura di muffa θ_s .

La crescita di muffa si verifica dunque già a temperature superiori a quella di rugiada. In un ambiente con clima standard, 20° C e 50% di umidità relativa, la temperatura di muffa è pari a 12,6° C, dunque di 3,3° C superiore alla temperatura di rugiada. Nell'intento di evitare danni all'edificio (muffe), la temperatura di muffa è più importante di quella di rugiada; pertanto non è sufficiente che le temperature superficiali all'interno dell'ambiente siano più calde della temperatura di rugiada dell'aria in ambiente, ma esse devono essere anche superiori alla temperatura di muffa.

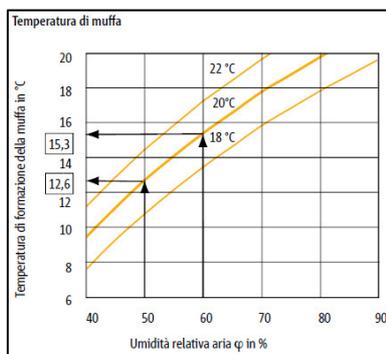


Tabella 2.4. Rapporto tra la temperatura di muffa, l'umidità relativa e la temperatura dell'aria in ambiente

2.3. EFFETTI DEI PONTI TERMICI

In corrispondenza di un ponte termico la perdita di calore localmente più elevata, comporta una riduzione delle temperature superficiali all'interno dell'edificio. Non appena la temperatura superficiale scende al di sotto della cosiddetta "temperatura di muffa" inizia a formarsi la muffa; se la temperatura superficiale scende addirittura al di sotto della cosiddetta "temperatura di rugiada" l'umidità presente nell'ambiente si condensa sulle superfici fredde sotto forma di rugiada.

Se in corrispondenza di un ponte termico si forma della muffa, questa libera nell'ambiente delle spore che possono determinare seri problemi alla salute delle persone che vi abitano. Tali spore hanno infatti un'azione allergenica, ossia possono provocare nelle persone forti reazioni allergiche quali, ad esempio:

- sinusite;
- rinite;
- asma.

Attraverso l'esposizione giornaliera, spesso prolungata, nelle abitazioni sussiste il grosso rischio che le reazioni allergiche diventino croniche.

Riassumendo, gli effetti dei ponti termici sono i seguenti:

1. pericolo di formazione di muffe;
2. pericolo di danni alla salute;
3. pericolo di formazione di condense;
4. pericolo di danni agli elementi costruttivi;
5. maggiori perdite di energia termica.

2.3.1. Umidità e condensa

L'umidità e i problemi connessi alla formazione di condensa sono un tema ampio e fortemente legato ai ponti termici. Il vapore acqueo viene trasportato o per convezione o per diffusione; solo se l'umidità dell'aria non condensa all'interno dell'elemento costruttivo si elimina la formazione di condensa interstiziale.

La parete "respira" nel senso che per diffusione dall'involucro edilizio esce vapore e non aria; la diffusione è, infatti, il movimento delle molecole di vapore acqueo attraverso un mezzo statico.

L'unico modo per eliminare l'umidità in eccesso negli ambienti interni è ventilare correttamente.

Maggiore è la differenza di temperatura tra interno ed esterno maggiore è il passaggio del vapore per diffusione. Il movimento avviene in direzione del gradiente della pressione parziale del vapore acqueo e normalmente corrisponde ad un movimento dal lato caldo al lato freddo dell'elemento costruttivo.

In caso di bassa temperatura esterna e scarso isolamento dell'involucro dell'edificio, o in prossimità dei ponti termici, la superficie interna può diventare così fredda da risultare inferiore del punto di rugiada; l'aria interna che si trova vicino a questa superficie si raffredda tanto da essere minore della temperatura di rugiada causando condensa. Per evitare questo fenomeno occorre un buon isolamento termico dell'involucro, l'eliminazione dei ponti termici e il corretto posizionamento della barriera al vapore, qualora necessaria (come ad esempio in presenza di isolamento posto sul lato caldo della parete perimetrale).

La norma UNI EN ISO 13788:2013⁹ definisce la modalità per la verifica della condensa interstiziale e determina metodi di calcolo per la temperatura superficiale interna.

2.3.2. Problemi connessi alla salute

La riduzione della temperatura superficiale interna rispetto alla temperatura media operante,¹⁰ comporta una sensazione di freddo anche se la temperatura media dell'aria è attorno ai 20° C. Si è in presenza di diminuzione del comfort qualora vi sia una differenza di temperatura superiore a 3° C da un punto all'altro dell'ambiente, proprio come spesso accade in presenza di ponti termici.

Da un punto di vista igienico-sanitario le conseguenze si possono identificare nel raffreddamento della superficie interna che può raggiungere valori di temperatura prossimi e di poco inferiori alla temperatura di rugiada causando così fenomeni di condensa superficiale con conseguente possibile formazione di macchie e muffe.

9 NORMA EUROPEA UNI EN ISO 13788:2013. Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo.

10 E' la media fra la temperatura dell'aria e quella media radiante per valutare con un unico valore gli scambi termici per convezione e irraggiamento.

I ponti termici causano problemi di umidità non solo nelle vecchie costruzioni ma anche nei nuovi edifici mal coibentati. Muffe e alghe rilasciano tossine e producono spore che possono essere respirate e causare disturbi alle vie respiratorie. Secondo studi epidemiologici, il rischio per la salute degli occupanti di abitazioni umide è doppio rispetto agli utenti di edifici privi di problemi di umidità e muffa¹¹. Per una buona qualità dell'aria occorre garantire l'assenza di ponti termici e di condense oltre ad un adeguato ricambio d'aria in base al livello di attività svolta nell'ambiente.



Figura 2.5. Formazione di muffa in un ambiente interno

Partendo dal concetto di benessere e di qualità dei locali occorre adottare soluzioni per evitare la possibile insorgenza di stati di malessere nelle persone all'interno degli spazi confinati.

SINDROME DELL'EDIFICIO MALATO

Nel settore edile il termine coniato per definire edifici con problemi di inquinamento indoor è: "sindrome dell'edificio malato". Numerosi sono i disturbi legati alla cattiva qualità dell'aria degli ambienti.

Molte sono le sostanze inquinanti che causano insorgenza di patologie e riduzione del comfort per coloro che vi soggiornano. Vi sono inquinanti:

- di natura microbiologica, quali funghi, muffe e acari;
- di natura chimica, come monossido e biossido di carbonio, ossidi di azoto, composti organici volatili, radon;
- di natura fisica come i campi elettromagnetici.

In particolare i materiali da costruzione e di arredo influiscono in modo significativo sull'inquinamento dell'aria interna.

L'umidità relativa ideale nelle abitazioni si aggira tra il 40 e il 60% poiché valori inferiori possono causare secchezza delle vie

11 Cfr. M. Ripamonti - F. Dolce, Ponti termici. Analisi e ipotesi risolutive, Dario Flaccovio, Palermo, 2011, p. 46.

respiratorie e favorire infezioni; mentre l'eccessiva umidità favorisce la formazione di muffe aumentando il rischio d'asma. Considerando la notevole quantità di tempo trascorso negli ambienti interni, la qualità dell'aria è decisiva per la salute dell'uomo.

Al fine di regolare l'umidità e rinnovare l'aria, è opportuno areare regolarmente i locali: non ha senso solo una sola volta al giorno per un periodo di tempo prolungato, ma è preferibile più volte durante la giornata per periodi più brevi.

Il fattore di ricambio dell'aria considera la frequenza con la quale l'aria interna è scambiata con quella esterna nell'arco di un'ora, ad esempio: se il fattore è 0,5 significa che in un'ora è cambiato il 50% dell'intero volume d'aria presente nell'ambiente. Questo comportamento garantisce che le emissioni di anidride carbonica (respirazione), di monossido di carbonio (processi di combustione), di vapore acqueo (lavaggi, doccia o cucina) e quelli emessi da vernici, colle e detergenti siano eliminati.

L'umidità, intesa come vapore d'acqua, e gli inquinanti prodotti negli edifici possono essere eliminati con la ventilazione naturale oppure tramite ventilazione meccanica, obbligatoria per edifici in classe energetica A o superiore.

2.3.3. Danni e degrado degli elementi edilizi

Gli effetti rilevanti causati dalla presenza di ponti termici sono:

incremento del flusso termico;

- diminuzione della temperatura interna superficiale in prossimità del ponte termico rispetto alla temperatura dell'aria interna.

Le conseguenze possono essere molteplici e sono valutabili in termini energetici, igienici sanitari (cfr.2.3.2) e strutturali.

Dal punto di vista energetico la presenza di ponti termici negli edifici comporta maggiori perdite di calore attraverso l'involucro con una maggiore o minore incidenza in relazione alla dimensione e alle caratteristiche dell'involucro.

CONSEGUENZE ENERGETICHE

Per un edificio (con tipologia costruttiva tradizionale, telaio in calcestruzzo armato, muri di tamponamento in laterizio o muri monolitici in pietra):

- poco o per nulla isolato, l'incidenza dei ponti termici si può valutare in circa un 10% delle dispersioni termiche globali;
- coibentato, l'incidenza dei ponti termici, non adeguatamente

corretti o attenuati, vale tra il 20 e il 30% delle dispersioni termiche globali¹².

Per questo motivo, in una sempre maggiore attenzione all'efficienza energetica, i ponti termici sono un considerevole punto debole del comportamento energetico di un edificio e pertanto devono essere ridotti il più possibile.

Le conseguenze di tipo strutturale sono invece legate alle repentine variazioni della temperatura all'interno dei nodi costruttivi che possono provocare tensioni interne tali da degradare il materiale e provocarne possibili distacchi. La polverizzazione dei materiali dovuta alle variazioni cicliche della temperatura superficiale è una conseguenza indiretta dei ponti termici.

CONSEGUENZE STRUTTURALI

12 Cfr. M. Ripamonti - F. Dolce, Ponti termici. Analisi e ipotesi risolutive, Dario Flaccovio, Palermo, 2011, p. 49.