

# SOLUZIONI PER L'ISOLAMENTO TERMICO DI EDIFICI ESISTENTI

*Esempi di analisi termica e verifica igrometrica delle pareti*

*Nel Cd-Rom allegato schede di valutazione termica di un'ampia casistica di strutture edilizie (pareti e coperture) per diverse tipologie e spessori (circa 300 schede), schede di analisi termica e igrometrica degli interventi di isolamento termico di un campione rappresentativo di pareti esistenti per le condizioni climatiche di tutti i capoluoghi di provincia italiani (circa 1000 schede)*

ANNA MAGRINI



*ad Andrea,  
vivi intensamente ogni giorno  
con gioia, per non rimpiangere  
mai il tempo perduto*

# INDICE GENERALE



PREFAZIONE ALLA COLLANA.....	9
PREMESSA .....	11
Introduzione.....	13
<hr/>	
CAPITOLO 1	
PROBLEMATICHE TERMICHE.....	15
1.1 Introduzione.....	15
1.2 Scambio termico in regime stazionario.....	15
1.2.1 <i>Scambio termico in regime dinamico</i> .....	20
1.3 Norme tecniche di riferimento – Limiti di legge .....	21
1.4 Approfondimenti sul regime dinamico ed esempi di calcolo .....	24
<hr/>	
CAPITOLO 2	
PROBLEMATICHE IGROMETRICHE.....	37
2.1 Introduzione: il vapore acqueo .....	37
2.2 Problematiche igrometriche delle murature .....	39
2.3 Diffusione del vapore – Parametri fondamentali .....	42
2.4 Metodo di Glaser .....	45
2.5 Metodo di Glaser – Dati necessari per il calcolo – Bilancio igrometrico di un ambiente .....	54
2.6 Verifiche dei problemi di umidità delle murature – Indicazioni normative e di riferimento per il calcolo.....	57

2.7	Verifiche dei problemi di umidità delle murature – Condensazione interstiziale .....	61
2.8	Esempio di calcolo – Condensazione interstiziale.....	63
2.9	Verifiche dei problemi di umidità delle murature – Problemi di umidità superficiale .....	69
2.10	Esempio di calcolo – Fattore di temperatura .....	74

---

## CAPITOLO 3

### IL CATALOGO DELLE STRUTTURE .....

77

3.1	Elenco tipologie di parete esaminate.....	79
-----	---	----

---

## CAPITOLO 4

### PROBLEMATICHE TERMOIGROMETRICHE – INTRODUZIONE AGLI INTERVENTI.....

83

4.1	Valutazione degli interventi di isolamento termico – Alcuni casi esempio .....	85
4.2	Valutazione degli interventi di isolamento termico – Esempi di verifica degli interventi in termini di rischio di condensazione interstiziale .....	132

---

## CAPITOLO 5

### ESEMPIO DI CALCOLO DEGLI INTERVENTI IN RELAZIONE ALLE DISPOSIZIONI LEGISLATIVE VIGENTI.....

133

BIBLIOGRAFIA.....	139
-------------------	-----

NOMENCLATURA.....	141
-------------------	-----

Simboli e unità di misura .....	141
---------------------------------	-----



APPENDICI .....	143
APPENDICE 1	
VALORE MASSIMO DELL'IRRADIANZA MEDIA MENSILE PER ALCUNI CAPOLUOGHI DI PROVINCIA ITALIANI .....	145
APPENDICE 2	
SCHEDE DELLE CARATTERISTICHE TERMICHE E TERMICHE DINAMICHE DI COMPONENTI DI INVOLUCRO OPACO DI EDIFICI ESISTENTI .....	147
APPENDICE 3	
SCHEDE DEGLI INTERVENTI DI ISOLAMENTO TERMICO: VARIAZIONE DELLA TRASMITTANZA, TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA, SFASAMENTO, FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FUNZIONE DELLO SPESSORE DELL'ISOLANTE .....	151
APPENDICE 4	
ANALISI DI PROBLEMI IGROMETRICI SUPERFICIALI .....	153
APPENDICE 5	
RISCHIO DI CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE ESEMPI DI VERIFICA DEGLI INTERVENTI DI ISOLAMENTO TERMICO .....	155
CONTENUTO DEL CD-ROM .....	159

# PREFAZIONE ALLA COLLANA



Il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici esistenti è fondamentale per raggiungere gli obiettivi posti dalla Comunità Europea in termini di contenimento dei consumi e di riduzione delle emissioni in atmosfera. Per definire strategie di intervento intelligenti occorre però avere consapevolezza che i settori della costruzione coinvolti devono essere considerati sinergicamente, in modo da ottenere i risultati più efficaci in termini di costi/benefici. I criteri di riqualificazione da adottare devono pertanto tener conto di aspetti legati alle prestazioni dell'involucro edilizio e dell'impianto senza privilegiare un approccio che ne faccia prevalere uno dei due.

Occorre quindi partire da un'analisi dettagliata dell'importanza che i diversi attori (pareti opache e trasparenti, impianti, utilizzo di fonti rinnovabili) rivestono nella riqualificazione energetica dell'esistente e nella valutazione della sostenibilità energetica e ambientale. La raccolta ragionata di soluzioni tecniche, realizzate secondo una serie di testi che riguardano diverse problematiche può costituire una base di partenza utile per le azioni di ristrutturazione su grandi complessi residenziali o sul singolo edificio.

Nei testi della collana sono considerati alcuni aspetti che possono indirizzare al meglio il progettista e il tecnico nelle scelte da operare in diversi settori (edilizio, impiantistico, energie rinnovabili).

Gli aspetti relativi all'involucro opaco vengono considerati non solo in termini di riduzione dei consumi energetici ma anche di controllo dei fenomeni legati all'umidità e alla condensazione del vapore, in quanto alcune problematiche devono essere tenute sotto osservazione insieme. Per esempio un maggiore isolamento termico può portare ad un incremento del rischio di condensazione e quindi occorre operare con scelte ragionate su materiali, spessori e posizione dell'isolante.

Uno dei componenti di involucro responsabile di consistente consumo di energia sia in regime estivo che invernale è il serramento, che negli ultimi anni ha visto un notevole sviluppo e innovazione tecnologica. Questo ha permesso di migliorarne le prestazioni e diversificarne le tipologie. Sembrano quindi appropriate indicazioni sulla scelta e sulle criticità principali (ad es. limitazione dell'irraggiamento, incremento dell'illuminazione naturale).

Nel processo di riqualificazione energetica del sistema edificio-impianto, interventi che rappresentano una via più immediata per realizzare un significativo contributo al risparmio energetico riguardano i componenti impiantistici, che possono essere attuati anche indipendentemente da quelli sull'involucro e che sono caratterizzati in linea di massima da tempi di realizzazione rapidi e da costi relativamente contenuti.

Per una rapida ed efficace valutazione preliminare dei benefici conseguibili sono stati preparati prospetti relativi alla valutazione della sostituzione di uno o più componenti

di impianto, rappresentati in termini di riduzione del fabbisogno di energia primaria, in riferimento alle condizioni climatiche tipiche delle regioni del nord, centro e sud Italia.

Le possibilità di intervento impiantistico riguardano anche lo sfruttamento dell'energia solare, che rappresenta un riferimento importante per l'analisi di contributi che possano sostituire almeno in parte fonti energetiche tradizionali e pertanto, partendo dall'analisi termica di collettori solari, si analizzano i metodi di progettazione e di calcolo semplificati per la determinazione dell'energia producibile negli impianti per la produzione di acqua calda sanitaria e per gli impianti fotovoltaici. Aspetti da non trascurare sono rappresentati da sistemi passivi a guadagno diretto, da edifici solarizzati in regime dinamico, coma anche da serre solari, che vengono analizzati con metodologie semplificate e esempi di calcolo.

L'uso di strumenti di calcolo adeguati alle esigenze della progettazione deve essere appropriato in funzione degli obiettivi. Mentre i metodi di calcolo in regime quasi-stazionario sono largamente diffusi e richiesti dalle normative di legge sulla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, le metodologie che si basano su un approccio dinamico sono più complesse, anche se possono fornire informazioni importanti nella diagnosi degli edifici esistenti e in una progettazione mirata degli interventi. È pertanto molto utile poter disporre di indicazioni strutturate, a partire dalle caratteristiche peculiari dei modelli di calcolo, per approfondire aspetti relativi ai dati di input e di output, anche sulla base di esempi e di indicazioni operative.

I diversi testi hanno un'impostazione applicativa, con approfondimenti di alcuni aspetti particolari, e sono corredati da numerosi esempi numerici, in modo da renderli utili a tutti i livelli ed in particolare alle figure professionali che operano nel campo del risparmio energetico negli edifici.



In un progetto realizzato da cinque Università (Pavia, Trento, Firenze, Cosenza, Udine, Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale, PRIN 2008) dal titolo “*Prestazioni energetiche degli edifici residenziali esistenti e criteri di riqualificazione nel rispetto dei requisiti di benessere e sostenibilità ambientale*” è stata considerata l’utilità di definire linee-guida per gli interventi di retrofit energetico riguardanti diverse tematiche, quali l’involucro edilizio, l’impiantistica per il riscaldamento, lo sfruttamento dell’apporto solare ecc.

L’unità di ricerca, coordinata dall’Autore, ha affrontato in particolare aspetti riguardanti le caratteristiche termo-igrometriche delle pareti esistenti e gli interventi possibili per migliorarne l’efficienza.

I risultati della ricerca hanno avuto un primo risvolto applicativo nel contributo alla ridefinizione dell’abaco delle strutture edilizie a supporto della normativa nazionale sulle procedure di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici (norma tecnica UNI TS 11300-1), in cui sono riportati i parametri termici significativi dei materiali costituenti diverse strutture (trasmissione, trasmissione termica periodica ecc.), nonché alcune indicazioni sulla distribuzione geografica delle stesse.

Nel contesto della ricerca, la catalogazione delle pareti esistenti, finalizzata all’analisi degli interventi proponibili, ha considerato oltre ai parametri termofisici (trasmissione termica, massa superficiale, capacità termica areica) e dinamici (trasmissione termica periodica, sfasamento, attenuazione), anche la valutazione del rischio di condensazione interstiziale e quello della presenza di alti valori di umidità superficiale.

Per alcune configurazioni di struttura considerate nel catalogo, come spunto per una scelta ragionata degli interventi più appropriati, vengono proposte soluzioni migliorative volte alla riduzione dei consumi energetici ed al rispetto dei limiti indicati dalle normative.





Gli obiettivi di risparmio energetico, nella riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, richiedono uno sforzo considerevole nell'individuazione di soluzioni idonee efficienti ed appropriate, in quanto non tutte risultano fattibili dal punto di vista tecnico o economico.

Il miglioramento del fabbisogno energetico degli edifici esistenti, con particolare riferimento ai consumi di energia legati alla climatizzazione invernale, è uno degli obiettivi primari delle recenti Direttive Europee, a partire dalla 2002/91/CE [1].

In caso di ristrutturazione o manutenzione straordinaria delle pareti di un edificio, i requisiti minimi finora imposti a livello nazionale (D.Lgs. 192/2005 [2], D.Lgs. 311/06 [3], D.P.R. 59/2009 [4], e Linee Guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici [5]) indicano precisi limiti per i valori di trasmittanza termica delle pareti.

Inoltre, nelle procedure di certificazione energetica sono richieste indicazioni circa gli interventi migliorativi per conseguire una riduzione dei consumi energetici, comprendendo anche azioni per la riduzione della trasmittanza termica dell'involucro.

Di conseguenza, appare utile, oltre alla corretta valutazione dei parametri termici e igrometrici delle strutture esistenti, la definizione organica di strategie adottabili per migliorare la prestazione energetica dell'involucro edilizio.

La necessità di operare scelte conformi ai requisiti minimi normativi si deve conciliare con la realizzabilità tecnica e con la scelta più appropriata dei materiali da utilizzare.

La catalogazione e l'analisi di pareti esistenti costituisce un punto di partenza per lo studio delle possibilità di intervento in relazione al risparmio energetico, tenendo conto anche delle problematiche legate all'accumulo termico e agli aspetti igrometrici.

I risultati della ricerca hanno contribuito alla ridefinizione dell'abaco delle strutture edilizie a supporto della normativa nazionale riguardante le procedure di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici (UNI/TS 11300-1 [6, 7]).

Nel seguito vengono richiamate definizioni e concetti fondamentali su cui si devono fondare i calcoli da effettuarsi per la valutazione delle prestazioni termoigrometriche delle strutture opache. Sono descritte le metodologie di calcolo nel dettaglio, con il supporto di esempi applicativi. Vengono forniti alcuni spunti in merito alla scelta delle caratteristiche dei materiali per gli interventi. Vengono inoltre evidenziate alcune problematiche relative alla verifica contestuale termica e igrometrica delle soluzioni proponibili (quindi all'utilizzo di dati desunti dalle norme vigenti), per ottimizzare la scelta dell'intervento di isolamento termico nella ristrutturazione di pareti opache.



# PROBLEMATICHE IGROMETRICHE

## 2.1 Introduzione: il vapore acqueo

L'aria atmosferica si può considerare come una miscela di diversi gas (con comportamento omogeneo e quindi considerato unico componente), e vapore acqueo, presente in quantità variabile in relazione alla possibilità della miscela di riceverne per apporti dall'esterno o cederne parte per condensazione.

Considerando il volume occupato dalla miscela, se uno dei componenti non fosse inizialmente uniformemente distribuito nello spazio, esso tenderebbe a “diffondere” e distribuirsi uniformemente in tutto il volume. Il parametro a cui si fa riferimento per quantificare questa distribuzione è la **concentrazione del vapore** che rappresenta la quantità di sostanza  $m_v$  (in [kg]) in riferimento al volume  $V$  (in [m<sup>3</sup>]) occupato dalla miscela.

La **concentrazione in massa** si può considerare come una densità del componente rispetto al volume totale, e viene anche indicata come umidità volumica dell'aria:

$$v_v = m_v / V \quad [\text{kg/m}^3]$$

La **densità** (o massa volumica) in generale è definita come il rapporto tra la massa e il volume occupato dalla sostanza:

$$\rho = m / V \quad [\text{kg/m}^3]$$

La presenza di vapore acqueo nell'aria atmosferica viene quantificata comunemente attraverso l'**umidità relativa**, anche se questo parametro non è sufficiente a indicarne la quantità. L'umidità relativa è definita come il rapporto tra la densità del vapore e la densità del vapore in condizioni di saturazione:

$$\phi = \rho_v / \rho_s$$

Lo stato del vapore può essere indicato come “satturo”, in presenza di liquido, e come “surriscaldato”, se non è presente liquido.

Il vapore surriscaldato rispetta approssimativamente l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$P_v = R_v T$$

dove:

$v$  = volume specifico =  $V / m = 1 / \rho$  [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$R_v$  = costante particolare del vapor d'acqua [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]

$T$  = temperatura [ $\text{K}$ ]

In base a tale espressione, l'umidità relativa può essere anche espressa in funzione delle **pressioni parziali di vapore e di saturazione** alla stessa temperatura:

$$\phi = P_v / P_s$$

La **saturazione** è quella condizione limite (in termini di pressione e temperatura) oltre la quale l'acqua passa dalla fase vapore a quella liquida.

Si parla di **pressione parziale** in quanto il vapore è uno dei componenti della miscela che comprende anche i gas costituenti l'aria atmosferica.

La miscela viene considerata come composta da gas perfetti la cui pressione è, per la legge di Dalton, la somma delle pressioni parziali dell'aria secca e del vapore, e quindi:

$$P_a + P_v = P_{atm}$$

La pressione parziale viene definita come la pressione che ciascun componente della miscela eserciterebbe se, da solo, occupasse tutto il volume a disposizione della miscela stessa.

La pressione parziale del vapore risulta compresa tra il valore zero ( $P_v = 0$ ) e il valore massimo, corrispondente alla pressione di saturazione ( $P_v = P_s$ ), e si misura solitamente in Pascal = Newton /  $\text{m}^2$ .

La **pressione di saturazione** dipende dalla natura dell'aeriforme e dalla sua temperatura e può essere calcolata, per il vapore acqueo, mediante le seguenti espressioni analitiche, in funzione della temperatura:

per  $t \geq 0^\circ\text{C}$  
$$P_s = 610,5 e^{\frac{17,269-t}{237,3+t}}$$
 [Pa]

da cui anche 
$$t = \frac{237,3 \log_e \left( \frac{P_s}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left( \frac{P_s}{610,5} \right)}$$
 [ $^\circ\text{C}$ ]

per  $t < 0^\circ\text{C}$  
$$P_s = 610,5 e^{\frac{21,875-t}{265,5+t}}$$
 [Pa]

da cui anche 
$$t = \frac{265,5 \log_e \left( \frac{P_s}{610,5} \right)}{21,875 - \log_e \left( \frac{P_s}{610,5} \right)}$$
 [ $^\circ\text{C}$ ]

espressioni indicate per il calcolo della pressione di saturazione riportate qui sopra, si può osservare che la pressione di saturazione aumenta all'aumentare della temperatura ed è indipendente da altri parametri.

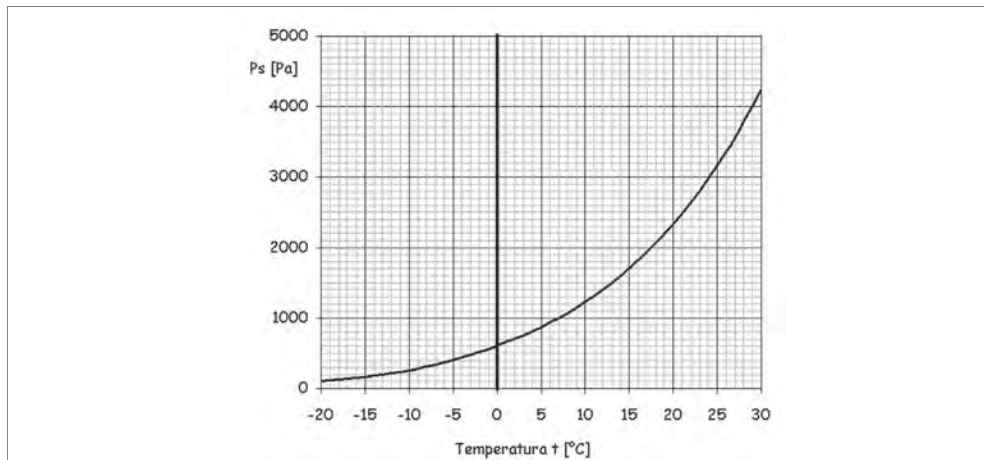


FIGURA 2.1 – Dipendenza della pressione di saturazione dalla temperatura

Può essere utile inoltre definire la **temperatura di rugiada**: temperatura alla quale la pressione parziale del vapore d'acqua raggiunge la pressione di saturazione e quindi inizia a condensare. Tale situazione si può ottenere mediante il raffreddamento di una massa d'aria umida.

## 2.2 Problematiche igrometriche delle murature

I materiali edili sono per la maggior parte materiali porosi e igroscopici. Un materiale **poroso** può essere definito come una matrice solida nella quale sono presenti dei vuoti. Questi (pori) mettono a disposizione un'ampia superficie che generalmente presenta affinità con le molecole di vapore. In funzione della quantità dei vuoti presenti in un materiale si può quantificare la **porosità**.

Per calcolarla si considera il rapporto tra il volume delle cavità (dei vuoti) e il volume totale. Il materiale può presentare pori aperti o chiusi.

Ad essa si può correlare la **permeabilità**, intesa come la quantità dei vuoti, presenti nel materiale, intercomunicanti fra loro.

L'umidità può essere adsorbita attraverso la parete cellulare del materiale che viene così indicato come igroscopico. Il processo di **adsorbimento** è differente da quello di **assorbimento**, in quanto nel primo caso il materiale non cambia il suo stato ad eccezione di un incremento del contenuto di umidità in massa, mentre nel secondo caso si ha una trasformazione chimica del materiale per effetto della presenza di acqua. Per esempio un sale che assorbe umidità può passare da solido a soluzione liquida.

L'**igroscopicità** si quantifica attraverso le curve di adsorbimento e desorbimento che

si possono costruire per ciascun materiale ad una data temperatura (Figura 2.2). Le curve rappresentano il contenuto di umidità del materiale in equilibrio con un determinato valore di umidità relativa esterna. Il profilo di un'isoterma di assorbimento è caratteristico dell'igroscopicità del materiale: la pendenza delle curve rappresenta la capacità igroscopica del materiale e cioè la massa di vapore che è adsorbita per unità di massa di materiale secco ed unità di variazione dell'umidità relativa.

Sostanze altamente igroscopiche presentano un'isoterma di adsorbimento con andamento ripido, mentre materiali scarsamente igroscopici mostrano isoterme di adsorbimento piuttosto piatte. I materiali debolmente igroscopici infatti presentano solo una leggera variazione del contenuto di acqua come conseguenza di una variazione di umidità relativa. I valori sulle isoterme di deadsorbimento sono sempre leggermente maggiori di quelli sull'isoterma di adsorbimento (fenomeno di isteresi). Per ogni materiale quindi si considerano due curve caratteristiche, per ciascuna temperatura alla quale si fa riferimento, una di adsorbimento ed una di deadsorbimento.

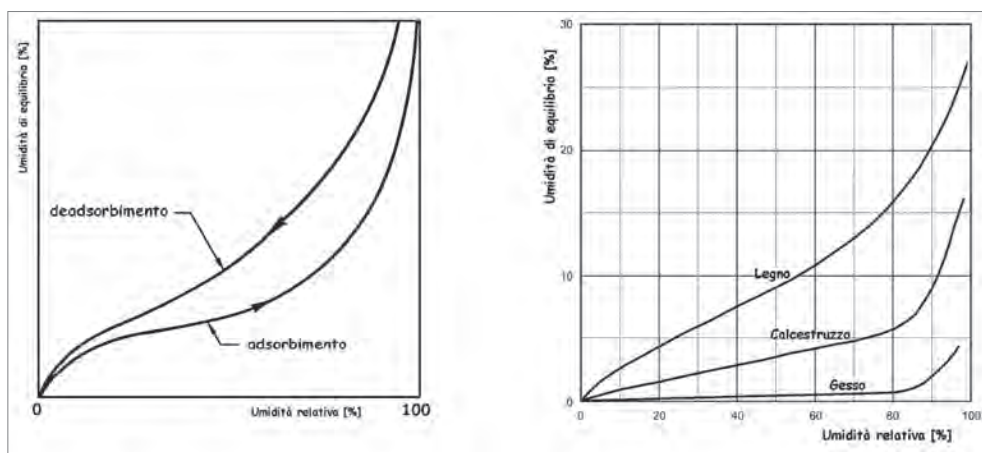


FIGURA 2.2 – a) Esempio di curva di adsorbimento/deadsorbimento e b) alcune curve di adsorbimento

Come risulta evidente dalla figura 2.2 il contenuto di umidità in un materiale aumenta in funzione dell'umidità relativa dell'aria che lo circonda. Alcuni materiali igroscopici, come il legno, subiscono variazioni dimensionali in relazione al contenuto di umidità.

Mentre ci si riferisce all'igroscopicità dei materiali in relazione all'assorbimento di acqua sotto forma di vapore, l'**idrofilia** rappresenta l'attitudine di un materiale ad assorbire acqua liquida e l'**idrofobia** la capacità di un materiale di non bagnarsi a contatto con acqua liquida.

Nelle costruzioni, i materiali porosi possono assorbire acqua liquida che si filtra attraverso fessure, o dovuta a pioggia. L'acqua può essere presente nelle murature già a partire dalla fase di costruzione, all'interno del calcestruzzo, nei laterizi, e nei legnami e in tutti i materiali che possono venire in contatto con acqua. Ancora prima, il contenuto



di umidità dei materiali può essere influenzato dalle condizioni di stoccaggio. Le tempistiche di edificazione lasciano poco tempo ai materiali per far evaporare questo contenuto d'acqua che pertanto può determinare successivi problemi nella fase di asciugatura.

Sotto forma di vapore, l'acqua può infiltrarsi nelle murature degli edifici attraverso diversi percorsi. Si può avere per esempio diffusione del vapore a causa di gradienti di pressione parziale del vapore, o trasferimento di vapore dovuto a movimenti dell'aria nelle fessurazioni.

A livello generale si possono considerare due fenomeni predominanti che stanno alla base di quanto si verifica nelle costruzioni: la **diffusione del vapore acqueo** e l'**assorbimento di acqua per capillarità**.

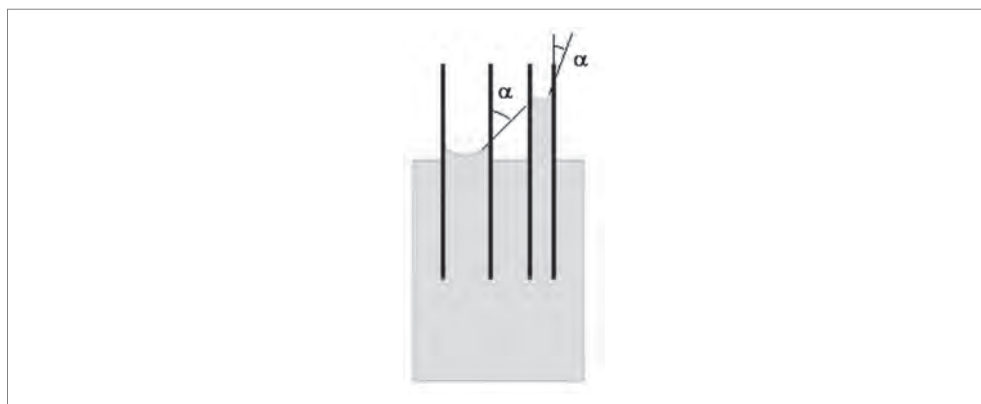


FIGURA 2.3 – Esempio: risalita capillare

Il movimento dell'acqua per **capillarità** si attua nelle piccole cavità presenti nei materiali (con diametro equivalente inferiore al decimo di millimetro) dove la risalita del liquido è dovuta all'attrazione molecolare tra la superficie del materiale e le molecole d'acqua.

Le forze capillari di risalita dipendono dalla tensione superficiale, dalla viscosità e dalla densità del liquido, dall'angolo  $\alpha$  di contatto tra il liquido e le pareti del poro (Figura 2.3) e dal raggio del poro.

Il fenomeno è tanto più marcato quanto più piccolo è l'angolo  $\alpha$  di contatto tra il menisco dell'acqua e la superficie. I materiali idrofilici hanno un angolo di contatto  $\alpha < 90^\circ$ , mentre quelli idrofobici l'angolo  $\alpha$  è compreso tra  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

In questo contesto ci si focalizza sui fenomeni legati alla diffusione del vapore.

Il fenomeno di **diffusione del vapore** è rappresentato dalla migrazione del vapor d'acqua attraverso un materiale poroso in funzione della differente concentrazione del vapore nell'aria a contatto con le superfici del materiale.

Le strategie di controllo dell'umidità si sono concentrate sulla formulazione di metodologie di calcolo per la diffusione del vapore finalizzate alla valutazione del rischio di

condensazione interstiziale ed alla previsione dei fenomeni di superficie.

Strumenti di calcolo più limitati sono disponibili per valutazioni relative alla previsione del trasporto di acqua piovana, dal terreno, per gravità o per capillarità, problemi che però sono considerati con molta attenzione nella pratica e affrontati con tecniche di intervento efficaci.

Le conseguenze della diffusione del vapore all'interno delle strutture edilizie possono rendersi visibili in superficie in tempi lunghi e non sempre si riescono ad individuare prontamente le cause effettive.

Il vapor d'acqua che migra per diffusione attraverso i materiali edilizi, seppure in quantità molto contenuta, può provocare però ingenti danneggiamenti: esso può incontrare nel suo transito zone a temperatura più bassa di quella di rugiada.

La pressione parziale del vapore potrebbe quindi raggiungere valori corrispondenti alla pressione di saturazione in riferimento alla temperatura locale.

In tali condizioni si attua il processo di condensazione del vapore: si verifica quindi l'assorbimento dell'acqua liquida da parte dei materiali in cui condensa, che ne provoca l'alterazione delle caratteristiche termofisiche, in particolare riducendone la resistenza termica, e danneggiandoli in modo temporaneo o permanente.

### 2.3 Diffusione del vapore – Parametri fondamentali

Per affrontare il problema legato al trasporto di vapore nelle murature occorre considerare i meccanismi che determinano questo moto. Principalmente, il movimento del vapore all'interno di un materiale si determina per effetto di una differenza tra le pressioni o le concentrazioni di vapore nell'aria a contatto con le due facce della parete. Questo è un fenomeno che si può rilevare comunemente nelle strutture edilizie.

Le attività umane infatti modificano la concentrazione del vapore nell'ambiente interno che pertanto, soprattutto nella stagione invernale, risulta maggiore rispetto a quella dell'ambiente esterno. In base a tali considerazioni si può pertanto assumere che, almeno nella stagione invernale, la pressione del vapore all'interno di un ambiente sia maggiore rispetto a quella all'esterno.

I parametri termofisici dei materiali che sono coinvolti nella valutazione del problema in regime stazionario sono principalmente la **conduttività termica**  $\lambda$  [W/(m K)], che condiziona l'andamento della temperatura all'interno degli strati e la **permeabilità al vapore**  $\delta$  [kg / (m s Pa)], che determina la maggiore o minore attitudine di un materiale ad essere attraversato dal vapore d'acqua. Per alcuni materiali viene indicato il **fattore di resistenza igroscopica**  $\mu = \delta_o / \delta$  [-], dove  $\delta_o$  è la permeabilità al vapore dell'aria, che assume, come valore di riferimento,  $200 \cdot 10^{-12}$  kg / (m s Pa).

Per descrivere in modo quantitativo il trasporto di massa per diffusione, si utilizza la Legge di Fick, che mette in relazione la portata di vapore per unità di superficie  $g_v$ , che transita attraverso un materiale, di spessore  $L$  e permeabilità  $\delta$ , con la differenza  $\Delta P_v$

tra le pressioni del vapore della miscela di aria umida in prossimità delle sue superfici. Ipotizzando che il fenomeno si sviluppi in condizioni stazionarie, si può scrivere (Figura 2.4):



$$g_v' = -\delta \Delta P_v / L \quad [\text{kg} / (\text{m}^2\text{s})]$$

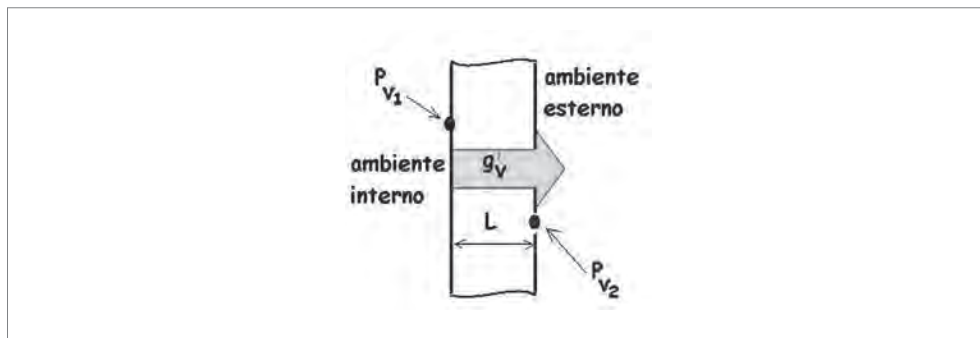


FIGURA 2.4 – Trasmissione del vapore: schema

La portata di vapore (riferita all'unità di area attraversata dal vapore) si mantiene costante se non intercorrono fenomeni di condensazione dovuti alla presenza di zone a temperatura inferiore a quella di rugiada.

In assenza di condensazione, per rappresentare l'andamento della pressione di vapore su un grafico, si può considerare un diagramma (Figura 2.5) che riporta in ordinata la pressione di vapore e in ascissa il rapporto  $L/\delta$  (resistenza alla diffusione del vapore).

Dato che il valore di  $L$  può essere dell'ordine di qualche unità (in centimetri) e il valore della permeabilità dei materiali da costruzione può essere dell'ordine di  $10 \div 200 \cdot 10^{-12} \text{ kg} / (\text{m s Pa})$ , si considera per comodità in ascissa il prodotto  $(L \delta_o / \delta)$  che viene indicato come spessore equivalente  $s_d$ :

$$s_d = L \delta_o / \delta = L \mu \quad [\text{m}]$$

dove:

$\mu = \delta_o / \delta =$  fattore di resistenza igroscopica,

$\delta_o =$  permeabilità al vapore dell'aria =  $193 \cdot 10^{-12} \text{ kg} / (\text{m s Pa})$ ,

$\delta_o$  nei calcoli si approssima a  $200 \cdot 10^{-12} \text{ kg} / (\text{m s Pa})$

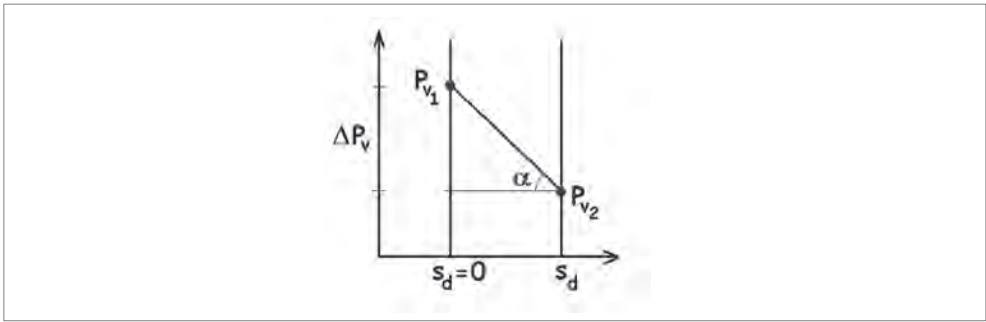
Si può scrivere

$$g_v' = \delta \Delta P_v / L = \delta_o \Delta P_v / s_d \quad [\text{kg} / (\text{m}^2\text{s})]$$

con

$$\Delta P_v = P_{vi} - P_{ve}$$





**FIGURA 2.5** – Esempio di andamento della pressione del vapore in un materiale in funzione dello spessore equivalente

La linea che congiunge i due valori di pressione del vapore ha pendenza  $\alpha$ , determinata numericamente da:

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta P_v / s_d \text{ che, moltiplicata per } \delta_o, \text{ fornisce il valore di } g_v'$$

e pertanto è un segmento di retta, considerando che non vi sia condensazione e che quindi la portata di vapore  $g_v'$  nel materiale sia costante.

Nel caso di una parete composta da più strati di materiali differenti, si può trovare un'espressione sintetica che esprime il trasporto di vapore mediante la Legge di Fick, attraverso la definizione dello spessore equivalente totale.

Per ogni strato si può impostare un'espressione che mette a rapporto la differenza di pressione del vapore tra le due facce, come nel caso precedente, e lo spessore equivalente. Si ottiene in questo modo la portata di vapore che attraversa ciascuno strato, secondo la legge di Fick:

$$\begin{aligned} g_v' &= \delta_o (P_{v1} - P_{v2}) / s_{d1}; \\ g_v' &= \delta_o (P_{v2} - P_{v3}) / s_{d2}; \\ g_v' &= \delta_o (P_{v3} - P_{v4}) / s_{d3}; \text{ ecc.} \end{aligned} \quad [\text{kg} / (\text{m}^2\text{s})]$$

La portata del vapore è la stessa attraverso tutti gli strati, nell'ipotesi di regime stazionario e di assenza di condensazione, e pertanto il segmento di retta che congiunge la pressione sulle due facce ha la stessa pendenza in tutti gli strati, in funzione della differenza di pressione parziale e dello spessore equivalente. Supponendo di fermarsi a tre strati, dalle relazioni così scritte si può ottenere:

$$\delta_o (P_{v1} - P_{v2}) = s_{d1} g_v'; \quad \delta_o (P_{v2} - P_{v3}) = s_{d2} g_v'; \quad \delta_o (P_{v3} - P_{v4}) = s_{d3} g_v'$$

Sommando tutti i parametri a primo termine dell'equazione e tutti quelli a secondo termine, si ottiene:

$$\delta_o [(P_{v1} - P_{v2}) + (P_{v2} - P_{v3}) + (P_{v3} - P_{v4})] = s_{d1} g_v' + s_{d2} g_v' + s_{d3} g_v'$$



$$\delta_o (P_{v1} - P_{v4}) = (s_{d1} + s_{d2} + s_{d3}) g_v'$$

$$\delta_o (P_{v1} - P_{v4}) = s_{dtot} g_v' \quad \text{dove} \quad s_{dtot} = (s_{d1} + s_{d2} + s_{d3})$$

e anche:

$$g_v' = \delta_o (P_{v1} - P_{v4}) / s_{dtot} \quad [\text{kg} / (\text{m}^2\text{s})]$$

La schematizzazione sul diagramma  $(P_v, s_d)$  di figura 2.6 permette di tracciare una linea continua che congiunge la pressione del vapore della faccia interna con quella più esterna.

I valori di  $P_{v1}$  e  $P_{v4}$  sono corrispondenti alla superficie interna ed esterna della parete a tre strati. La relazione tra le pressioni superficiali e quelle degli ambienti, rispettivamente interno  $P_{vi}$  ed esterno  $P_{ve}$ , può esprimersi nel modo seguente:

$$g_v' = \beta_i (P_{vi} - P_{v1}) \quad g_v' = \beta_e (P_{v4} - P_{ve}) \quad [\text{kg} / (\text{m}^2\text{s})]$$

dove con  $\beta_i$  e  $\beta_e$  si indicano come coefficienti superficiali di trasporto di massa convettivo che solitamente hanno valori molto elevati. Questo comporta che, a parità di portata di vapore, le corrispondenti differenze di pressione del vapore siano molto piccole, tanto da poterle considerare approssimativamente uguali:

$$P_{vi} \cong P_{v1} \quad P_{v4} \cong P_{ve}$$

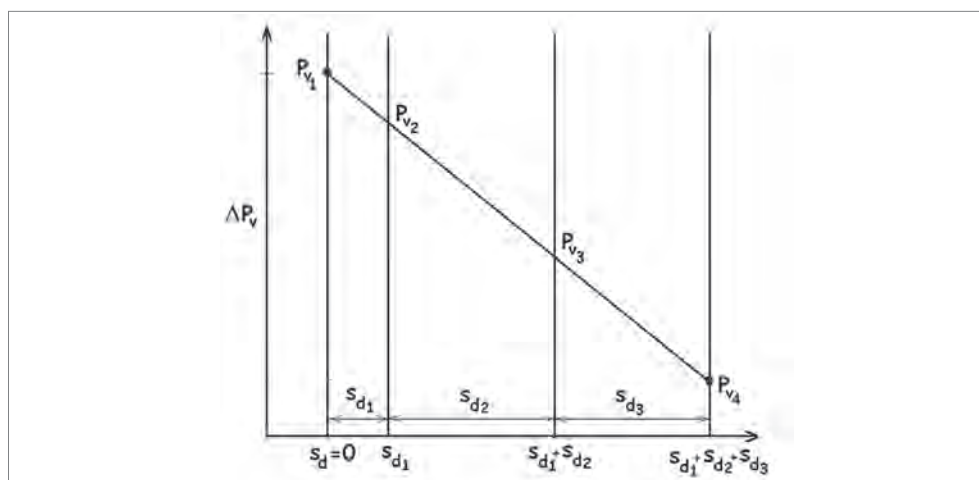


FIGURA 2.6 – Rappresentazione dell'andamento delle pressioni di vapore all'interno di strati piani paralleli in funzione dello spessore equivalente

## 2.4 Metodo di Glaser

Il metodo di Glaser permette di verificare, attraverso una rappresentazione grafica, se una parete presenta problemi di condensazione interstiziale.

Esso si può applicare se si trascurano alcuni effetti:

- la variazione delle proprietà dei materiali in funzione del contenuto di umidità;
- la risalita capillare e il trasporto di acqua liquida all'interno dei materiali;
- il moto dell'aria attraverso fessure o intercapedini;
- la capacità igroscopica dei materiali.

Anche se nella normativa internazionale il metodo di Glaser rappresenta il riferimento per la valutazione del rischio di condensazione del vapore all'interno di una parete, questo metodo comporta limitazioni che possono condurre a errori.

Infatti, le caratteristiche termofisiche dei materiali, come la conduttività termica, dipendono dal contenuto di umidità nei materiali. Questo è influenzato dall'assorbimento capillare, dal trasporto di acqua liquida, o anche dai movimenti dell'aria attraverso fessure o intercapedini o dall'effetto dell'assorbimento superficiale della pioggia.

I processi di evaporazione e condensazione che si possono verificare nei materiali comportano inoltre uno scambio di energia termica che modifica la distribuzione delle temperature e le corrispondenti pressioni di saturazione.

Gli effetti della radiazione solare possono contribuire a modificare la distribuzione della temperatura negli strati più esterni.

Oltre a trascurare gli effetti sopra indicati, l'analisi viene svolta considerando il trasporto di vapore monodimensionale e assumendo condizioni al contorno costanti.

Il diagramma in figura 2.6 viene utilizzato per l'applicazione del metodo di Glaser, quando su di esso venga rappresentato anche l'andamento della pressione di saturazione in funzione della distribuzione della temperatura all'interno dei diversi strati. Dal confronto grafico dei due andamenti è possibile mettere in evidenza la situazione in cui si ha condensazione del vapore, che si verifica nel caso in cui la pressione del vapore raggiunga il valore di quella di saturazione.

Per riportare l'andamento della pressione di saturazione sul diagramma, occorre determinare dapprima l'andamento della temperatura all'interno degli strati: è quindi necessario partire da considerazioni sul flusso termico che attraversa la struttura. Questo può essere calcolato in funzione della differenza di temperatura tra le due facce rivolte verso l'ambiente interno e quello esterno e della trasmittanza  $U$  (o della somma delle resistenze termiche).

Nell'ipotesi di considerare una parete piana composta da tre strati piani e paralleli, come in figura 2.7, e che la temperatura interna  $t_i$  sia più elevata di quella esterna  $t_e$ , verrà scambiato un flusso termico monodimensionale attraverso la parete dall'interno verso l'esterno, con temperature via via decrescenti nella stessa direzione. Gli stessi concetti possono essere applicati ad una parete di  $n$  strati.

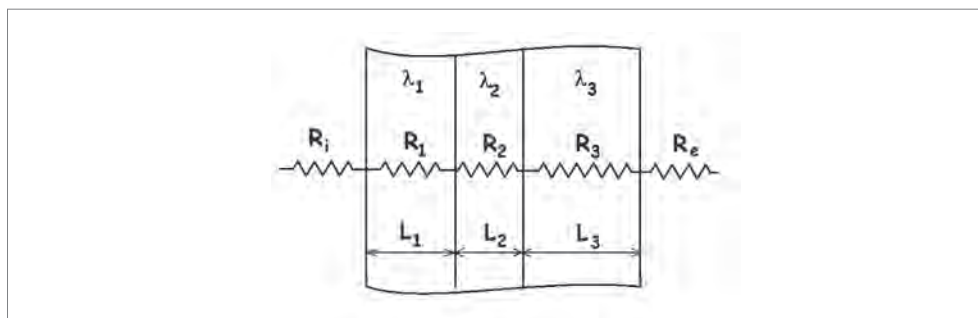


FIGURA 2.7 – Esempio di resistenze termiche in una parete a tre strati

Il flusso termico per unità di superficie  $\varphi'$  [W/m<sup>2</sup>] può essere espresso in diversi modi, in funzione dei meccanismi di scambio del calore e delle differenze di temperatura alle varie interfacce tra materiali diversi e in superficie, rimanendo però costante, nell'ipotesi di regime stazionario.

Come già indicato nel capitolo precedente, per lo scambio per convezione e irraggiamento tra gli ambienti e la superficie interna ed esterna, occorre considerare i coefficienti superficiali di scambio  $h_i$  e  $h_e$  [W/(m<sup>2</sup>K)]. Per quanto riguarda invece il flusso di calore attraverso i materiali, esso avviene per conduzione e dipende dalla conduttività  $\lambda$  [W/(m K)] di ciascun materiale.

Nel caso di una parete a tre strati schematizzato in figura 2.7, si riportano in tabella 2.1 le diverse espressioni del flusso termico. Sommando tra loro le differenze di temperatura espresse in funzione del flusso termico e delle resistenze termiche così come definite, si può arrivare alle espressioni riportate in tabella 2.2.

TABELLA 2.1 – Espressione del flusso termico in funzione della differenza di temperatura e delle modalità di scambio termico nei diversi strati della parete

Flusso termico			Resistenza termica
$\varphi' = h_i (t_i - t_1)$	$\varphi' = (t_i - t_1) / (1 / h_i)$	$\varphi' = (t_i - t_1) / R_i$	dove $R_i = 1 / h_i$
$\varphi' = \lambda_1 (t_1 - t_2) / L_1$	$\varphi' = (t_1 - t_2) / (L_1 / \lambda_1)$	$\varphi' = (t_1 - t_2) / R_1$	dove $R_1 = L_1 / \lambda_1$
$\varphi' = \lambda_2 (t_2 - t_3) / L_2$	$\varphi' = (t_2 - t_3) / (L_2 / \lambda_2)$	$\varphi' = (t_2 - t_3) / R_2$	dove $R_2 = L_2 / \lambda_2$
$\varphi' = \lambda_3 (t_3 - t_4) / L_3$	$\varphi' = (t_3 - t_4) / (L_3 / \lambda_3)$	$\varphi' = (t_3 - t_4) / R_3$	dove $R_3 = L_3 / \lambda_3$
$\varphi' = h_e (t_4 - t_e)$	$\varphi' = (t_4 - t_e) / (1 / h_e)$	$\varphi' = (t_4 - t_e) / R_e$	dove $R_e = 1 / h_e$

TABELLA 2.2 – Espressione del flusso termico in funzione delle resistenze termiche

$(t_i - t_1) = \varphi' R_i$		(t <sub>i</sub> - t <sub>1</sub> ) + (t <sub>1</sub> - t <sub>2</sub> ) + (t <sub>2</sub> - t <sub>3</sub> ) + (t <sub>3</sub> - t <sub>4</sub> ) + (t <sub>4</sub> - t <sub>e</sub> ) = = $\varphi' (R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_e)$ ovvero: (t <sub>i</sub> - t <sub>e</sub> ) = $\varphi' R_{tot}$ dove: $R_{tot} = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_e$ si ha anche: $\varphi' = (t_i - t_e) / R_{tot} = U (t_i - t_e)$ dove: $U = 1 / R_{tot}$ trasmittanza termica
$(t_1 - t_2) = \varphi' R_1$		
$(t_2 - t_3) = \varphi' R_2$		
$(t_3 - t_4) = \varphi' R_3$		
$(t_4 - t_e) = \varphi' R_e$		

# CONTENUTO DEL CD-ROM



Il CD-Rom allegato al presente volume si avvia automaticamente per i sistemi predisposti con autorun. Nel caso non si avviasse, occorre accedere all'unità CD/DVD (esempio: D:\) ed eseguire il file **index.html**. Per la corretta visualizzazione su Explorer o su gli altri browser occorre "consentire i contenuti bloccati".

Il CD-Rom contiene:

- APPENDICE 1 – Valore massimo dell'irradianza media mensile per alcuni capoluoghi di provincia italiani. Si tratta di una tabella con i dati di riferimento per diversi comuni italiani capoluoghi di provincia, suddivisi per zone climatiche.
- APPENDICE 2 – 298 schede in pdf delle caratteristiche termiche e termiche dinamiche di componenti di involucro opaco di edifici esistenti.
- APPENDICE 3 – 19 schede in pdf degli interventi di isolamento termico: variazione della trasmittanza, trasmittanza termica periodica, sfasamento, fattore di attenuazione in funzione dello spessore dell'isolante.
- APPENDICE 4 – Analisi di problemi igrometrici superficiali. In questa appendice, in formato pdf, sono riportate alcune analisi effettuate sulla base di calcoli che considerano i dati climatici medi mensili riportati nella UNI 10349: 1994.
- APPENDICE 5 – Rischio di condensazione interstiziale. 18 esempi in pdf di verifica degli interventi di isolamento termico (dall'esterno, dall'interno e quando possibile in intercapedine) per le condizioni climatiche di 101 capoluoghi di provincia italiani.

## **Requisiti di sistema:**

Windows XP, Vista e 7

Internet Explorer 8 o superiore

Acrobat Reader