

1 Introduzione

Ogni edificio rappresenta fondamentalmente un prototipo unico nel suo genere; talmente tante sono infatti le variabili in gioco in grado di modificare anche pesantemente il suo comportamento e la sua risposta alle sollecitazioni esterne che possono essere di vario genere: forze gravitazionali e dinamiche (sisma e vento), variazioni di temperatura ed umidità anche notevoli nell'arco della giornata o della stagione con inverni freddi e secchi alternati ad estati calde ed umide, etc...

E' pertanto indispensabile conoscere le caratteristiche del legno per prevenire i problemi e garantire la stabilità e la durata nel tempo della struttura.

Nei prossimi capitoli si farà riferimento per alcuni confronti ai "materiali tradizionali" intendendo quelli il cui uso è ormai entrato quasi come una sorta di standard nel settore delle costruzioni, ovvero: laterizio, cemento ed acciaio. Il legno viene invece indicato come il materiale nuovo ma se pensiamo alla storia dell'uomo ci vengono probabilmente in mente le palafitte che hanno rappresentato uno dei primi rifugi all'esterno delle grotte. Altro esempio sono le magnifiche chiese norvegesi "Stavkirken" resiste oltre mille anni all'azione delle intemperie nei freddi e bui inverni del nord.

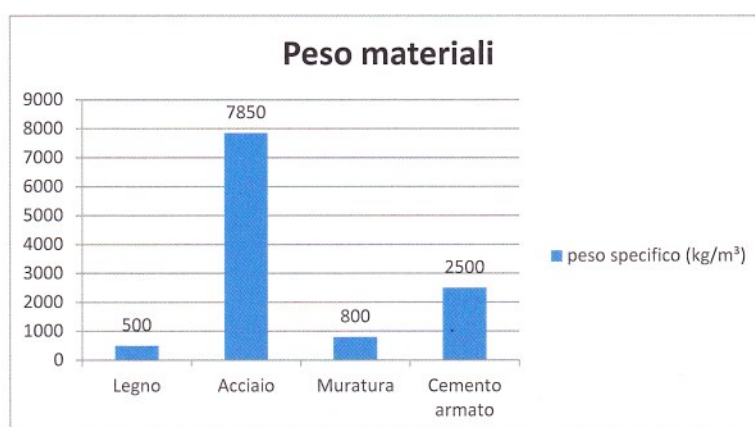


2 Fisica tecnica delle costruzioni in legno

L'applicazione dei principi della fisica tecnica al settore delle costruzioni permette di analizzare in maniera approfondita e precisa il comportamento termo-igrometrico delle strutture. Per esempio è possibile valutare le dispersioni energetiche invernali, capire il comportamento estivo in regime dinamico, determinare se si forma condensa interstiziale, quantificarla e prendere i dovuti accorgimenti per evitarla.

Nel caso delle costruzioni in legno la fisica tecnica diventa particolarmente importante in quanto non si deve dimenticare che si tratta di un materiale igroscopico e quindi piuttosto sensibile all'accumulo delle condense interstiziali. Questo fenomeno può ridurre sensibilmente le sue capacità portanti e di conseguenza la sua durabilità. Rispetto ai materiali "tradizionali" il legno presenta un peso specifico kg/m^3 ridotto e quindi spesso viene ritenuto, a torto, un materiale poco idoneo per i climi caldi.

Nei paragrafi seguenti vengono approfondite alcune tematiche relative all'applicazione dei principi di fisica tecnica alle costruzioni in legno.



Peso specifico di alcuni materiali comunemente utilizzati in edilizia

2.1 Calcolo trasmittanza

Uno dei parametri più importanti e conosciuti per la valutazione delle prestazioni invernali delle strutture è indubbiamente la trasmittanza ovvero il valore $U[\text{W/m}^2\text{K}]$ che permette di quantificare l'energica che passa attraverso un elemento costruttivo quando è presente una differenza di temperatura tra i due lati. Il flusso va sempre dal lato caldo verso il lato freddo che nello specifico caso di stagione invernale si concretizza in interno \rightarrow esterno. Dal punto di vista puramente tecnico il valore U esprime la quantità di energia dispersa per ogni metro quadrato di superficie per una differenza di un grado tra le due facce della superficie. Ne segue che ad un valore maggiore corrisponderanno maggiori perdite. Il risparmio energetico parte necessariamente dal corretto dimensionamento dei materiali isolanti (variandone lo spessore) per ottenere valori di trasmittanza molto bassi.

I materiali isolanti vengono comparati tra loro attraverso la conducibilità λ (W/mK) che esprime la capacità del materiale stesso di ostacolare, o favorire, il flusso di energia. Tale valore deve essere sempre riportato sulla scheda tecnica ma soprattutto sul certificato CE che è quello che fa fede per il calcolo.

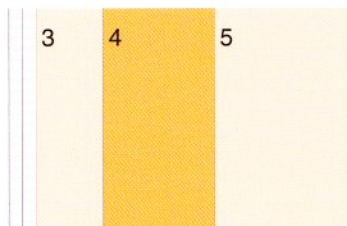
La tabella seguente riporta i valori di conducibilità di alcuni materiali comunemente utilizzati in ambito edilizio. Altri valori indicativi si possono trovare sulla normativa UNI 10351.

Materiale	Conducibilità ¹ $\lambda[\text{W/mK}]$	Materiale	Conducibilità ¹ $\lambda[\text{W/mK}]$
Legno	0,13	Cartongesso	0,25
Cemento armato	2,00-2,60	EPS	0,034
Acciaio	50-60	Lana di Roccia	0,036-0,040
Laterizio pieno	0,70	XPS	0,032
Laterizio porizzato	0,15-0,25	Poliuretano	0,030
Intonaco	1,00	VIP (Pannelli Vacuum)	0,008
Fibra di legno	0,036-0,040	Nanogel	0,014

¹ Valori medi: fare riferimento ai valori consigliati dal produttore specifico

La metodologia di calcolo del valore di trasmittanza U è riportata nella norma UNI EN ISO 6946 sia per le strutture omogenee che per quelle che presentano discontinuità ovvero materiali di diversa conducibilità accostati tra loro nello stesso strato come succede ad esempio per le costruzioni a telaio (si veda paragrafo specifico).

L'esempio seguente riporta le fasi di calcolo per una parete omogenea in Xlam. Si trascura l'effetto dei montanti necessari alla realizzazione della controparete.



Dall'interno
 13 mm Fibrogesso 12,5 mm
 13 mm Fibrogesso 12,5 mm
 60 mm 3Therm Flex 55
 100 mm Pannello Xlam
 120 mm 3Therm Wall 140
 8 mm 3Therm SM700 Pro

Fase 1

Individuazione dei vari strati con le loro caratteristiche geometriche e fisiche.

Materiale	Spessore [m]	λ [W/mK]
Fibrogesso	0,0125	0,320
Fibrogesso	0,0125	0,320
3Therm Flex 55	0,06	0,037
Pannello Xlam	0,10	0,130
3Therm Wall 140	0,12	0,040
3Therm SM700 Pro	0,008	0,540

Fase 2

Calcolo della resistenza termica offerta da ogni singolo strato dato dal rapporto tra lo spessore e la conducibilità: $R_i = s_i / \lambda_i$. Questi valori vanno poi sommati tra loro a formare la resistenza termica complessiva offerta da quella precisa sequenza di strati.

$$R_{tot} = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} = \frac{0,0125}{0,32} + \frac{0,0125}{0,32} + \frac{0,06}{0,037} + \frac{0,10}{0,13} + \frac{0,12}{0,040} + \frac{0,008}{0,54} = 0,04 + 0,04 + 1,62 + 0,77 + 3,00 + 0,01 = 5,48 \frac{(m^2 K)}{W}$$

Fase 2

Alla resistenza totale degli strati va aggiunto il contributo dell'aria ovvero si va a considerare l'effetto del movimento dell'aria sulla superficie interna ed esterna. Questi valori dipendono dalle condizioni al contorno: facciata ventilata, non ventilata, copertura inclinata, muro contro terra, etc... I coefficienti da utilizzare sono contenuti nella normativa UNI 6946 e si riporta di seguito un estratto per i casi più comuni:

Flusso di calore verso l'esterno	Resistenza di convezione termica [m ² K/W]		
	R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$
Muro esterno non ventilato	0,13	0,04	0,17
Muro esterno ventilato	0,13	0,13	0,26
Solaio esterno verso l'alto non ventilato	0,10	0,04	0,14
Solaio esterno verso l'alto ventilato	0,10	0,10	0,20
Solaio esterno verso il basso non ventilato	0,17	0,04	0,21
Solaio esterno verso il basso ventilato	0,17	0,17	0,34
Tetto inclinato non ventilato	0,10	0,04	0,14
Tetto inclinato ventilato	0,10	0,10	0,20

Il risultato per una parete non ventilata diventa quindi:

$$R = R_{si} + R_{tot} + R_{se} = 0,13 + 5,48 + 0,04 = 5,65 \frac{(m^2 K)}{W}$$

Fase 3

Calcolo della trasmittanza $U = 1/R$ ovvero:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{5,65} = 0,177 \frac{Wm^2}{K}$$

In accordo alla UNI 6946 i valori vanno arrotondati alla seconda cifra decimale.

Il Dlgs 311 del 29 dicembre 2006 all'allegato C paragrafo 2 definisce quali sono i limiti massimi di trasmittanza da rispettare divisi per elemento costruttivo (parete, copertura, pavimento) e zona climatica.

Zona climatica	Valori massimi		
	Strutture opache verticali [W/m ² K]	Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura [W/m ² K]	Strutture opache orizzontali di pavimento [W/m ² K]
A	0,62	0,38	0,65
B	0,48	0,38	0,49
C	0,40	0,38	0,42
D	0,36	0,32	0,36
E	0,34	0,30	0,33
F	0,33	0,29	0,32

Come si può ben vedere questi valori non sono sicuramente sufficienti per poter parlare di edifici a basso consumo. Per cercare di raggiungere l'ambizioso obiettivo di una reale riduzione di emissioni CO₂ e di consumi energetici bisogna indubbiamente spingersi oltre al minimo di legge e proporre alla committenza strutture più performanti. Questo risultato si può agevolmente raggiungere aumentando lo spessore dell'isolante: si raccomanda di migliorare la trasmittanza di almeno il 30% rispetto ai valori di legge.

Le zone climatiche sono determinate in base all'andamento medio delle temperature nell'arco dell'anno per mezzo del parametro "Grado giorno" come riportato nella seguente tabella dove sono raccolti anche altri parametri interessanti:

Fascia	Da [GG]	A [GG]	Utilizzo impianto di riscaldamento			Numero comuni
			Ore giornaliere	Data inizio	Data fine	
A	0	600	6	1° dicembre	15 marzo	2
B	601	900	8	1° dicembre	31 marzo	157
C	901	1400	10	15 novembre	31 marzo	989
D	1401	2100	12	1° novembre	15 aprile	1611
E	2101	3000	14	15 ottobre	15 aprile	4271
F	3001	+∞	nessuna limitazione (tutto l'anno)			1071

I gradi giorno sono calcolati in accordo alla UNI EN ISO 15927-6 e forniscono un valore di riferimento necessario quando si va a stimare il bilancio energetico annuale. Ad un valore elevato di Gradi Giorno corrisponde una zona fredda: tali dati sono facilmente reperibili su banche dati on-line per ogni comune d'Italia. La tabella seguente riporta i dati relativi ad alcuni comuni:

Comune	Gradi giorno	Zona
Livigno	4648	F
Bolzano	2791	E
Firenze	1821	D
Roma	1415	D
Napoli	1034	C
Palermo	751	B

Mettendo da parte per un attimo gli apporti solari i gradi giorno ci dicono per esempio che per riscaldare una casa a Livigno serve molta più energia rispetto a Palermo in rapporto 4648/751 ovvero oltre 6 volte tanto.

2.2 Verifiche termo-igrometriche

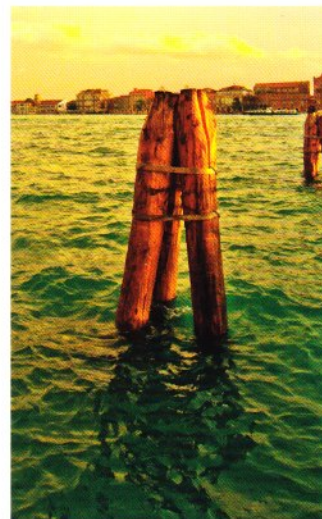
Le verifiche termo-igrometriche permettono di analizzare una stratigrafia e valutare il rischio di formazione di condensa interstiziale. Le normative di riferimento per il calcolo, richiamate anche dalle leggi italiane sono le seguenti: UNI EN ISO 13788 e UNI 10349:1994. La prima fornisce le indicazioni di calcolo mentre la seconda le condizioni al contorno esterne ovvero temperatura ed umidità media mese per mese riferite ad ogni capoluogo di provincia. Le condizioni interne sono invece fissate dal Dlgs 311 e sono costanti in tutta Italia e nei dodici mesi: temperatura 20°C ed umidità relativa 65%.

2.2.1 Condense e durabilità

Come si vedrà anche nei paragrafi successivi il legno è un materiale dotato di una notevole durabilità purché esso sia mantenuto lontano da accumuli di umidità nel tempo. Nello specifico la combinazione pericolosa è quella data da accumulo d'acqua e presenza contemporanea di ossigeno che permette agli organismi xilofagi ed alle muffe di svolgere la loro azione. Questo significa che piccole quantità d'acqua non sono pericolose a patto che venga garantita al legno la possibilità di asciugarsi. Si pensi ad esempio ad un acquazzone che bagna una casa in legno in fase di costruzione quando è ancora "nuda" ovvero priva di rivestimenti protettivi esterni. Il materiale naturalmente si bagnerà, magari anche abbondantemente, ma se non vi sono punti di ristagno in pochi giorni sarà in grado di riportarsi naturalmente in condizioni di equilibrio liberandosi dall'acqua in eccesso.

Si riporta l'esempio di Venezia che presenta nello stesso momento due situazioni molto interessanti da analizzare: i pali di fondazione degli edifici ed i pali che indicano le vie d'acqua.

I primi sono totalmente immersi in acqua o più precisamente nel fango della laguna e quindi in condizioni di anossia totale: vale a dire una situazione in cui fondamentalmente nessun organismo xilofago riesce ad



operare. Grazie a ciò i magnifici ed imponenti palazzi sono arrivati fino a noi superando quasi indenni molti secoli di storia. Questi antenati dei pali di fondazione in cemento utilizzati a tutt'oggi per aumentare la capacità portante delle fondazioni si degradano però molto rapidamente non appena vengono esposti all'aria.

I pali infissi nella laguna a gruppi di due o tre e legati tra loro vengono indicati con il termine "bricola": essi presentano una parte totalmente immersa in acqua e fango ed un parte fuori acqua. Come si può notare la porzione ridotta per azione degli agenti xilofagi è quella a pelo d'acqua ovvero quella che per via del moto ondoso e delle cicliche maree passa da una situazione di totale immersione ad una di totale esposizione all'aria. Le parti immerse e le parti emerse risultano invece a sezione quasi piena anche a distanza di alcuni anni.

2.2.2 Formazione della condensa

Per capire il motivo per cui si forma condensa interstiziale occorre anzitutto chiarire che la quantità massima di vapore che può essere disciolto in un certo volume d'aria è strettamente legata alla sua temperatura. Ad una temperatura maggiore corrisponde una maggiore capacità di accumulare vapore: l'aria calda riesce a disciogliere una elevata quantità d'acqua sotto forma di vapore.

Per capire meglio il concetto si può pensare a cosa succede quanto si prova a sciogliere dello zucchero in un pentolino pieno d'acqua: aumentando la temperatura del liquido riesco ad aumentare anche la quantità di zucchero che riesco a solubilizzare. Quando poi si va a raffreddare il tutto, si assiste alla formazione ed all'accumulo di cristalli sul fondo. Con i dovuti e necessari distinguo questo fenomeno può essere ora analizzato sostituendo il vapore acqueo allo zucchero e l'aria all'acqua.

Sulla base di quanto esposto sopra si può capire quindi che l'aria quando si raffredda può rilasciare parte del proprio contenuto d'acqua.

Un altro esempio è quello della bottiglia d'acqua presa dal frigo e lasciata all'aperto durante la stagione estiva. Localmente l'aria si raffredda molto e non vi sono più le condizioni tali per cui l'acqua rimanga sciolta in sospensione sotto forma di vapore: il risultato noto a tutti è che la superficie della bottiglia si copre in poco tempo di un velo d'acqua che si mostra come un appannamento.

2.2.2.1 Umidità assoluta, massima e relativa

E' importante fare una distinzione tra:

- **umidità assoluta:** la quantità d'acqua disciolta sotto forma di vapore in certo quantitativo d'aria
- **umidità massima:** la massima quantità d'acqua che un certo quantitativo d'aria può accogliere sotto forma di vapore
- **umidità relativa:** il rapporto tra l'umidità assoluta e la massima

Come visto nel paragrafo precedente l'umidità assoluta è strettamente legata alla temperatura e di conseguenza lo sarà anche l'umidità relativa. Questi valori sono legati tra loro da ben precise relazioni matematiche contenute nella norma 13788 ed alcuni valori di esempio sono riportati nella tabella seguente:

Temperatura [°C]	Umidità relativa [Rh%]	Umidità massima [g/m ³ _{aria}]	Umidità assoluta [g/m ³ _{aria}]
10	80	9,4	7,5
20	80	17,3	13,8
20	65	17,3	11,2
25	80	23,0	24,3
30	60	30,3	18,2

Si può osservare che per esempio l'aria a 30°/60%Rh ha un carico di umidità in termini assoluti maggiore all'aria a 20°/80%Rh: 18,2g/m³ contro 13,8g/m³. Questo fa capire come l'umidità relativa vada sempre correlata alla temperatura per capirne la reale entità.

Si ritiene interessante evidenziare che se si mantiene costante l'umidità assoluta (ovvero non si asporta umidità dall'aria) e si abbassa la temperatura si avrà un aumento dell'umidità relativa poiché l'umidità massima diminuisce.

Se per esempio si prende l'aria a 30°/60%Rh, l'umidità assoluta sarà pari a 18,2g/m³ e la massima 30,3g/m³ come mostrato nella tabella sopra. Abbassando la temperatura a 25° l'umidità relativa si porterà all'80% poiché l'umidità massima si è ridotta da 30,3g/m³ a 23,0g/m³.

2.2.2.2 Diffusione e convezione

Durante i 12 mesi dell'anno l'edificio è soggetto alle variazioni climatiche: d'inverno l'aria interna sarà più calda di quella esterna mentre d'estate avverrà il contrario. Il vapore disciolto in aria sarà pertanto soggetto a condizioni di pressione diverse in quanto funzione della sua temperatura: attraverso i calcoli psicrometrici, riportati anche nella UNI 13788, è possibile calcolare la pressione parziale di vapore nelle diverse condizioni climatiche in cui esso può trovarsi.

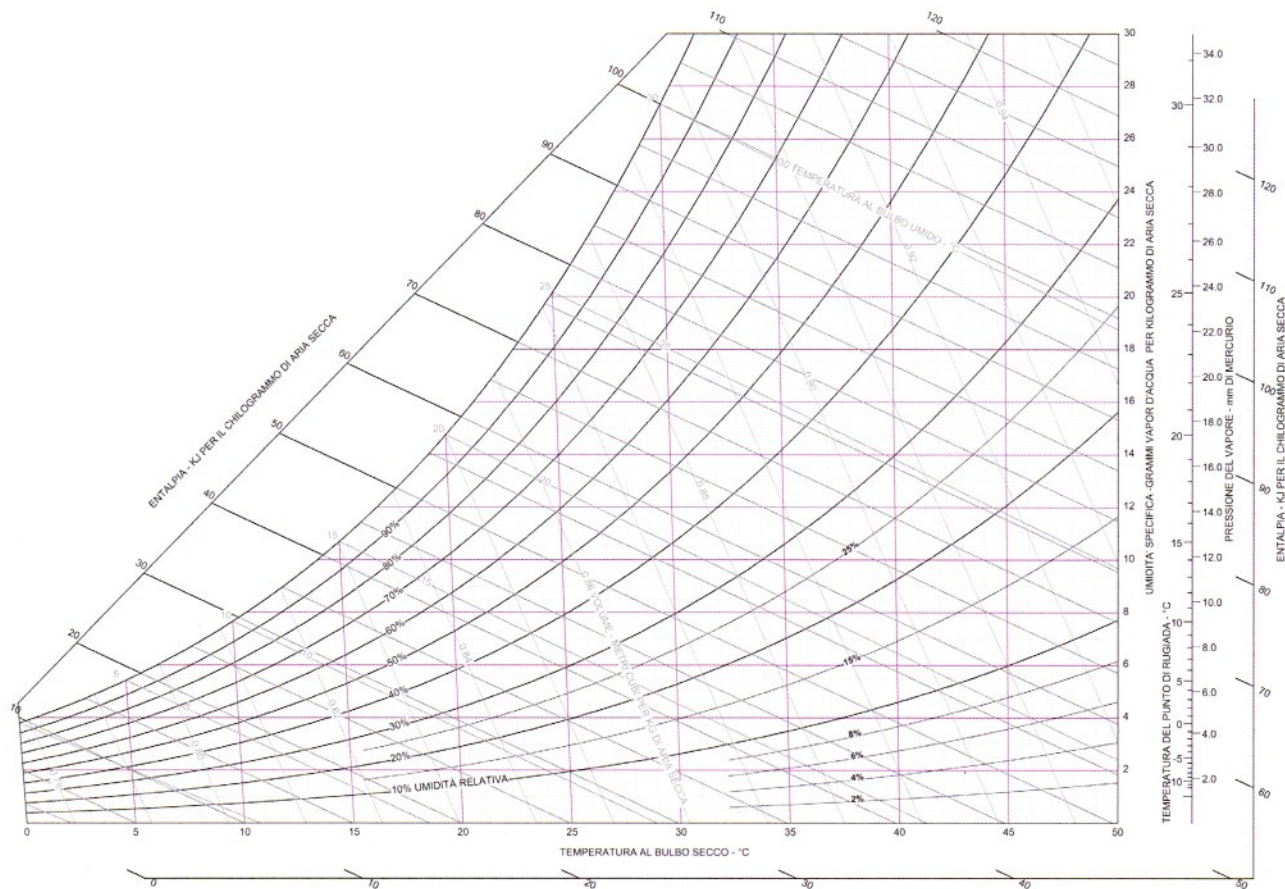
Temperatura [°C]	Umidità relativa [Rh%]	Pressione parziale di vapore [mm _{Hg}]
0	80	3,9
10	80	7,4
20	80	14,0
20	65	11,4
25	80	25,5
30	60	19,1

Il vapore si sposterà quindi secondo gradiente ovvero dalle zone con pressione maggiore verso zone con pressione minore. Questo significa che nelle due condizioni inverno/estate avvengono i seguenti fenomeni:

- inverno, interno 20°/65% pressione parziale 11,4mmHg, esterno 0°/80% pressione parziale 3,9mmHg. La pressione interna è maggiore di quella esterna e quindi il vapore migrerà dall'interno verso l'esterno.

- estate, interno 20°/65% pressione parziale 11,4mmHg, esterno 30°/80% pressione parziale 25,5mmHg. La pressione interna è minore di quella esterna e quindi il vapore migrerà dall'esterno verso l'interno ovvero cercherà di fare il percorso contrario a quanto fatto durante la stagione fredda.

Questi risultati sono facilmente analizzabili anche tramite il diagramma psicrometrico che raccoglie tutte le possibili combinazioni di temperatura/umidità dell'aria e permette di fare delle veloci analisi di tipo qualitativo.



Assodato che il vapore si sposta secondo gradiente da una zona a maggiore pressione verso una a minore rimane da capire come ciò avvenga. I meccanismi sono essenzialmente due: convezione e diffusione.

Convezione: il vapore si sposta attraverso l'aria. Per esempio quando si aprono le finestre e si arieggia un locale o in prossimità di uno spiffero. Per convezione si spostano grandi quantità di vapore in poco tempo.

Diffusione: il vapore si muove attraversando un mezzo solido come ad esempio l'intonaco o una membrana. Per diffusione si spostano piccole quantità di vapore in molto tempo ovvero l'esatto contrario di quanto accade per convezione.

Se nel caso di diffusione parliamo di pochi milligrammi nell'arco delle 24h, nel caso di convezione si passa a centinaia di grammi nello stesso intervallo di tempo. Sono sufficienti aperture anche di soli pochi mm² per movimentare grandi quantità di vapore.

Si può facilmente intuire come la convezione abbia potenzialmente una elevata capacità di danneggiare la struttura.

2.2.2.3 Permeabilità al vapore dei materiali

Ogni materiale possiede una propria capacità intrinseca che dipende dalla sua struttura molecolare di ostacolare o favorire il passaggio del vapore. Il parametro che quantifica questa sua attitudine è "μ" (si legge mu) ovvero la "resistenza alla diffusione del vapore" che è dato dal rapporto tra la permeabilità al vapore dell'aria e quella della sostanza considerata. "μ" è adimensionale ed ha come valore minimo 1: in questa situazione il materiale oppone una resistenza davvero minima e pari a quella dell'aria.

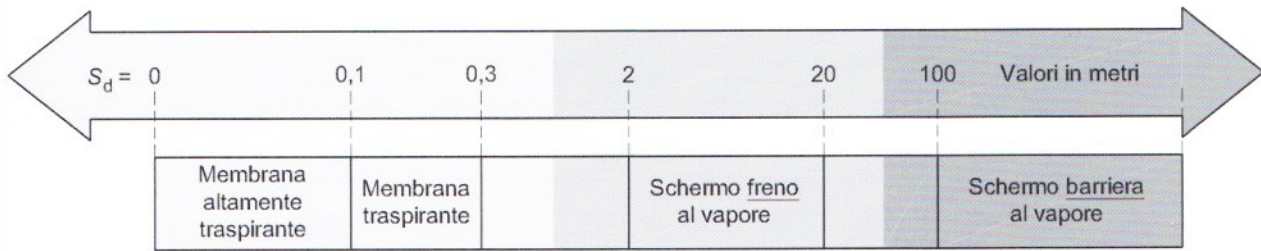
Data la natura di "μ" derivante da un rapporto aria/materiale è facile intuire come a valori elevati corrisponda una bassa permeabilità; per esempio μ=10 significa possedere una capacità di ostacolare il passaggio del vapore 10 volte più di uno strato d'aria di pari spessore.

La tabella seguente raccoglie i valori di μ per alcuni prodotti utilizzati abitualmente in edilizia (i valori sono indicativi e possono variare da produttore a produttore):

Materiale	μ [-]	Materiale	μ [-]
Legno	40 - 60	Cartongesso	8
Cemento armato	75	EPS	20 - 100
Fibra di legno	5 - 10	XPS	80 - 250
Lana di Roccia/Vetro	1	Intonaco	15 - 40
Laterizio	5 - 10	Rasatura	60 - 100
OSB	200 - 300		
Poliuretano	80		

E' importante però non fermarsi al solo valore di μ ; occorre analizzare l'effetto di un determinato materiale con un ben preciso spessore in maniera simile a quanto si è visto per il parametro λ , che permetteva di calcolare la resistenza come $R=s/\lambda$. Quando si parla di traspirabilità si calcola lo strato d'aria equivalente $S_d = \mu * s$ dove s è lo spessore del materiale espresso in metri.

Nel caso specifico dei teli dove lo spessore è molto piccolo (normalmente dell'ordine di 0,5mm o meno) le schede tecniche riportano direttamente il valore di S_d . La UNI 11470 al paragrafo 4.1 propone a tal proposito una classificazione degli schermi e membrane traspiranti (indicati con l'acronimo SMT) sulla base del valore di S_d :



Si può capire quindi come non sia sufficiente parlare di "freno vapore" o "barriera vapore" in quanto il valore di S_d oscilla entro ben specifici range.

2.2.3 Diagramma di Glaser e le verifiche

Le verifiche termo-igrometriche vengono fatte per mezzo del diagramma di Glaser che permette di analizzare il comportamento del vapore al variare della temperatura durante la sua migrazione verso l'esterno o l'interno della struttura ovvero verso zone a pressione minore. Questa analisi richiede la conoscenza dell'andamento delle temperature all'interno della parete e la permeabilità al vapore dei vari strati.

E' però molto importante sottolineare come tutto il calcolo si fondi sull'ipotesi che il vapore si muove solo ed unicamente per diffusione ovvero piccole quantità in molto tempo! In caso di convezione il calcolo non è pertanto più valido: maggiori saranno gli spifferi, più importante sarà il passaggio d'aria e maggiore l'errore di calcolo commesso. Poichè i movimenti d'aria non sono prevedibili né tanto meno quantificabili non è possibile stimare l'entità dell'errore commesso.

Il diagramma di Glaser presenta sull'asse delle ascisse il valore di S_d di ogni singolo strato mentre su quello delle ordinate viene riportata la pressione parziale di vapore. La conoscenza dell'andamento della temperatura e delle caratteristiche fisiche dei vari materiali permette di tracciare due curve: pressione di saturazione e pressione parziale. Attenzione a non confondere lo spessore dello strato di materiale con lo spessore d'aria equivalente: l'unità di misura è sempre una lunghezza ma sono due grandezze molto diverse tra loro.

La verifica è soddisfatta nel momento in cui la curva di pressione di saturazione è sopra quella parziale come riportato nella figura seguente.

Diagramma di Glaser senza formazione di condensa

E' interessante evidenziare come la parte "più larga" del grafico non corrisponda al materiale con maggiore spessore ovvero l'isolante bensì al pannello OSB che misura appena 15mm ma è dotato di un valore di μ piuttosto elevato pari a 200 (si veda paragrafo 2.2.4).

Quando le due curve si incrociano si ha un punto critico ovvero un punto dove il vapore si trasforma in acqua facendo un passaggio di stato gassoso → liquido. Questo avviene perché la quantità di vapore non è più compatibile con la temperatura in quello strato/punto.

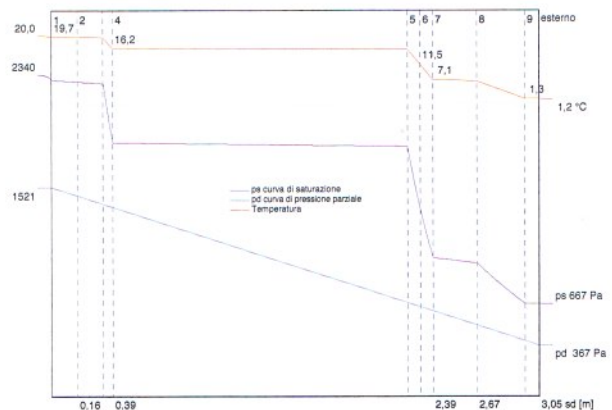
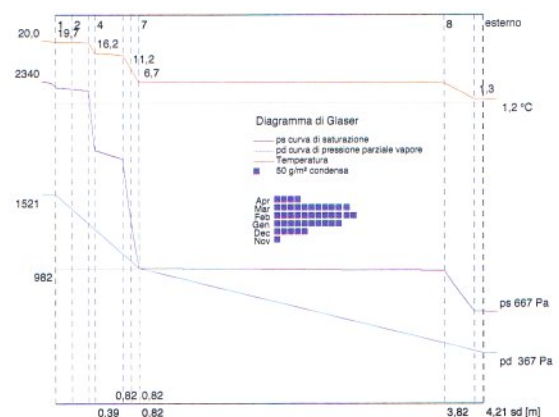


Diagramma di Glaser con formazione di condensa

Il Dlgs 311 richiede che la verifica venga condotta nell'arco dei 12 mesi mantenendo costanti le condizioni interne (20°/65%Rh) e variando le condizioni climatiche esterne fornite dalla UNI 10349. Qualora si formi condensa è richiesto il calcolo del bilancio annuale attraverso la metodologia proposta dalla UNI 13788: si va cioè a valutare la quantità di condensa (g/m²) che si forma e quella che si riassorbe mese per mese quando le condizioni climatiche lo consentono. La normativa impone il soddisfacimento di due condizioni qualora si verifichi questa situazione:

- almeno un mese all'anno la struttura deve essere completamente asciutta ovvero priva di condensa interstiziale: devo cioè avere un bilancio negativo.
- la quantità di condensa sia compatibile con le caratteristiche del materiale (si veda il prospetto sottostante riportato dalla Appendice nazionale della 13788, §NA.1.5)



Attenzione: la normativa non vieta la formazione di condensa! Richiede però la verifica del bilancio annuale che deve risultare negativo per almeno un mese.

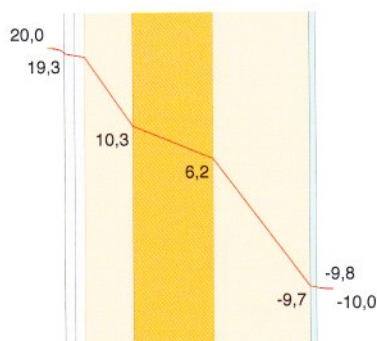
Quantità limite di condensa ammissibile alla fine del periodo di condensazione

Materiale	Densità [kg/m ³]	Q_{amm} [g/m ²]
Laterizi	600 - 2 000	≤ 500
Calcestruzzi	400 - 2 400	≤ 500
Legnami e derivati	500 - 800	$\leq 30 \rho d$
Intonaci e malte	600 - 2 000	$\leq 30 \rho d$
Fibre di natura organica: con collanti resistenti all'acqua	300 - 700	$\leq 20 \rho d$
con collanti non resistenti all'acqua	300 - 700	$\leq 5 \rho d$
Fibre minerali	10 - 150	$\leq 5 000 \rho d [\lambda/(1 - 1,7 \lambda)]$
Materie plastiche cellulari	10 - 80	$\leq 5 000 \rho d [\lambda/(1 - 1,7 \lambda)]$

Nota d è espresso in [m] e ρ in [kg/m³].

A livello progettuale come posso evitare la formazione di condensa? Si ricorda anzitutto che la condensa si forma perché in un punto la quantità di vapore non è compatibile con la temperatura di quello strato. Le condizioni climatiche al contorno (interno ed esterno) sono imposte dalla normativa e di conseguenza anche la quantità di vapore iniziale che cerca di spostarsi verso l'esterno o verso l'interno dell'edificio seguendo il gradiente di pressione. L'andamento della temperatura è determinato dalle proprietà del materiale (conducibilità), dal suo spessore e dalla sua posizione. Resta quindi un'unica possibilità: diminuire la quantità di vapore fin dall'inizio del suo percorso (lo strato interno nella situazione invernale) in maniera tale da renderla compatibile con l'abbassamento di temperatura.

A livello operativo si deve quindi scegliere una opportuna sequenza di materiali dotati di specifici valori di permeabilità μ e di conseguenza S_v . Con riferimento alla stagione invernale quali sono i criteri per la scelta? Si deve partire analizzando l'andamento della temperatura: negli strati iniziali essa sarà necessariamente più elevata rispetto a quella esterna e quindi il grado di umidità massima sarà maggiore.



Andamento della temperatura all'interno di una parete Xlam. Si noti come la curva sia più ripida all'interno degli strati di materiale con conducibilità minore

Man mano che ci si sposta verso l'esterno la temperatura diminuisce e con essa anche la quantità massima d'acqua che posso avere disciolta sotto forma di vapore. Ne segue che si dovrà cercare di frenare il vapore fin dai primi strati affinché ne arrivi una quantità minore sulla parte esterna più fredda. Da qui si può intuire come la posizione dei materiali con diverse proprietà sia determinante per il comportamento globale dell'elemento costruttivo considerato, a differenza di quanto succede per il calcolo della trasmittanza dove l'ordine non influisce sul risultato finale.

I principi generali da seguire nella creazione di una stratigrafia sono i seguenti con riferimento alla direzione interno (caldo) → esterno (freddo):

- materiali con permeabilità al vapore crescente
- materiali con conducibilità decrescente
- evitare materiali con ridotta permeabilità negli strati più esterni

Attenzione che questo non significa in alcun modo porre una barriera vapore totalmente chiusa negli strati iniziali per non avere vapore nei materiali successivi!

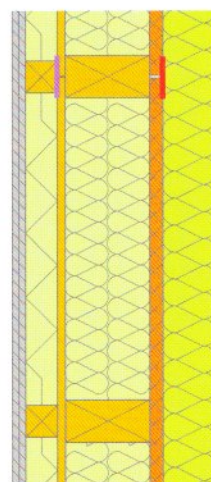
Il compito del progettista nel caso di una copertura sarà per esempio quello di dimensionare opportunamente la membrana fornendo all'impresa esecutrice dei range di valori minimi e massimi di S_v . Sempre a proposito di copertura può risultare interessante fare l'analisi di un pacchetto tetto (perlina più isolante) privo di telo freno vapore: se non ci si trova in condizioni climatiche particolari è molto probabile che le verifiche tornino soddisfatte escludendo il rischio di formazione di condensa. Questo potrebbe portare alla errata conclusione che il telo non sia necessario, ma in realtà la situazione è ben diversa. Basti pensare all'ipotesi di base per il disegno del diagramma di Glaser: il vapore si sposta solo per diffusione e non per convezione. Questa condizione viene soddisfatta solo ricorrendo ad un telo che garantisca la tenuta all'aria del pacchetto.

2.2.4 Valutazione della traspirabilità complessiva

Attraverso i concetti visti nei paragrafi precedenti è possibile calcolare il valore complessivo di S_d di un elemento costruttivo così da poter rendere possibile un confronto tra diverse soluzioni.

Per esempio con riferimento alla parete a telaio vista precedentemente si avrà:

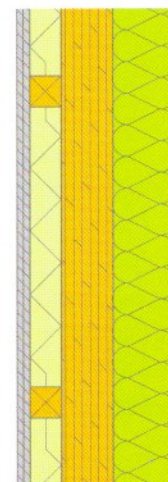
Strato	μ_{\min}	μ_{\max}	$\mu_{\min} * s$	$\mu_{\max} * s$	S_d
	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]
1 Fibrogesso	13	13	0,16	0,16	0,16
2 Fibrogesso	13	13	0,16	0,16	0,16
3 3Therm Flex 55	1	2	0,06	0,12	-> 0,06
4 OSB / 4	200	250	3,00	3,75	-> 3,00
5 3Therm Flex 55	1	2	0,08	0,16	-> 0,08
6 3Therm Flex 55	1	2	0,08	0,16	-> 0,08
7 3Therm DWD Protect N+F	11	110	0,28	2,75	-> 0,28
8 3Therm Wall 140	3	3	0,30	0,30	0,30
9 3therm SM700 Pro	11	11	0,09	0,09	0,09



Ovvero il risultato è $S_{d,tot}=4,21m$.

Nel caso invece di una parete con struttura portante in Xlam:

Strato	m_{\min}	m_{\max}	$m_{\min} * s$	$m_{\max} * s$	S_d
	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]
1 Fibrogesso 12,5 mm	13	13	0,16	0,16	0,16
2 Fibrogesso 12,5 mm	13	13	0,16	0,16	0,16
3 3Therm Flex 55	1	2	0,06	0,12	-> 0,06
4 Pannello Xlam	40	80	4,00	8,00	-> 4,00
5 3Therm Wall 140	3	3	0,36	0,36	0,36
6 3therm SM700 Pro	11	11	0,09	0,09	0,09



Ovvero il risultato è $S_{d,tot}=4,83m$.

2.3 Parametri estivi

Troppo spesso ed erroneamente si ritiene che la massa sia l'unico parametro da analizzare per valutare le prestazioni di un elemento costruttivo. Se così fosse con riferimento al grafico visto all'inizio del presente capitolo il legno ne uscirebbe sonoramente sconfitto da un confronto con gli altri materiali visto che pesa circa un quinto rispetto al cemento armato. Siamo però così sicuri che sia sufficiente una semplicissima bilancia per giudicare un pacchetto costruttivo? Il Dlgs 311 ad esempio faceva riferimento ai 230kg/m² di massa frontale minimi per limitare il surriscaldamento: sufficiente?

Per dare un risposta a queste domande è necessario fare una premessa molto importante andando a capire chi è il principale responsabile del surriscaldamento estivo delle nostre abitazioni: non si tratta di certo di quegli apporti che entrano dall'involucro opaco bensì di quello che entra dalle superfici trasparenti. Si parla cioè di apporti solari attraverso finestre non opportunamente protette ovvero sulle quali non è stato previsto alcun sistema di ombreggiamento mobile o fisso. A tal proposito si riporta di seguito un estratto del DPR 59 (paragrafo 18), uno dei regolamenti applicativi del Dlgs 192, che riporta alcuni obblighi per il progettista:

“

a) valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare

“

Solo successivamente viene richiesto di valutare le prestazioni dell'involucro opaco.

Durante l'estate le oscillazioni di temperatura nell'arco delle 24 ore sono molto maggiori rispetto alla situazione invernale e pertanto è necessario valutare il comportamento in regime dinamico anziché stazionario seguendo le indicazioni contenute nella UNI EN ISO 13786.

Nei paragrafi successivi si riportano i principali parametri di valutazione per quanto riguarda la stagione estiva.

2.3.1 Trasmittanza dinamica

Il DPR 59 precedentemente citato obbliga il progettista a valutare l'efficacia dei sistemi di ombreggiamento e solo in un secondo momento a valutare le prestazioni dell'involucro opaco attraverso il parametro della trasmittanza dinamica. Si riporta di seguito un estratto del decreto al paragrafo 18:

“

b) esegue, in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradiazione sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s}$ sia maggiore o uguale a 290 W/m^2 :

1) relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord / nord-est, almeno una delle seguenti verifiche:

1.1 che il valore della massa superficiale M_s , di cui al comma 22 dell'allegato A, sia superiore a 230 kg/m^2 ;

1.2 che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica ($Y_{p,t}$), di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ ”;

2) relativamente a tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica $Y_{p,t}$ di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ”;

“

Per una struttura in legno, parete o copertura che sia, risulta praticamente impossibile rispettare il limite dei 230 kg/m^2 e si deve pertanto ricorrere al calcolo della trasmittanza periodica altrimenti detta “dinamica”. La normativa di riferimento è sempre la UNI 13786 ed il significato di questo parametro è quello di valutare numericamente il modo in cui una determinata stratigrafia reagisce a variazioni climatiche dinamiche (estate) anziché in regime stazionario (inverno).

A titolo di esempio si riportano nella tabella seguente i valori di $I_{m,s}$ per alcuni capoluoghi italiani (sono evidenziati quelli dove è richiesta la verifica specifica); l'elenco completo è facilmente reperibile in rete.

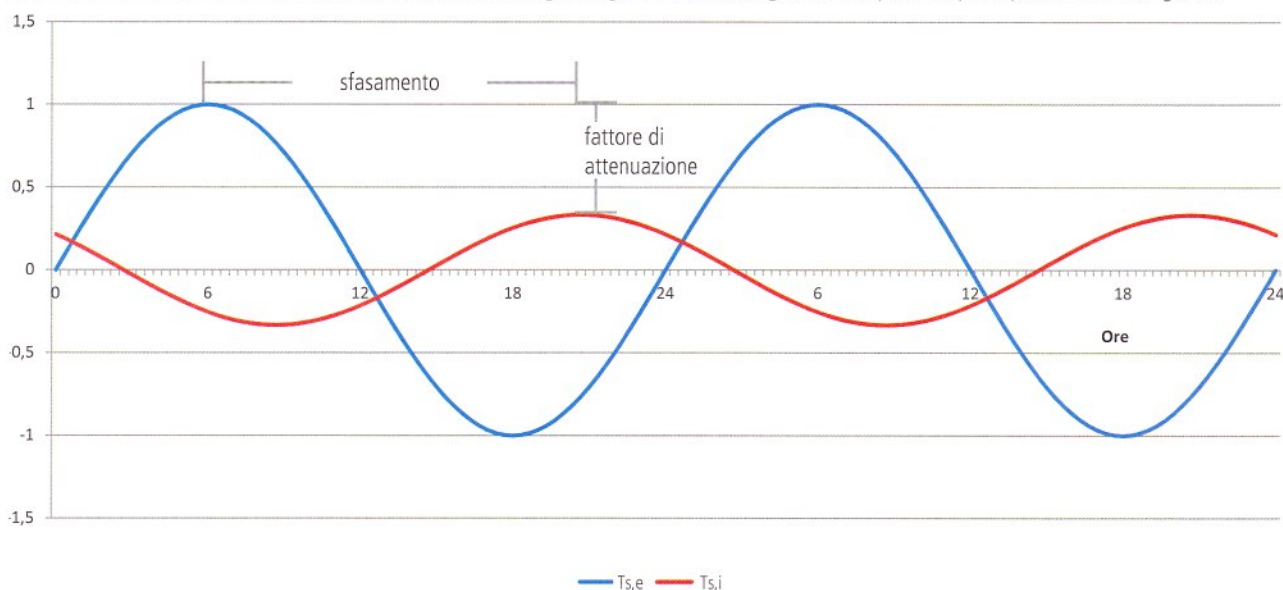
Città	$I_{m,s}$ (W/m^2)
Trento	285
Milano	278
Roma	314
Firenze	296
Napoli	315
Palermo	323

Indipendentemente dal valore della località dove si va a costruire si raccomanda di rispettare comunque i valori richiesti per la trasmittanza dinamica onde offrire una maggior protezione verso il caldo esterno.

2.3.2 Sfasamento

Lo sfasamento è uno dei parametri più conosciuti e ci dice quanto tempo espresso in ore trascorre tra due condizioni di picco sulle due superfici esterna ed interna. Per fare questo si considera un andamento sinusoidale dei valori considerati.

Per esempio quando si parla di sfasamento di temperatura si intende il numero di ore che trascorre tra il massimo della temperatura sulla superficie esterna ed il verificarsi della stessa situazione all'interno. La figura seguente mostra il significato di quanto sopra esposto in maniera grafica:



Le due curve rappresentano l'andamento delle temperature superficiali interna ed esterna, sull'asse delle ascisse sono riportate le ore e sulle ordinate una grandezza generica che varia da -1 a +1 attorno ad una posizione di equilibrio. Si può notare come le due curve siano “sfasate” l'una rispetto all'altra ovvero distanziate di un certo numero di ore. In altri termini: la superficie interna si accorge di quello che succede all'esterno solo un certo numero di ore più tardi.

La normativa italiana con il DM 26/06/2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici" al capitolo 6 "Valutazione qualitativa delle caratteristiche dell'involucro edilizio volte a contenere il fabbisogno per la climatizzazione estiva. Riferimenti nazionali" fornisce dei parametri qualitativi per le valutazioni estive facendo riferimento allo sfasamento e proponendo una classificazione:

Sfasamento (ore)	Attenuazione	Prestazioni	Qualità prestazionale
$S > 12$	$Fa < 0,15$	ottime	I
$12 \geq S > 10$	$0,15 \leq fa < 0,30$	buone	II
$10 \geq S > 8$	$0,30 \leq fa < 0,40$	medie	III
$8 \geq S > 6$	$0,40 \leq fa < 0,60$	sufficienti	IV
$6 \geq S$	$0,60 \leq fa$	mediocri	V

Sempre nello stesso capitolo 6.2(b) viene poi fornita la definizione dello sfasamento come "sfasamento è il ritardo temporale tra il massimo del flusso termico entrante nell'ambiente interno ed il massimo della temperatura dell'ambiente esterno". Ne segue che il valore richiesto è quello riferito al flusso termico e non alla temperatura. Quest'ultimo valore è nettamente maggiore del precedente (flusso) che quindi può portare a commettere errori a sfavore di sicurezza nella valutazione qualitativa dei pacchetti costruttivi. Si raccomanda pertanto di verificare attentamente quali sono i valori forniti dal software di calcolo utilizzato ed a tal proposito possono tornare molto utili gli esempi di calcolo risolti forniti in appendice della UNI 13786.

2.3.3 Fattore di attenuazione

Il fattore di attenuazione è riportato anch'esso nel grafico del precedente paragrafo ed esprime in percentuale quanto la struttura riesce a smorzare gli effetti delle variazioni climatiche esterne. Ad esempio avere un fattore di attenuazione pari al 90% significa che gli effetti del cambiamento esterno si manifesteranno internamente ridotti solo del 10%.

Sulla base di quanto esposto nei due paragrafi precedenti si evince che è importante avere:

- sfasamento elevato: così da allontanare il più possibile i due picchi tra loro
- fattore di attenuazione basso: così da risentire molto poco delle variazioni esterne

I due valori sono collegati tra loro da relazioni matematiche per cui fortunatamente quando ho buoni valori di sfasamento ho anche buoni valori di attenuazione. Questi due parametri sono dipendenti solo in parte dal peso specifico del materiale e comunque permettono di vedere un po' oltre il concetto della sola massa.

2.3.4 Proprietà dei materiali

Su quali criteri deve basarsi la scelta dei materiali per ottenere buoni valori di sfasamento ed attenuazione? Il parametro principale è la capacità termica, normalmente indicata con la lettera c [J/kgK] sui certificati di prodotto. Essa definisce fondamentalmente la capacità del materiale di accumulare energia: maggiore sarà questo valore e maggiore sarà la sua capacità di immagazzinamento. Tutto ciò si traduce in un miglior effetto volano in grado di contrastare le variazioni climatiche cicliche nel corso delle 24 ore.

La tabella seguente riporta la capacità termica di alcuni materiali:

Materiale	Capacità termica c [J/KgK]
Legno	2100
Cemento armato	1000
Acciaio	470
Laterizio pieno	940
Laterizio porizzato	940
Intonaco	1000
Fibra di legno	2100
Cartongesso	1000
EPS	1480
Lana di Roccia	830
XPS	1480
Poliuretano	1480
Acqua	4180

Come vanno interpretati questi valori? Prendiamo per esempio legno e cemento armato: a parità di massa il legno riesce ad accumulare oltre il doppio dell'energia del cemento offrendo un valore di 2100 contro 1000. Osservando poi il valore molto alto dell'acqua e molto basso dell'acciaio si può intuire come materiali igroscopici possano avere valori piuttosto elevati di capacità termica grazie alla presenza di acqua all'interno della propria struttura molecolare.