

ASPETTI TEORICI E PRATICI SULLA TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA E IL REGIME DINAMICO

STRUTTURE LEGGERE IN LEGNO E CALCESTRUZZO

0. GENERALITÀ

Con flusso termico di *trasmissione* viene determinata l'entità di energia per unità di tempo che attraversa una parete opaca, a causa della **differenza di temperatura** tra interno ed esterno. Il carico per trasmissione può costituire un contributo importante al carico termico totale relativamente al quale l'impianto termico sarà dimensionato.

In particolare, tale flusso è valutato in regime stazionario (temperatura indipendente dal tempo) nel caso di regime invernale. Nel caso di valutazioni durante il periodo di raffrescamento, l'incidenza dei diversi fattori e la variabilità dei fattori esterni, quali la radiazione solare, impongono una valutazione più complessa che non può prescindere dalla variabilità temporale. Tuttavia, in tale frangente la porzione trasmessa può risultare di gran lunga trascurabile rispetto alla sollecitazione indotta dai carichi interni (luci, persone e apparecchiature di diverso tipo) e dai carichi solari che giungono tramite le pareti vetrate.

Ciò deriva principalmente dal fatto che la sollecitazione termica esterna viene trasmessa all'interno in modo ridotto a causa dello spessore e della capacità termica degli elementi di involucro attraversati.

La variazione delle condizioni al contorno (ad esempio temperatura esterna variabile) può causare una frequente inversione della direzione del gradiente termico, contribuendo all'effetto di smorzamento.

La figura 1 può rendere conto dell'effetto descritto.

La soluzione matematica di problemi di conduzione termica in regime variabile è stata proposta da diversi autori in modo analitico [1], [2], [3], [4] e risolta con algoritmi dell'algebra matriciale.

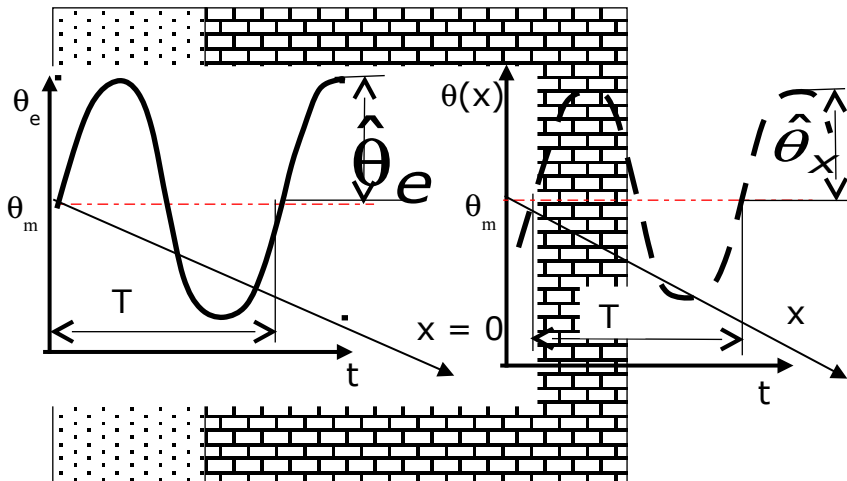


Figura 1 - Variazione della temperatura a diversa profondità di una parete omogenea.

Nella descrizione della variazione di temperatura, si ipotizza che la variazione di temperatura sia sinusoidale rispetto al tempo. Per indicare lo smorzamento della variazione di temperatura con la profondità è sufficiente ricorrere alla riduzione dell'ampiezza (o meglio della semi-ampiezza) di variazione. Il ritardo temporale con cui il fenomeno oscillatorio si presenta a profondità diverse è indicato dal termine sfasamento.

La rappresentazione vettoriale delle grandezze in questione può aiutare a visualizzare in modo opportuno il significato di quanto indicato.

La figura 2 riporta una rappresentazione di 2 vettori **A** e **B** che ruotano con velocità angolare ω : nella figura il vettore **B** è in anticipo di φ rispetto al vettore **A**.

Se i due vettori procedono alla stessa velocità ω , l'angolo tra di essi rimane invariato nel tempo. Nelle diverse situazioni temporali, cambia il valore in modulo delle proiezioni dei vettori sugli assi cartesiani x, y .

Le proiezioni dei vettori in questione varieranno da un massimo (>0) ad un minimo (<0) valutabili tramite le semplici espressioni:

$$A_x = A \cos \psi$$

$$A_y = A \sin \psi$$

$$B_x = B \cos (\psi+\varphi)$$

$$B_y = B \sin (\psi+\varphi)$$

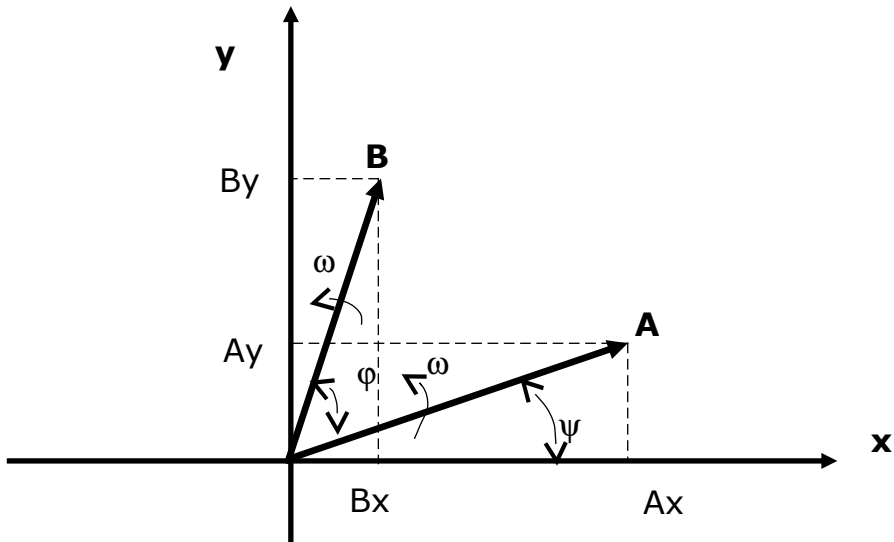


Figura 2 - Rappresentazione di grandezze vettoriali variabili nel tempo.

Se φ è positivo (tra 0 e 2π) si viene a rappresentare l'anticipo del vettore **B** rispetto al vettore **A**, con φ negativo (tra 0 e -2π) si esprime il ritardo del vettore **B** rispetto al vettore **A**. Le stesse considerazioni si possono fare riportando le proiezioni dei due vettori in un diagramma cartesiano con il tempo sull'asse delle ascisse (figura 3). In questo caso l'anticipo o il ritardo si esprimono in termine di tempo come $\Delta t = T\varphi/2\pi$

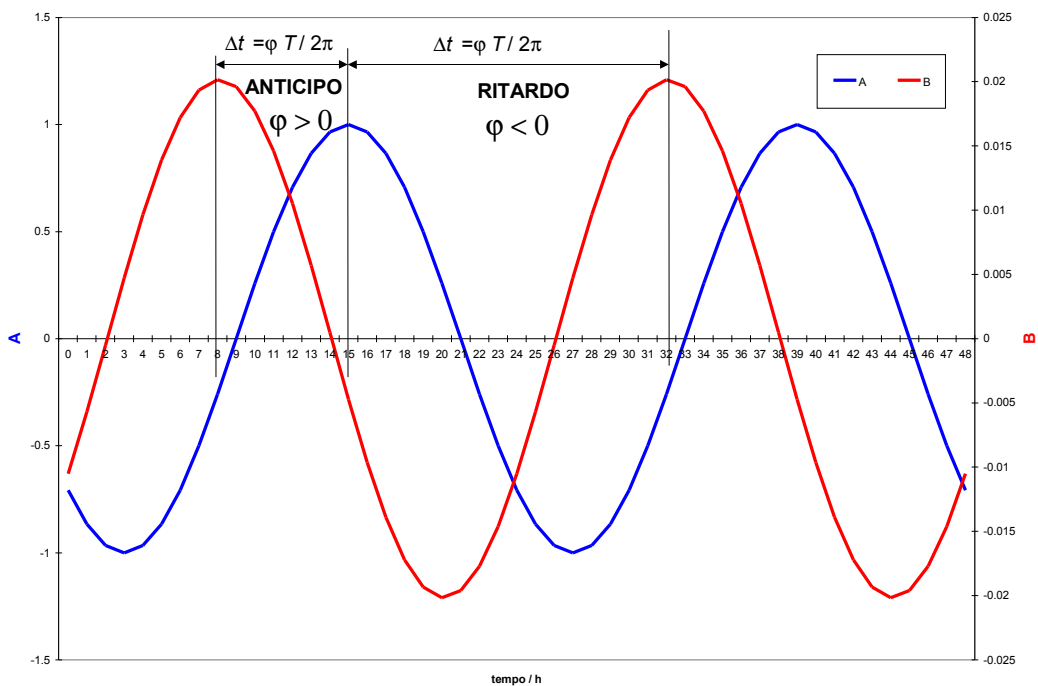


Figura 3 - Rappresentazione di grandezze sinusoidali con sfasamento φ .

Al variare della profondità considerata, il modulo del vettore diminuisce (attenuazione), mentre rimane invariata la velocità angolare ω con cui lo stesso ruota, ma viene variato il ritardo angolare con cui il secondo vettore segue il primo.

Una situazione analoga può essere prodotta nel caso della rappresentazione della temperatura variabile in modo sinusoidale e del flusso termico, dei quali è possibile seguire le variazioni in una rappresentazione del tipo proposto nella figura 3.

1. IL FLUSSO TERMICO PER TRASMISSIONE: UN METODO SEMPLIFICATO

L'entità del flusso termico monodirezionale attraverso una parete omogenea può essere espressa in modo semplificato come [5]:

$$\Phi = U (\theta_{\text{medio}} - \theta_{\text{int}}) + \mu h_i (\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{medio}}) \cos(\omega t + \varphi)$$

(1)

$\mu(x)$ = smorzamento alla profondità x ; è la variazione della temperatura alla profondità generica x , rispetto alla variazione della temperatura esterna.

a = diffusività termica = $\lambda/(c \rho)$ [m^2/s]

φ = variazione di tempo;

θ_{max} = temperatura massima esterna;

θ_{media} = temperatura media esterna;

U = trasmittanza termica della struttura [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]

θ_{int} = temperatura interna;

h_i = coefficiente di adduzione interno

Nell'espressione precedente il fattore di smorzamento μ e la variazione di tempo φ dipendono, per assegnati valori della pulsazione:

- dalle proprietà isolanti s / λ dei singoli strati e dalla loro successione;
- dall'inerzia dei singoli strati $s \rho c_p$.

Nel caso in cui il mezzo sia semi-infinito lo smorzamento può essere espresso

come: $\mu = e^{-\beta x}$

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi}{a T}}$$

Ora il massimo di tale flusso termico si verifica quando $\cos(\omega t - \varphi) = 1$ e pertanto si può scrivere:

$$\Phi_{\text{max}} = U (\theta_{\text{medio}} - \theta_{\text{int}}) + \mu h_i (\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{medio}})$$

(2)

Nel caso di parete omogenea, si può verificare che:

a) $(s \text{ c } \rho) \rightarrow 0$: è il caso di pareti a bassa capacità termica.

In tale situazione il termine $(\mu \text{ h}_i) \rightarrow U$ e pertanto:

$$\Phi_{\max} = U (\theta_{\max} - \theta_{\text{int}})$$

(3a)

b) $(s \text{ c } \rho) \rightarrow \infty$: è il caso di pareti ad elevata capacità.

In tale situazione, il termine $(\mu \text{ h}_i) \rightarrow 0$ e pertanto:

$$\Phi_{\max} = U (\theta_{\text{medio}} - \theta_{\text{int}})$$

(3b)

E' possibile ipotizzare che la temperatura interna dell'aria sia pari a $\theta_{\text{int}} = 26^\circ\text{C}$ e ricavare i valori delle temperature medie e massime dalla normativa UNI 10349. Appare evidente come, applicando i valori della normativa, il valore di Φ_{\max} non superi la decina di watt per metro quadrato.

2. IL CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786

Ai sensi dello standard internazionale UNI EN ISO 13786 *Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation method* (2008) [6], il report di calcolo richiede l'indicazione chiara della stratigrafia della parete, la definizione dei 4 elementi della matrice **Z**, fornendo dei singoli elementi modulo ed argomento, le due ammettenze termiche descritte da modulo ed argomento, il fattore di decremento ed il calcolo della trasmittanza termica eseguito secondo UNI EN ISO 6946 *Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method* (2008) [7].

E' opportuno richiamare la procedura indicata in [6] per la determinazione di alcune delle caratteristiche termiche calcolate. In particolare la procedura consente il calcolo delle caratteristiche termiche dinamiche nel caso di variazione periodica sinusoidale.

La temperatura in una zona n può essere descritta nel suo variare con il tempo con la seguente espressione:

$$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + |\hat{\theta}_n| \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

dove: $\bar{\theta}_n$ = temperatura media nel periodo considerato [°C];

$|\hat{\theta}_n|$ = semiampiezza della variazione di temperatura nel periodo considerato [K];

ω = frequenza angolare della variazione termica = $2 \pi/T$

T = periodo considerato [s];

φ = differenza angolare di fase [rad]

Allo stesso modo, in regime dinamico, varia con il tempo anche il flusso termico; nella zona n, questo risulta:

$$\Phi_n(t) = \bar{\Phi}_n + |\hat{\Phi}_n| \cos(\omega t + \phi)$$

(5)

dove: $\bar{\Phi}_n$ = flusso termico medio nel periodo considerato [W/m²];

$|\hat{\Phi}_n|$ = semiampiezza della variazione di flusso nel periodo considerato
[W/m²];

ω = frequenza angolare della variazione termica = $2 \pi/T$

T = periodo considerato [s];

ϕ = differenza angolare di fase [rad]

La normativa UNI EN ISO 13786 consente la valutazione sia della variazione di temperatura θ e del flusso termico q in condizioni di regime dinamico (variazione temporale delle variabili). Tale calcolo si risolve con una notazione matriciale con le relazioni seguenti:

$$\hat{\theta}_e = Z_{11}\hat{\theta}_i + Z_{12} \hat{\Phi}_i$$

(6)

$$\hat{\Phi}_e = Z_{21}\hat{\theta}_i + Z_{22} \hat{\Phi}_i$$

(7)

$Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}$ sono i termini della matrice di trasferimento.

Nel sistema si considera flusso positivo quello ceduto dall'ambiente interno all'esterno.

Considerando la zona interna (i) ed esterna (e), un parametro molto importante della matrice è il termine Z_{11} o $1/Z_{11}$ che si ottiene dalla relazione:

$$\left(\begin{array}{c} \hat{\theta}_i \\ \hat{\theta}_e \end{array} \right)_{\Phi_i=0} = \frac{1}{Z_{11}}$$

(8)

ossia la variazione di temperatura all'interno θ_i dell'ambiente a causa di una variazione di temperatura all'esterno θ_e . *Maggiore è Z_{11} e maggiore sarà l'attenuazione della sollecitazione di temperatura causata dalla variazione esterna.* Di tale grandezza è possibile anche definire il ritardo temporale (time

shift), che è l'argomento di tale grandezza e che indicherà il ritardo con cui si manifesta internamente il valore massimo dell'oscillazione periodica esterna. Allo stesso modo è possibile definire il rapporto tra ampiezza del flusso termico e variazione di temperatura quando la variazione di temperatura nel lato interno è nulla ($\hat{\theta}_i = 0$). In questo caso la (6) indica:

$$\hat{\theta}_e = Z_{12} \hat{\Phi}_i \quad (9)$$

E' una condizione valutabile quando l'ambiente interno è controllato. Si definisce trasmittanza dinamica U_{din} il rapporto tra il flusso indotto all'interno da una variazione periodica sinusoidale della temperatura esterna θ_e e la variazione stessa θ_e .

$$U_{din} = \left(\frac{\hat{\Phi}_i}{\hat{\theta}_e} \right)_{\hat{\theta}_i=0} \quad (10)$$

$\hat{\Phi}_i$ è positivo quando è diretto dall'ambiente interno all'esterno. Se si volesse invece collegare la trasmittanza al flusso positivo quando questo è diretto dall'ambiente esterno all'interno si dovrebbe scrivere:

$$U_{din} = \left(\frac{-\hat{\Phi}_i}{\hat{\theta}_e} \right)_{\hat{\theta}_i=0} = - \left(\frac{\hat{\Phi}_i}{\hat{\theta}_e} \right)_{\hat{\theta}_i=0} \quad (11)$$

In questo caso l'argomento del numero complesso fornisce lo sfasamento tra la variazione di flusso termico inviato all'ambiente interno e la variazione di temperatura esterna.

Dalla relazione (6), risulta:

$$U_{din} = - \left(\frac{\hat{\Phi}_i}{\hat{\theta}_e} \right)_{\theta_i=0} = - \frac{1}{Z_{12}}$$

(12)

Tale grandezza viene indicata nella norma con il simbolo Y_{12} . Molte volte si preferisce fornire il decremento, rapporto tra la trasmittanza dinamica e quella stazionaria, come:

$$f = \frac{U_{din}}{U} = \frac{|Y_{12}|}{U}$$

(13)

La trasmittanza U dell'elemento va calcolata ignorando i ponti termici eventualmente presenti nella struttura.

Altro parametro importante per caratterizzare le pareti in regime dinamico sono le ammettenze che indicano, con riferimento alle due superfici interna ed esterna, a fronte di variazioni unitarie θ_i e θ_e le potenza termiche entranti Φ_i e Φ_e

$$Y_{11} = \left(\frac{\hat{\Phi}_i}{\hat{\theta}_i} \right)_{\theta_e=0} = - \frac{Z_{11}}{Z_{12}}$$

(14)

$$Y_{22} = - \left(\frac{\hat{\Phi}_e}{\hat{\theta}_e} \right)_{\theta_i=0} = - \frac{Z_{22}}{Z_{12}}$$

(15)

Si noti che per valutare l'ammittenza esterna, si è preferito cambiare il segno; è preferibile valutare lo sfasamento rispetto alla potenza $-\Phi_e = \Phi_e$ entrante nella parete (mentre per come è stato ricavato il sistema Φ è positivo se dall'ambiente va verso l'esterno). E' evidente che avere basse ammettenze significa avere, a parità di flussi termici, surriscaldamenti/raffreddamenti elevati.

Infine altri due parametri significativi sono le capacità termiche dinamiche intese come l'inverso della parte immaginaria dell'inverso delle ammettenze, diviso per la frequenza angolare:

$$\kappa_1 = \frac{T}{2 \pi} \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right|$$

(16)

$$\kappa_2 = \frac{T}{2 \pi} \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right|$$

(17)

Tali capacità sono valutate in modulo.

Nella rappresentazione vettoriale, la prevalenza del termine relativo alla proiezione sull'asse y indica un aumento del ritardo con cui il fenomeno viene riprodotto. Su tale termine incide la capacità termica di una parete. Avere elevate capacità significa possedere maggiore capacità di immagazzinare calore a parità di salti termici.

In definitiva, al fine di verificare il ritardo dell'onda termica imposto da una sollecitazione esterna, si dovrà valutare la variazione di tempo (argomento) del fattore Z_{11} .

Si noti che in generale un aumento degli spessori della parete comporta un aumento del ritardo temporale con cui i picchi delle oscillazioni si verificano, mentre un aumento delle capacità termiche areiche comporta un aumento del fattore di decremento, ovvero una riduzione in ampiezza delle oscillazioni periodiche.

3. REPORT DEI RISULTATI

Il comportamento delle strutture edili in regime transitorio è preso in considerazione dalla legislazione e normativa internazionale. La norma di riferimento a livello nazionale è la **UNI EN ISO 13786** e viene applicata per determinare alcuni parametri utilizzati nei calcoli del fabbisogno energetico

degli edifici per il riscaldamento (il fattore di utilizzo η degli apporti gratuiti dipende dalle capacità areiche delle strutture) e per la valutazione dell'attitudine dell'involucro a smorzare e ritardare le sollecitazioni termiche esterne estive.

L'analisi è eseguita in regime periodico stabilizzato e si arriva alla definizione di una matrice di trasferimento tra i due ambienti denominati 1 (interno) e 2 (esterno) che delimitano la parete.

$$\begin{pmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix}$$

(18)

Gli elementi della matrice sono numeri complessi Z_{mn} costituiti da un modulo $|Z_{mn}|$ e da un argomento $\varphi_{mn} = \arg(Z_{mn})$ che indicherà lo sfasamento temporale tra l'effetto e la causa.

Z_{11} indica quanto viene amplificata l'escursione di temperatura sull'ambiente 2 a causa di una variazione periodica unitaria di temperatura sulla faccia 1;

Z_{12} indica la variazione di temperatura indotta sull'ambiente 2 a causa di una variazione periodica unitaria di flusso termico specifico nell'ambiente 1;

Z_{21} indica la variazione di flusso termico specifico nell'ambiente 2 a causa di una variazione periodica unitaria di temperatura nell'ambiente 1;

Z_{22} indica la variazione di flusso termico specifico nell'ambiente 2 a causa di una variazione periodica unitaria di flusso termico specifico nell'ambiente 2;

Utilizzando gli elementi della matrice di trasferimento è possibile determinare alcuni parametri.

La **trasmittanza termica periodica** Y_{12} è definita come il rapporto tra la variazione di flusso termico in entrata in un ambiente mantenuto a temperatura costante e la variazione di temperatura sull'altro ambiente:

$$Y_{12} = \left. \frac{\hat{\Phi}_1}{\hat{\theta}_2} \right|_{\hat{\theta}_1=0} = -\frac{1}{Z_{12}}$$

(19)

Oltre all'entità dello smorzamento, è importante vedere dopo quanto tempo (rispetto al massimo della temperatura) si verifica il massimo del flusso termico:

$$\Delta t_{12} = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{12})$$

(20)

dove l'argomento è valutato tra -2π e 0 (ossia viene dato l'intervallo di tempo che deve passare dal massimo della variazione di temperatura al massimo della variazione di flusso termico); T è il periodo di variazione sinusoidale.

Le **ammettenze termiche** Y_{11} e Y_{22} rappresentano il rapporto tra la variazione di flusso termico in un ambiente e la variazione di temperatura sul medesimo ambiente. Nel caso in cui la parete sia una parete esterna tale rapporto è valutato con le condizioni al contorno $\hat{\theta}_2 = 0$ e $\hat{\theta}_1 = 0$ (relazioni [14] e [15]).

Nel caso invece che la parete sia una parete interna si utilizzerà la condizione al contorno simmetrica $\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_2$:

$$Y_{11} = \left. \left(\frac{\hat{\Phi}_1}{\hat{\theta}_1} \right) \right|_{\hat{\theta}_1=\hat{\theta}_2} = \frac{1-Z_{11}}{Z_{12}}$$

(21)

$$Y_{22} = \left. \left(\frac{\hat{\Phi}_2}{\hat{\theta}_2} \right) \right|_{\hat{\theta}_1=\hat{\theta}_2} = \frac{1-Z_{22}}{Z_{12}}$$

(22)

Anche per le ammettenze è possibile valutare lo sfasamento temporale tra flusso termico e variazione di temperatura

$$\Delta t_{mm} = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{mm})$$

(23)

In questo caso, l'argomento è valutato tra 0 e 2π (ossia viene dato l'intervallo di tempo che deve trascorrere dal massimo della variazione di flusso termico al massimo della variazione di temperatura)

Utilizzando le ammettenze termiche Y_{11} e Y_{22} si possono anche definire le capacità termiche areiche:

$$\chi_1 = \frac{|Y_{11}|}{\omega}$$

(24)

$$\chi_2 = \frac{|Y_{22}|}{\omega}$$

(25)

E' evidente che elevati valori delle capacità termiche areiche significa avere elevata capacità di immagazzinare calore (il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti η aumenta al crescere delle capacità termiche areiche). Più semplicemente, in regime invernale per poter sfruttare in modo razionale i carichi termici solari occorre disporre di pareti con elevate capacità areiche χ_1 .

In estate dove si verificano delle elevate variazioni di temperatura esterna (sole-aria) è necessario che le pareti siano in grado di ridurre e ritardare sensibilmente i picchi di temperatura sulla superficie interna della parete in modo da attenuare il flusso termico ceduto all'interno. In particolare perché il processo sia efficiente è necessario che lo sfasamento sia tale da portare i picchi di temperatura sulla superficie interna durante le ore serali, quando la temperatura esterna dell'aria è più bassa ed è quindi possibile raffreddare attraverso la ventilazione.

Anche la massa termica esposta verso lo spazio interno (capacità areica χ_1) ha un'efficacia notevole sulla riduzione dei picchi dei carichi di raffrescamento

estivo dovuti agli apporti gratuiti favorendo lo smorzamento della temperatura interna grazie alla capacità di accumulo.

*In pratica bassi valori del fattore di decremento f congiuntamente a alti valori della **capacità termica areica interna** e alti valori nello sfasamento della trasmittanza termica periodica denotano migliori caratteristiche delle pareti nell'attenuazione degli effetti delle sollecitazioni termiche esterne estive.*

4. LE STRUTTURE

4.1 LE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO

Pannello METECNO superwall HF S120

Descrizione delle proprietà termiche dei materiali

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Acciaio zincato	0.001	52	7800	550	0.00002
Isolante	0.120	0.043	100	840	2.791
Acciaio zincato	0.001	52	7800	550	0.00002
Superficie esterna					0.04

Elementi della matrice di trasferimento

Matrice di trasferimento		Modulo	Variazione di tempo [h]
Z_{11}	0.48502 +1.8965i	1.958	5.044
Z_{21}	1.1416 -1.1308i	1.6069 W/(m ² K)	2.982
Z_{12}	-2.7778 -1.2674i	3.053 m ² K/W	10.365
Z_{22}	0.38227 +1.9983i	2.035	5.278

Caratteristiche della matrice termica dinamica in accordo con la norma

Ammettenze termiche		Modulo W/(m ² K)	Variazione di tempo [h]
Lato interno	-0.40235 -0.49917i	0.641	8.591
Lato esterno	-0.3857 -0.5435i	0.666	8.357
Capacità termiche areiche			
Lato interno		11.37 kJ/(m ² K)	
Lato esterno		11.37 kJ/(m ² K)	
Trasmittanza termica		0.338 W/(m ² K)	
Trasmittanza termica dinamica		0.328 W/(m ² K)	10.365
Massa frontale		Ms = 27.60 kg/m ²	
Fattore di decremento			
Fattore di decremento		0.9697	10.365

Pannello calcestruzzo

Descrizione delle proprietà termiche dei materiali

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Calcestruzzo	0.10	1.8	2400	1000	0.056
Superficie esterna					0.04

Elementi della matrice di trasferimento

Matrice di trasferimento		Modulo	Variazione di tempo [h]
Z_{11}	0.84815 +1.1762i	1.450	3.614
Z_{21}	2.8174 -17.317i	17.544W/(m ² K)	5.384
Z_{12}	-0.20381 -0.18122i	2.727 m ² K/W	9.224
Z_{22}	0.59459 +2.7347i	2.799	5.182

Caratteristiche della matrice termica dinamica in accordo con la norma

Ammettenze termiche		Modulo	Variazione di tempo [h]
Lato interno	-5.1898 -1.1566i	5.317 W/(m ² K)	11.162
Lato esterno	-8.2920 -6.0449i	10.262 W/(m ² K)	9.594
Capacità termiche areiche			
Lato interno		882.13 kJ/(m ² K)	
Lato esterno		882.13 kJ/(m ² K)	
Trasmittanza termica		U = 4.434W/(m ² K)	
Trasmittanza termica dinamica		3.667 W/(m ² K)	9.224
Massa frontale		$M_s = 240 \text{ kg/m}^2$	
Fattore di decremento		0.827	9.224

Parete in acciaio -isolante- calcestruzzo

Descrizione delle proprietà termiche dei materiali

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Acciaio zincato	0.001	52	7800	550	0.00002
Isolante	0.120	0.043	100	840	2.791
Calcestruzzo	0.100	1.8	2400	1000	0.056
Superficie esterna					0.04

Elementi della matrice di trasferimento

Matrice di trasferimento		Modulo	Variazione di tempo [h]
Z_{11}	-1.8075 +2.2687i	2.901	8.570
Z_{21}	34.562 -4.6288i	34.870 W/(m ² K)	0.509
Z_{12}	-0.9846 -4.3841i	4.493 m ² K/W	6.844
Z_{22}	-28.172 +45.948i	53.897	8.101

Caratteristiche della matrice termica dinamica in accordo con la norma

Ammettenze termiche		Modulo	Variazione di tempo [h]
Lato interno	-0.4045 -0.50313i	0.646 W/(m ² K)	8.587
Lato esterno	-8.6035 -8.3582i	11.995 W/(m ² K)	9.055
Capacità termiche areiche			
Lato interno		11.344 kJ/(m ² K)	
Lato esterno		236.55 kJ/(m ² K)	
Trasmittanza termica		U = 0.332 W/(m ² K)	
Trasmittanza termica dinamica		0.223 W/(m ² K)	6.844
Massa frontale		M _s = 259.80 kg/m ²	
Fattore di decremento		0.671	6.844

Parete in calcestruzzo-isolante-acciaio

Proprietà termiche dei materiali

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Calcestruzzo	0.100	1.8	2400	1000	0.056
Isolante	0.120	0.043	100	840	2.791
Acciaio zincato	0.001	52	7800	550	0.00002
Superficie esterna					0.04

Elementi della matrice di trasferimento

Matrice di trasferimento	Modulo	Variazione di tempo [h]
Z_{11}	-25.061 +45.531i	51.973
Z_{21}	34.562 -4.6288i	34.870 W/(m ² K)
Z_{12}	1.1082 -8.2777i	8.352 m ² K/W
Z_{22}	-4.9180 +2.6853i	5.603

Caratteristiche della matrice termica dinamica in accordo con la norma

Ammettenze termiche	Modulo	Variazione di tempo [h]
Lato interno	-5.8018 -2.2508i	6.223 W/(m ² K)
Lato esterno	-0.3968 -0.5410i	0.671 W/(m ² K)
Capacità termiche areiche		
Lato interno	236.55 kJ/(m ² K)	
Lato esterno	11.344 kJ/(m ² K)	
Trasmittanza termica	U = 0.332 W/(m ² K)	
Trasmittanza termica dinamica	0.120 W/(m ² K)	5.492
Massa frontale	$M_s = 259.80$ kg/m ²	
Fattore di decremento	0.361	5.492

Parete in calcestruzzo-isolante-acciaio

Descrizione delle proprietà termiche dei materiali

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Calcestruzzo	0.150	1.8	2400	1000	0.083
Isolante	0.180	0.043	100	840	4.186
Acciaio zincato	0.001	52	7800	550	0.00002
Superficie esterna					0.04

Elementi della matrice di trasferimento

Matrice di trasferimento		Modulo	Variazione di tempo [h]
Z_{11}	116.65 + 56.928i	129.8	10.266
Z_{21}	75.745 + 52.883i	92.379 W/(m ² K)	2.3281
Z_{12}	15.992 - 13.874i	21.172 m ² K/W	2.7296
Z_{22}	-14.167 - 5.1551i	15.076	10.667

Caratteristiche della matrice termica dinamica in accordo con la norma

Ammettenze termiche		Modulo	Variazione di tempo [h]
Lato interno	5.9237 + 1.5794i	6.131 W/(m ² K)	0.995
Lato esterno	0.34589 + 0.62243i	0.712 W/(m ² K)	4.063
Capacità termiche areiche			
Lato interno		327.21 kJ/(m ² K)	
Lato esterno		11.202 kJ/(m ² K)	
Trasmittanza termica		$U = 0.225$ W/(m ² K)	
Trasmittanza termica dinamica		0.0472 W/(m ² K)	9.27
Massa frontale		$M_s = 385.80$ kg/m ²	
Fattore di decremento		0.21	9.27

Parete in calcestruzzo-isolante (lana minerale: s = 0,12 m)

Descrizione delle proprietà termiche dei materiali

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Calcestruzzo	0.2	1.8	2400	2400	0.111
Lana minerale	0.12	0.04	155	1030	3.000
Acciaio	0.001	52	7800	550	1.92E-05
Superficie esterna					0.04

Elementi della matrice di trasferimento

Matrice di trasferimento	Modulo	Variazione di tempo [h]
Z_{11}	-126.186 + 31.304i	130.010
Z_{21}	80.239 + 75.208i	109.98 W/(m ² K)
Z_{12}	19.571 - 9.842i	21.91 m ² K/W
Z_{22}	-15.994 - 9.374i	18.54

Caratteristiche della matrice termica dinamica in accordo con la norma

Ammettenze termiche	Modulo	Variazione di tempo [h]
Lato interno	5.7881 - 1.31146i	5.935 W/(m ² K)
Lato esterno	0.45999 - 0.71029i	0.846 W/(m ² K)
Capacità termiche areiche		
Lato interno		82.09 kJ/(m ² K)
Lato esterno		11.72 kJ/(m ² K)
Trasmittanza termica		$U = 0.305$ W/(m ² K)
Trasmittanza termica dinamica		0.046 W/(m ² K) 10.22
Massa frontale		$M_s = 507.7$ kg/m ²
Fattore di decremento		0.150

4.2 PARETI IN LEGNO

Parete 1: Parete isolata ($M_s = 97,04 \text{ kg/m}^2$)

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Pannello in cartongesso	0.01	0.36	1150	1100	
Pannello multistrato in legno	0.095	0.13	500	1600	
Fibra di legno	0.1	0.055	200	2500	
Intercapedine d'aria	0.03		1.2		0.18
Rivestimento in legno	0.03	0.11	600	2500	
Superficie esterna					0.04

Report		Modulus	time [h]
	internal thermal admittance	2.573	21.51
	external thermal admittance	2.965	8.45
	periodic thermal transmittance	0.061	-13.55
	internal areal heat capacity	35800.524	
	external areal heat capacity	40974.844	
	thermal transmittance	0.3126	
	decrement factor	0.196	

Parete 2: Parete con 3 strati di isolamento ($M_s = 106,84 \text{ kg/m}^2$)

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Pannello in cartongesso	0.012	0.21	900	1050	
Listelli di abete rosso	0.05	0.11	400	2500	
Pannello lana di roccia	0.05	0.04	28	1030	
Pannello multistrato in legno	0.095	0.13	500	1600	
Pannello lana	0.08	0.04	70	1030	

di roccia					
Pannello lana di roccia	0.05	0.04	70	1030	
Intercapedine d'aria	0.03		1.2		0.18
Rivestimento in legno	0.03	0.11	600	2500	
Superficie esterna					0.04

Report	internal thermal admittance	Modulus	time [h]
	external thermal admittance	2.530	2.74
	periodic thermal transmittance	2.941	4.11
	internal areal heat capacity	0.011	-15.79
	external areal heat capacity	34771.30	
	thermal transmittance	40366.70	
	decrement factor	0.1571	
		0.068	

Parete 3: parete senza intercapedine ($M_s = 66.32 \text{ kg/m}^2$)

Strato	Spessore [m]	Conduttività λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c_p [J/(kg K)]	Resistenza termica R [m ² K/W]
Superficie interna					0.13
Pannello in cartongesso	0.012	0.21	900	1050	
Pannello in OSB	0.018	0.13	680	1700	
Pannello lana di roccia	0.16	0.04	33	1030	
Pannello in fibra di legno	0.04	0.055	200	2500	
Intonaco calce e cemento	0.015	1	2000	1130	
Superficie esterna					0.04

Report	internal thermal admittance	Modulus	time [h]
	external thermal admittance	2.125	19.97
	periodic thermal transmittance	2.558	6.80
	internal areal heat capacity	0.194	3.47
	external areal heat capacity	30332.37	
		36946.54	

thermal transmittance 0.1958
decrement factor 0.989

4.3 Tetti in legno

Tetto 1: $U_{\text{copertura}} = 0,852 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}); M_s = 57,6 \text{ kg}/\text{m}^2$
 $Y_{12} = 0,732 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}); \text{time shift} = 3,76 \text{ [h]}$

descrizione (dall'interno)

	s	λ	ρ	c
tavolato	0,025	0,13	500	1600
guaina	0,0015	0,1	680	1700
eraclit PV 35	0,05	0,078	360	1550
guaina	0,0015	0,1	680	1700
intercapedine aria	0,05	-	1,2	1005
coppi	0,02	2	1250	2700

		Modulus	time [h]
Report	internal thermal admittance	1,917	21,10
	external thermal admittance	5,307	7,64
	periodic thermal transmittance	0,732	3,76
	internal areal heat capacity	29796,13	
	external areal heat capacity	78738,82	
	thermal transmittance	0,852	
	decrement factor	0,859	

Tetto 2: $U_{\text{copertura}} = 0,309 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}); M_s = 80,6 \text{ kg}/\text{m}^2$
 $Y_{12} = 0,124 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}); \text{time shift} = 8,45 \text{ [h]}$

descrizione (dall'interno)

	s	λ	ρ	c
eraclit PV 50	0,05	0,077	360	1550
guaina	0,0015	0,1	680	1700
Hibian	0,05	0,033	80	1600
Eraclit PV35	0,035	0,078	370	1550
guaina	0,0015	0,1	680	1700
Intercapedine d'aria	0,05	0,026	1,2	1005
tavolato	0,035	0,13	500	1600
guaina	0,0015	0,1	680	1700
coppi	0,02	2	1250	2700

		Modulus	time [h]
Report	internal thermal admittance	1,618	3,19
	external thermal admittance	6,508	4,26
	periodic thermal transmittance	0,124	-8,45

internal areal heat capacity	23954,92
external areal heat capacity	91172,80
thermal transmittance	0,3089
decrement factor	0,402

Tetto 3: $U_{\text{copertura}} = 0,291 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $M_s = 86,1 \text{ kg}/\text{m}^2$

$Y_{12} = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; time shift = 9,31 [h]

descrizione (dall'interno)	s	λ	ρ	c
eraclit PV 50	0,05	0,077	360	1550
guaina	0,0015	0,1	680	1700
Hibian	0,05	0,033	80	1600
Eraclit PV35	0,05	0,077	370	1550
guaina	0,0015	0,1	680	1700
Intercapedine d'aria	0,05	0,026	1,2	1005
tavolato	0,035	0,13	500	1600
guaina	0,0015	0,1	680	1700
coppi	0,02	2	1250	2700

Report		Modulus	time [h]
internal thermal admittance		1,605	3,16
external thermal admittance		6,478	4,20
periodic thermal transmittance		0,107	-9,31
internal areal heat capacity		23539,81	
external areal heat capacity		90437,77	
thermal transmittance		0,2909	
decrement factor		0,369	

Tetto 4: $U_{\text{copertura}} = 0,216 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $M_s = 80,3 \text{ kg}/\text{m}^2$

$Y_{12} = 0,126 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; time shift = 7,9 [h]

descrizione (dall'interno)	s	λ	ρ	c
cartongesso	0,025	0,21	900	1050
intercapedine d'aria	0,03	0,026	1,2	1005
tavole	0,024	0,11	50	400
guaina	0,0015	0,1	680	1700
hibian	0,05	0,033	80	1600
pannello legno	0,022	0,045	250	2100
Intercapedine d'aria	0,05	0,026	1,2	1005
listelli abete	0,03	0,11	400	2500
tegole	0,015	0,9	2000	840

Report		Modulus	time [h]
internal thermal admittance		1,876	4,26
external thermal admittance		3,902	4,22
periodic thermal transmittance		0,126	-7,87
internal areal heat capacity		27527,99	
external areal heat capacity		55380,42	

thermal transmittance	0,2164
decrement factor	0,582

Ma con $s = 0,15$ m di hiban, per la stessa stratificazione del tetto risulta ($M_s = 84,3$ kg/m²):

Report		Modulus	time [h]
internal thermal admittance		1,890	4,24
external thermal admittance		3,895	4,21
periodic thermal transmittance		0,071	-10,13
internal areal heat capacity		26793,83	
external areal heat capacity		54361,78	
thermal transmittance		0,1630	
decrement factor		0,434	

Si può ipotizzare che per ottenere valori interessanti ai fini del contenimento del surriscaldamento estivo si debba optare per strutture aventi le seguenti caratteristiche:

trasmissione termica:	$\leq 0,3$ W/(m ² K)
trasmissione termica dinamica:	$\leq 0,1$ W/(m ² K)
time shift:	$\geq 8 \div 9$ h
capacità termica areica:	≥ 25 kJ/ (m ² K)
fattore di decremento:	$\leq 0,2 \div 0,3$

Bibliografia

- [1] M. Pipes, *Matrix analysis of heat transfer problems*, J. of Franklin Inst., Vol. 263, pp. 195 – 206, 1957
- [2] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Oxford at the Clarendon Press, IInd Ed., 1959
- [3] Milbank N.O., Harrington-Lynn J., *Thermal response and the admittance procedure*, BRE, Department of Environment, Current Paper CP 61/74, Vol. 42, June 1974
- [4] L. Agnoletto, P. Brunello, N. Torbol, R. Zecchin, *Metodo semplificato per la valutazione del comportamento termico degli edifici in regime periodico stabilizzato*, Risparmio di energia nel riscaldamento degli edifici, n°3, C.N.R. – PEG, 1980
- [5] L. De Santoli, *Fisica Tecnica Ambientale*, Vol. 2, CEA, Milano
- [6] UNI EN ISO 13786 *Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation method* (2008)
- [7] UNI EN ISO 6946 *Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method* (2008)
- [8] Davies M. G., *Building Heat Transfer*, John Wiley & Sons Ltd, 2004

Scarica a questo link un foglio excel per calcolare tutte le proprietà termiche secondo la UNI EN ISO 13786: <http://bit.ly/UNI13786>

N.B.: Copiati questo link se non riesci a seguire il link qui sopra

<http://bit.ly/UNI13786>

Fonte:

http://www.enea.it/attivita_ricerca/energia/sistema_elettrico/Condizionamento/Allegati_RSE08/report_ENEA_C_struttureleggere.doc