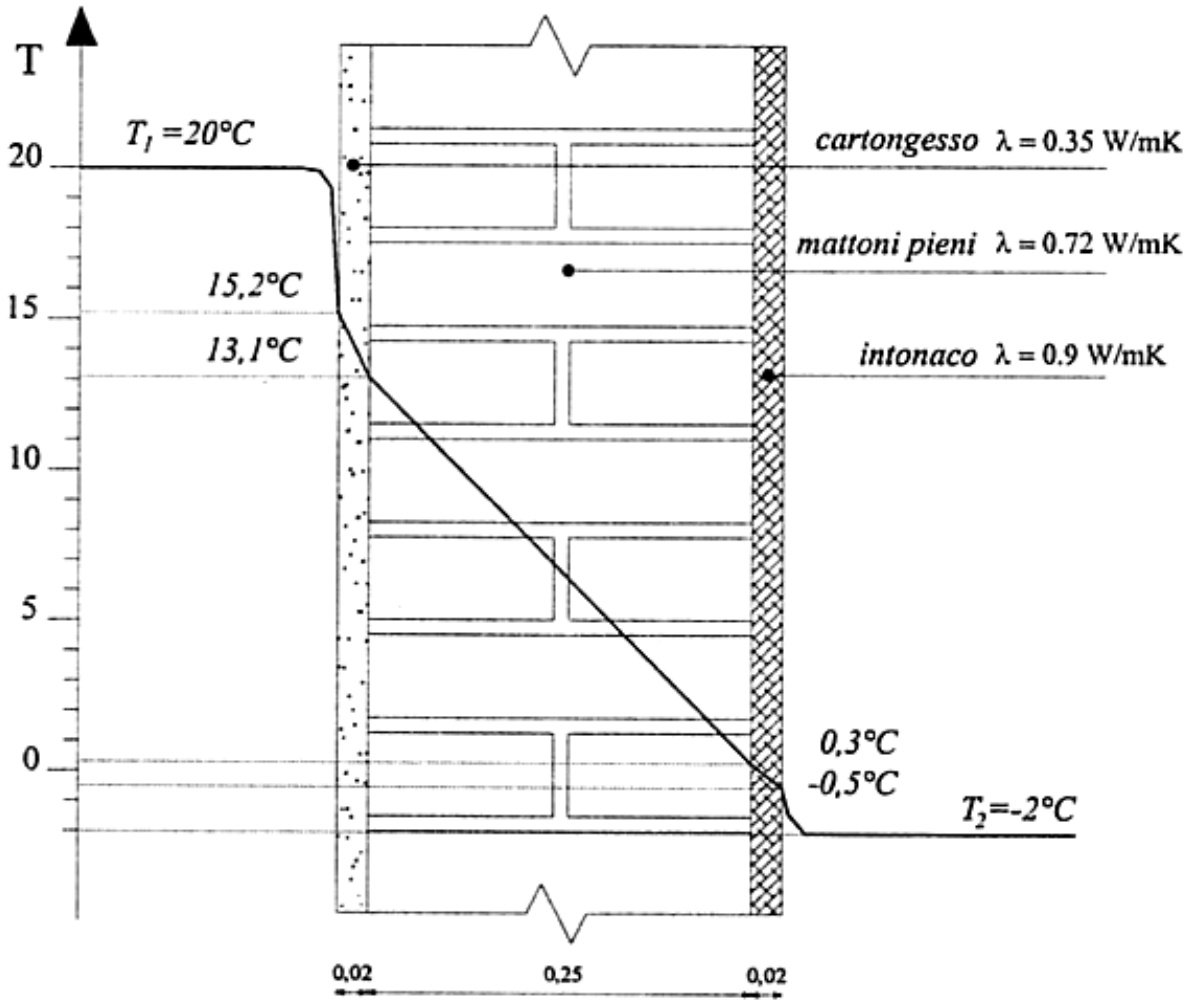
Parete opaca non soleggiata che separa due ambienti a temperature diverse

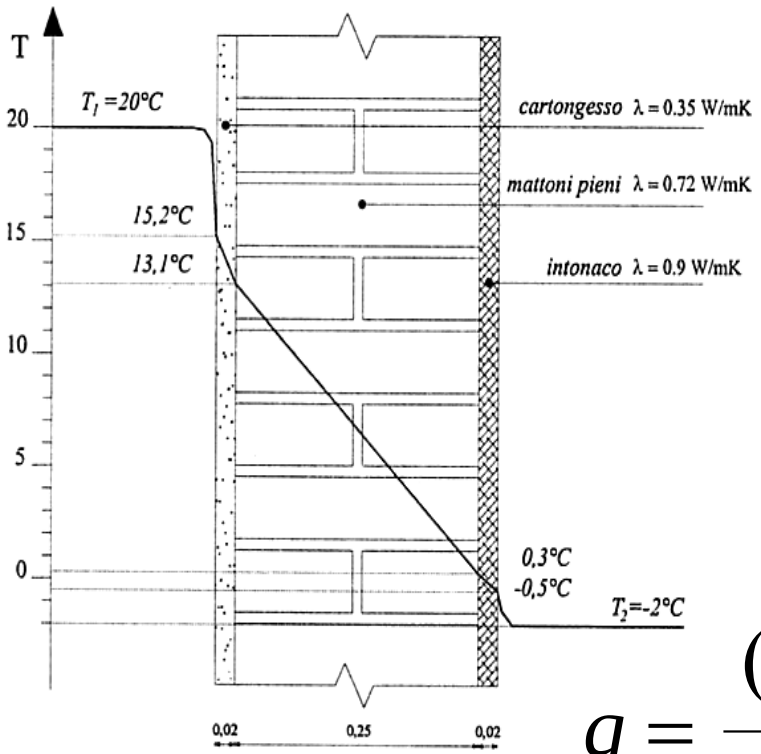
K_i= 10 W/m²K

K_e= 20 W/m²K



Stagione invernale: andamento quantitativo della temperatura attraverso una parete perimetrale in mattoni pieni con rivestimento in cartongesso

Parete opaca non soleggiata che separa due ambienti a temperature diverse



$$R_i = \frac{1}{10} = 0{,}1$$

$$R_e = \frac{1}{20} = 0{,}05$$

$$R_p = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} = 0{,}42$$

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{tot}} = \frac{22}{0{,}57} = 38{,}5\ [\ W/m^2\ ]$$

Stagione invernale: andamento quantitativo della temperatura attraverso una parete perimetrale in mattoni pieni con rivestimento in cartongesso

CALCOLO CARICO TERMICO INVERNALE

Attualmente come previsto dalla normativa italiana di riferimento per la determinazione del carico termico invernale, si distinguono:

CARICHI TERMICI PER TRASMISSIONE

Rappresentano la quota di potenza termica (calore scambiato nell'unità di tempo) che viene persa dal fluido aria all'interno della zona attraverso le strutture edilizie. Lo scambio termico si innesca per differenza di temperatura ed entrano in gioco fenomeni combinati di conduzione, convezione e irraggiamento.

CARICHI TERMICI PER INFILTRAZIONE

Rappresentano la quota di potenza termica che viene persa dall'aria dello spazio riscaldato per la presenza di fenomeni di infiltrazione dell'aria esterna nell'ambiente (ventilazione naturale, dovuta alla non ermeticità delle chiusure finestrate e all'apertura manuale dei serramenti oppure ventilazione meccanica, dovuta ad un apposito impianto di estrazione-immissione).

CALCOLO CARICO TERMICO INVERNALE

Le perdite d'energia termica (Q_L), che un edificio subisce durante il periodo di riscaldamento, avvengono per trasmissione (Q_T) e per ventilazione (Q_V). Il totale delle perdite è quindi:

$$\mathbf{Q_L = Q_T + Q_V}$$

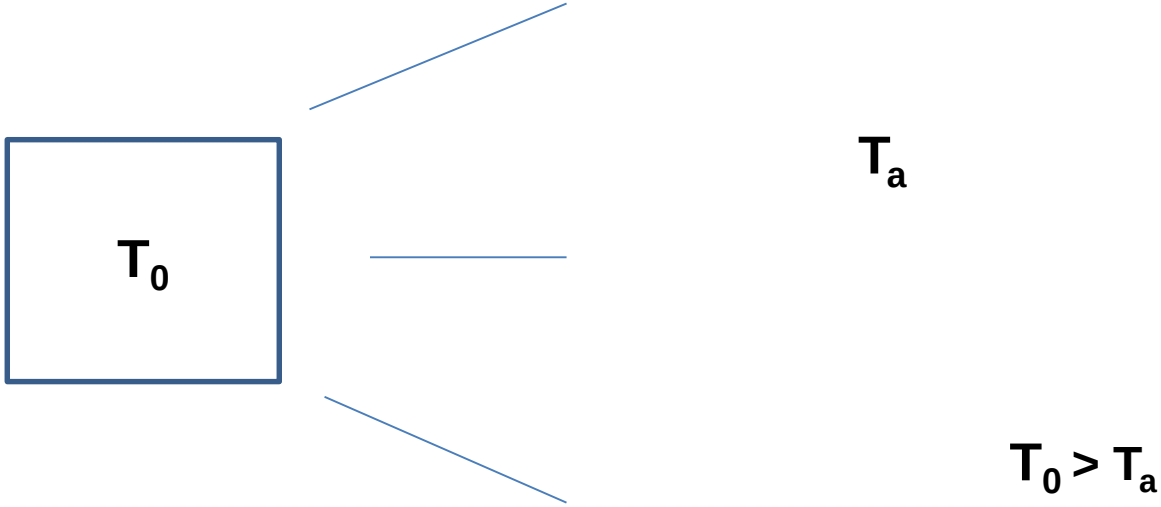
$$Q_T = HA(T_i - T_e)$$

Le perdite per ventilazione (Q_V) si calcolano tenendo conto del ricambio d'aria e delle infiltrazioni d'aria fredda.

$$Q_V = 0{,}5V/h * C_{p.a.}(T_i - T_e)$$

V = Volume edificio
$C_{p.a}$ = Calore specifico Aria

Raffreddamento naturale di un corpo caldo



Variazione nel tempo della temperatura di un corpo caldo a temperatura iniziale T_0 immerso in un ambiente a temperatura costante T_a

IPOTESI

- La temperatura T del corpo varia nel tempo, ma si mantiene uniforme in tutta la massa del corpo, ad ogni istante di tempo τ;

- La temperatura T_a dell'ambiente è uniforme e costante nel tempo (ipotesi di perfetto pozzo termico);

il corpo cede calore secondo la legge della calorimetria $Q = -m c_p dT$; allo stesso modo il corpo cede calore all'ambiente per adduzione $Q = K \cdot A (T - T_a)$

$\Rightarrow$ LEGGE DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA $\Rightarrow$

$KA(T - T_a) d\tau = -m c_p dT \Rightarrow$ separazione delle variabili $\Rightarrow \frac{dT}{T - T_a} = -\frac{m c_p}{KA} d\tau \Rightarrow$ integro $\Rightarrow$

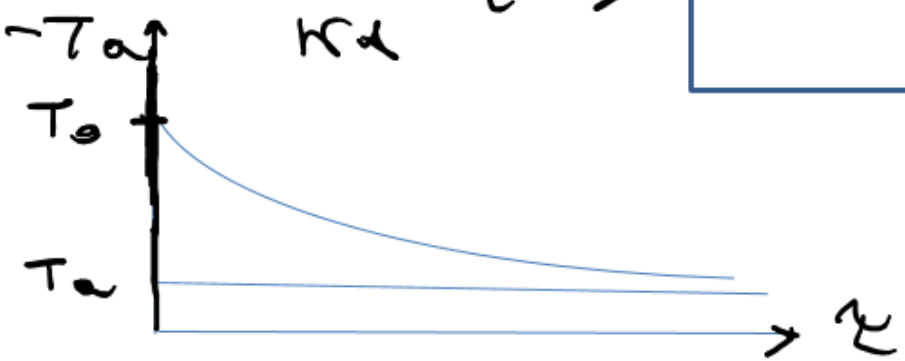
$\ln(T - T_a) = -\frac{m c_p}{KA} \cdot \tau + \text{cost.}$ impongo cdz al contorno

$\Rightarrow$ per $\tau = 0$ $T = T_0$

$$\text{cost} = \ln(T_0 - T_a)$$

$$\ln(T - T_a) = -\frac{mc_p}{KA}\tau + \ln(T_0 - T_a) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ln\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = -\frac{mc_p}{KA}\tau \Rightarrow \boxed{T = T_a - e^{-\frac{mc_p}{KA}\tau}(T_0 - T_a)}$$



Il calore scambiato per adduzione con l'ambiente è pari a:

$$dQ = kA\left(T - T_a\right) \cdot d\tau$$

Il calore ceduto dal corpo per la legge della calorimetria è pari a:

$$dQ = -M \cdot c \cdot dT$$

Uguagliando:

$$dQ = kA\left(T - T_a\right) \cdot d\tau = -M \cdot c \cdot dT$$

$$\frac{dT}{\left(T - T_a\right)} = -\frac{kA}{M \cdot c} \cdot d\tau$$

Integrando:

$$\ln\left(T - T_a\right) = -\frac{kA}{M \cdot c}\tau + K$$

Per $\tau = 0$ si ha $(T = T_0)$ e la costante di integrazione vale $K = \ln (T = T_0)$

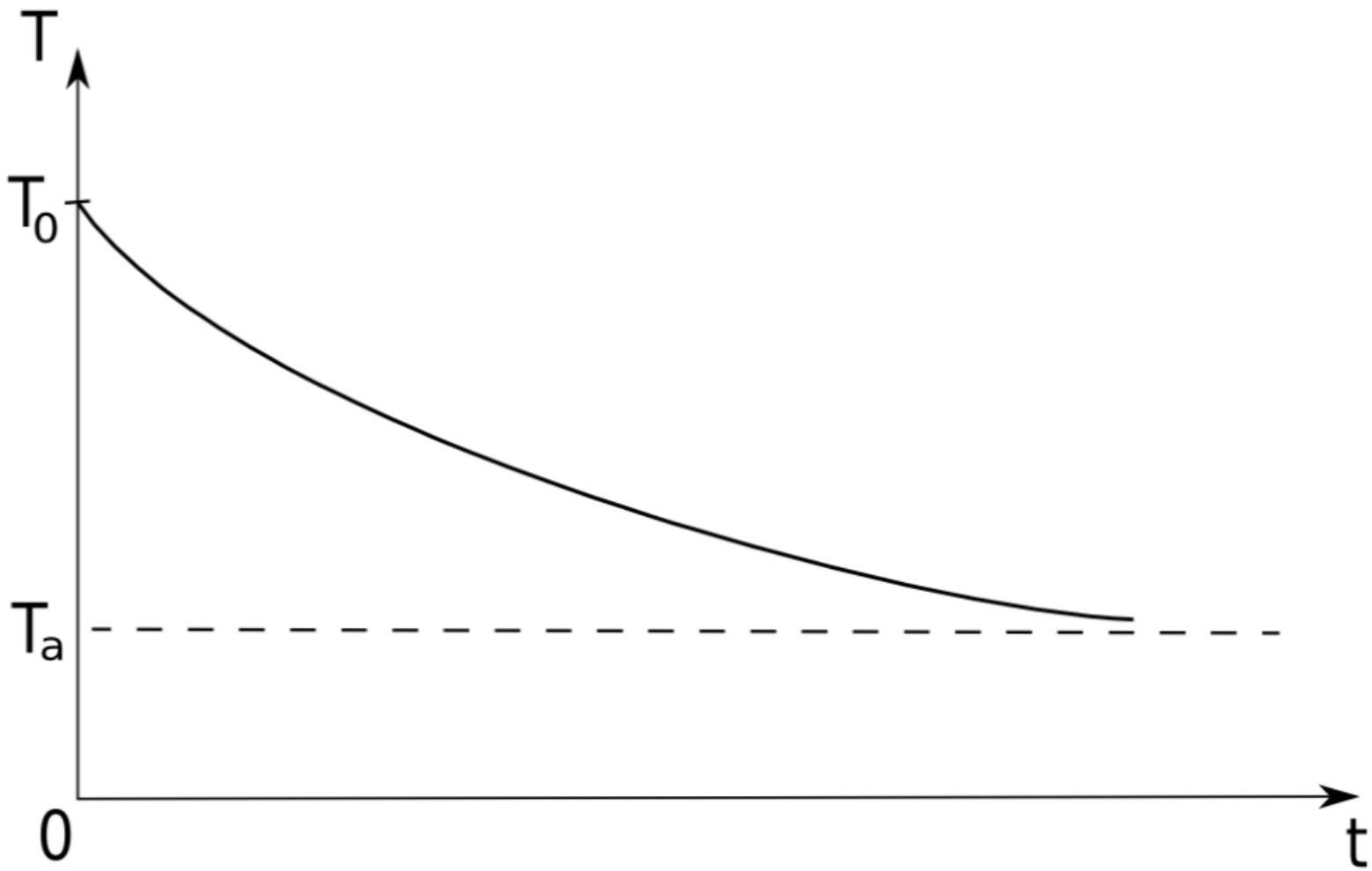
$$\ln\left(T - T_a\right) = -\frac{kA}{M \cdot c}\tau + \ln\left(T_0 - T_a\right)$$

Passando all'esponenziale e mettendo in evidenza la generica T:

$$T = T_a + \left(T_0 - T_a\right) e^{-\frac{kA}{Mc}\tau}$$

Il calore scambiato dal corpo con l'ambiente circostante dopo un istante infinitamente lungo vale:

$$Q = M \cdot c \cdot \left(T_0 - T_a\right)$$


T
T_0
T_a
0
t

Esercitazione di trasmissione del calore – applicazioni pratiche

Esercizio 1

Una delle pareti di un armadio frigorifero è costituita da uno strato di isolante cellulare (una schiuma di poliuretano avente conduttività termica $k_2 = 0{,}037\ kcal/h\ m°C$) di spessore $s_2 = 32\ mm$ racchiuso tra un lamierino di acciaio (spessore $s_1 = 0{,}3\ mm$, $k_1 = 63\ W/°C\ m$) e un foglio di resina sintetica ($s_3 = 2\ mm$, $k_3 = 0{,}19\ W/°C\ m$).

Calcolare la trasmittanza unitaria della parete, supponendo per i coefficienti di adduzione il valore $h_e = 9 W/m^2\ °C$ sulla faccia esterna e il valore $h_i = 6\ W/m^2\ °C$ sulla faccia interna.

Se la temperatura dell'aria dell'ambiente è $T_{ae} = 26°C$ e la temperatura dell'aria all'interno del frigorifero è $T_{ai} = 2°C$, calcolare il flusso termico specifico e la temperatura superficiale esterna T_1.

Soluzione Esercitazione di trasmissione del calore

Esercizio 1

Quanto all'isolante, conviene cominciare con l'esprimerne la conduttività termica nelle unità SI:

$$k_2 = 0{,}037\,\frac{kcal}{h\,m\,°C} = \frac{0{,}037\ x\ 4186}{3600} = 0{,}043\,\frac{W}{m\,°C}$$

Per la trasmittanza unitaria abbiamo:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum_j \frac{s_j}{k_j} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{\frac{1}{9} + \frac{0{,}3\ x\ 10^{-3}}{63} + \frac{32\ x\ 10^{-3}}{4{,}3\ x\ 10^{-2}} + \frac{2\ x\ 10^{-3}}{0{,}19} + \frac{1}{6}} = 0{,}9685\,\frac{W}{m^2\,°C}$$

Il flusso termico specifico è:

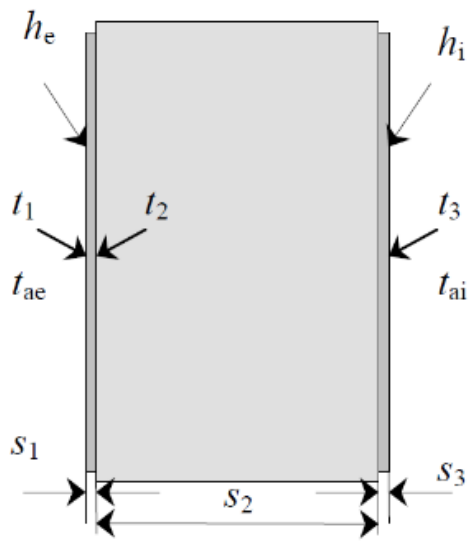
$$Q'' = K(T_{ae} - T_{ai}) = 0{,}9685\ x\ (26 - 2) = 23{,}4\,\frac{W}{m^2}$$

La temperatura superficiale esterna t1 può ricavarsi dalla relazione:

$$Q'' = h_e(T_{ae} - T_1)$$

Risolvendo, abbiamo:

$$T_1 = T_{ae} - \frac{Q''}{h_e} = 26 - \frac{23{,}24}{9} = 23{,}4\,°C$$



Trasmissione del calore:

(periodo estivo)

Regime stazionario:
condizioni microclimatiche costanti nel tempo

Regime transitorio:
condizioni microclimatiche variabili nel tempo:
- Variazioni cicliche

Il flusso termico Q all'interno è influenzato da:

- **Conducibilità termica interna λ**

- **Conducibilità termica interna λ**
- **Densità ρ**
- **Calore specifico γ**

Proprietà dell'involucro nel periodo estivo

La valutazione del comportamento energetico estivo, prevalente nei climi mediterranei, comporta maggiore complessità per due motivi fondamentali:

- la rilevante escursione termica → **T≠ costante**

- la considerevole variazione dell'**irraggiamento solare** nel corso della giornata

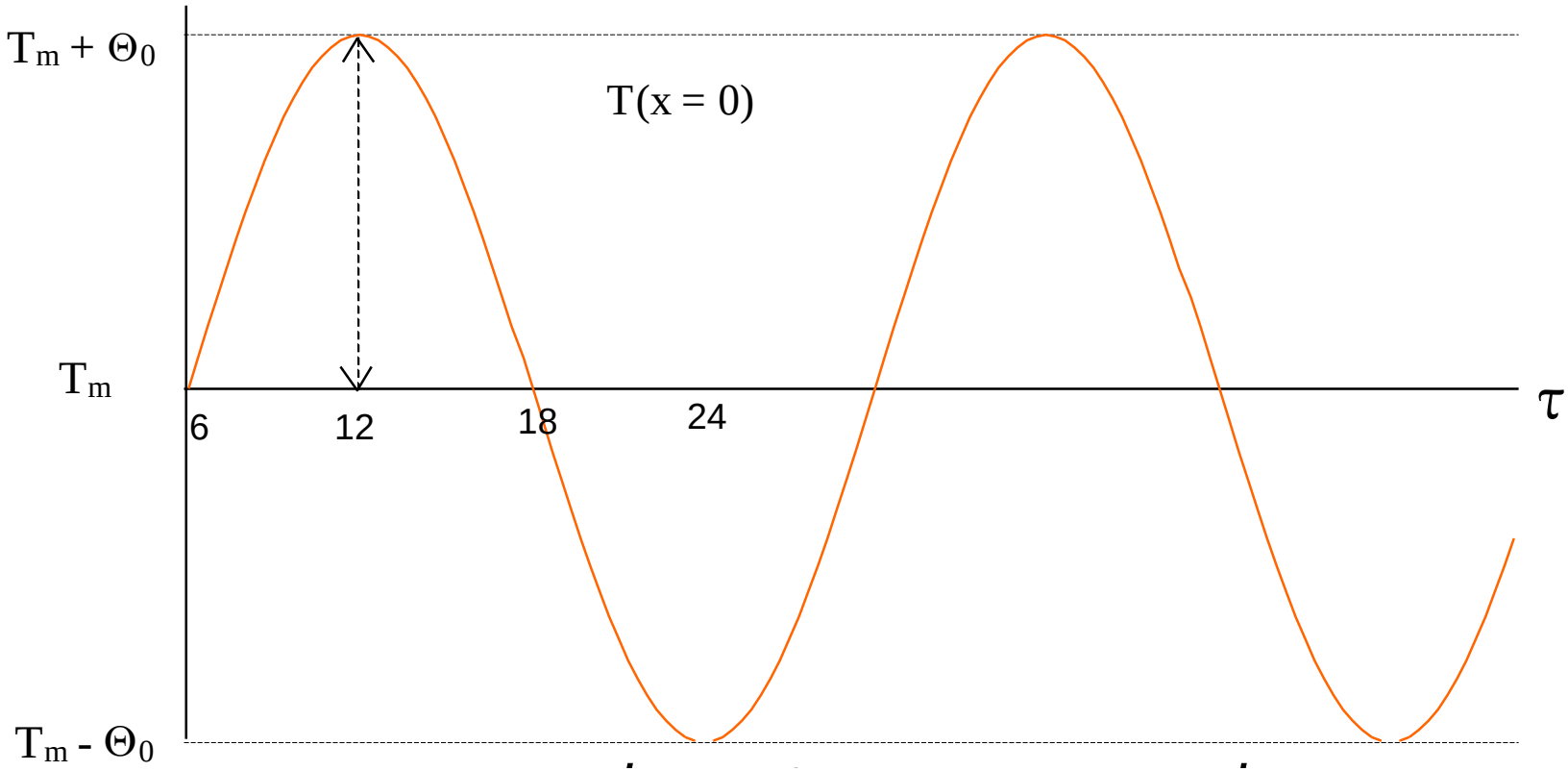
Pertanto i fenomeni in gioco risultano estremamente variabili nel tempo rispetto al periodo invernale e si richiede il riferimento a modelli di analisi in regime dinamico.

T≠ costante

Andamento della temperatura T in funzione del tempo τ

La temperatura estiva giornaliera si può rappresentare come una funzione sinusoidale al variare del tempo:

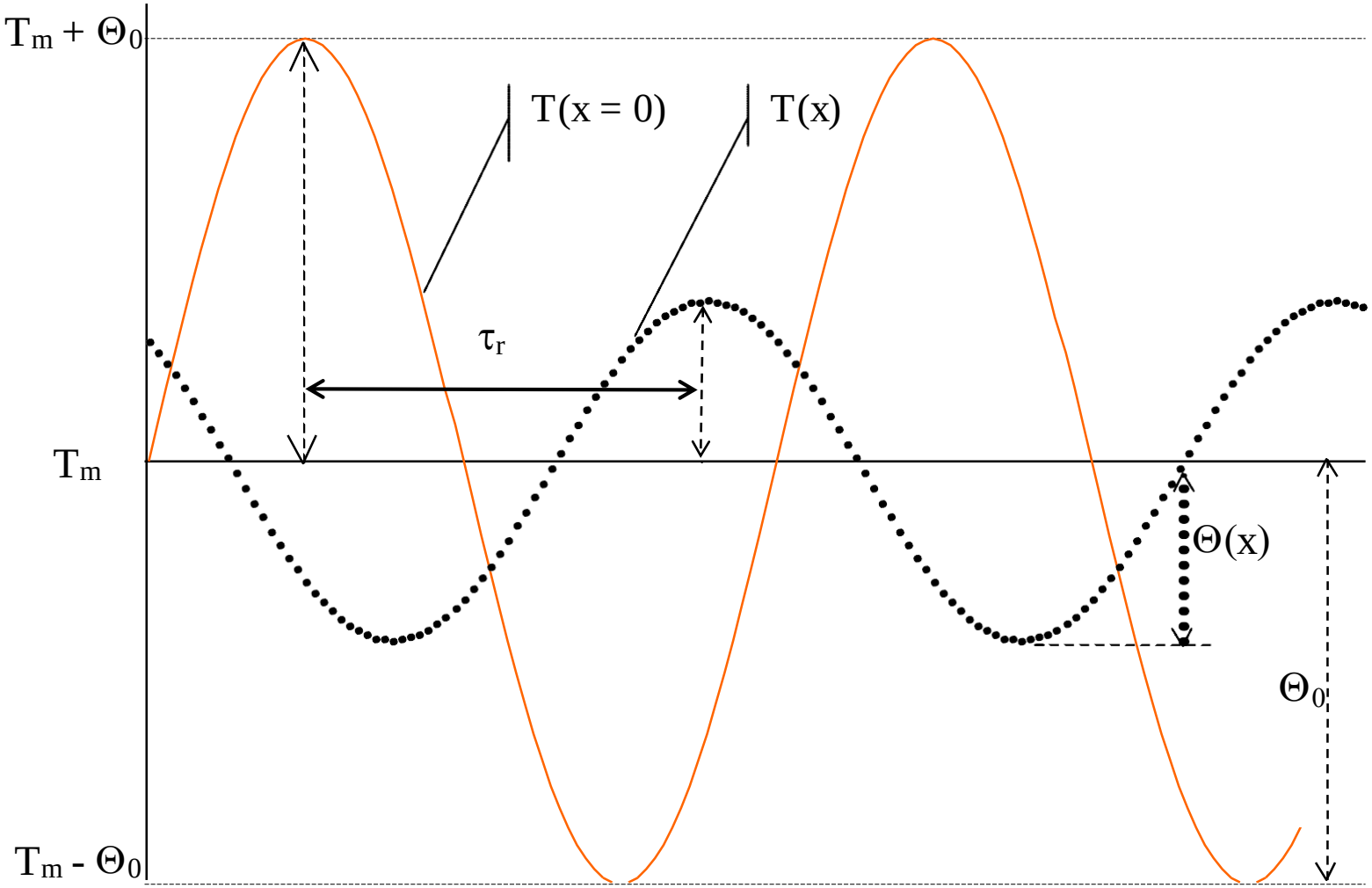
$$T(0,\tau) = Tm + \Theta_0 \, sen(\omega\tau)$$



andamento per x=0

x rappresenta la parete dell'involucro nel suo spessore

Muro di Fourier: andamenti temporali della temperatura



andamento per una generica x

andamento per x=0

Regime periodico stabilizzato

In regime periodico stabilizzato si ha:

$$T(x,\tau) = T_m + \Theta_0 e^{-\beta x} sen(\omega\tau - \beta x)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi}{D\tau_0}}$$

$$\Theta_x = \Theta_0 e^{-\beta x}$$

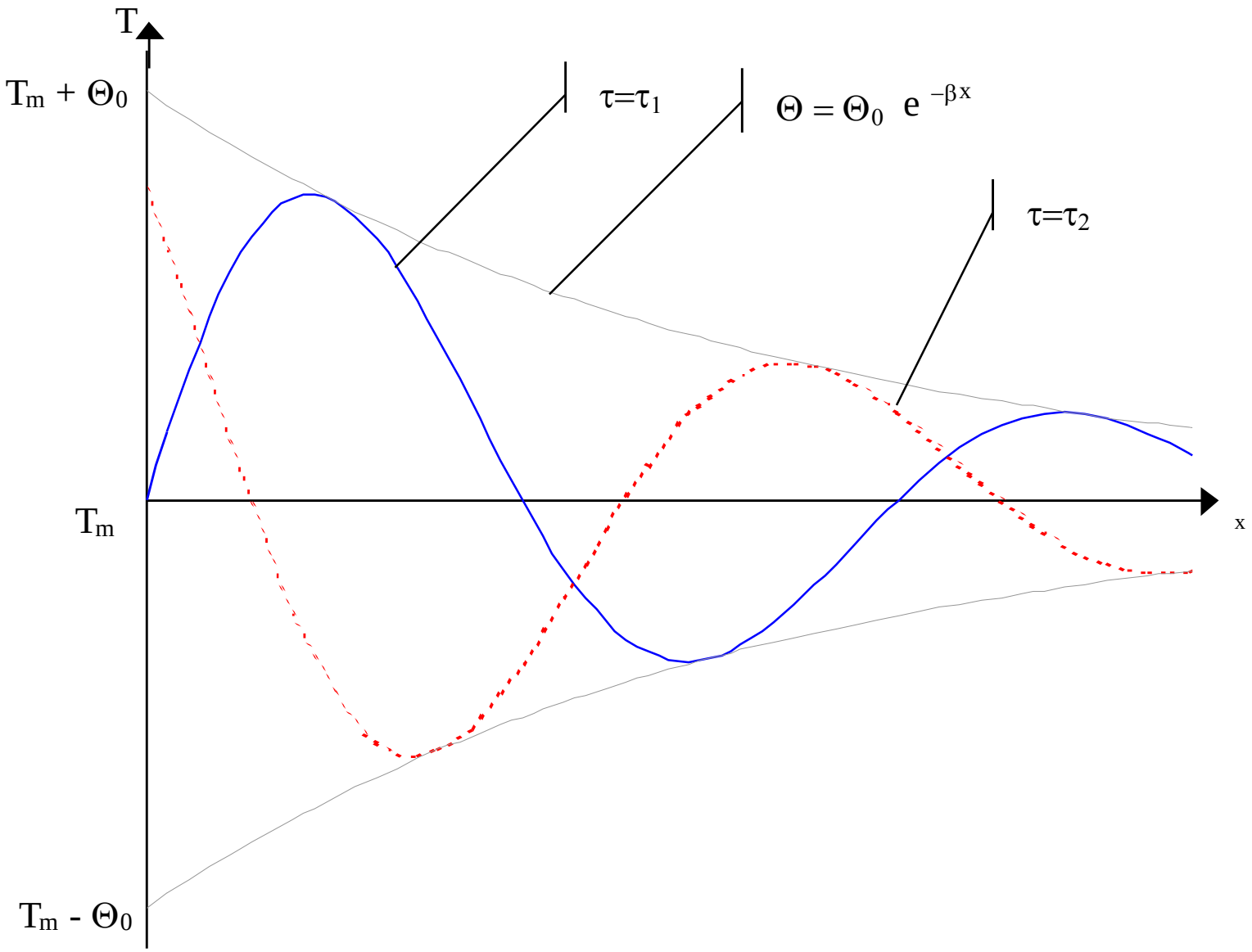
Ampiezza dell'oscillazione decresce nello spazio

$$T_r = \frac{\beta x}{\omega}$$

Il tempo di ritardo in cui si verificano i valori massimi all'ascissa x

D rappresenta la diffusività termica (m^2/s) ed è una proprietà specifica del materiale che caratterizza **la conduzione non stazionaria del calore**

Muro di Fourier: andamenti spaziali della temperatura in due diversi istanti τ_1 e τ_2



DIFFUSIVITA' TERMICA

La diffusività termica di un mezzo omogeneo, esprime la quantità di calore trasmessa attraverso un materiale rispetto a quello accumulato nello stesso. Materiali con bassa diffusività termica, come il calcestruzzo, presentano una trasmissione del calore lenta in relazione al calore accumulato.

$$D = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{m^2}{s}$$

La diffusività termica D [m^2/s] è un indice della rapidità con cui una variazione di temperatura sulla superficie del mezzo si propaga all'interno del mezzo.

Non compare nell'equazione in regime stazionario: la diffusività del materiale non condiziona la soluzione a regime ma solo il modo di andare a regime, il transitorio.

DIFFUSIVITA' TERMICA

I valori di diffusività termica di alcuni materiali comuni a 20^0 C variano dai $0{,}14*10^{-6}$ m^2/s per l'acqua ad un valore circa 1000 volte superiore per l'argento dove a= $174*10^{-6}$ m^2/s.

Lana di vetro =>>> $0{,}23*10^{-6}$ m^2/s

Vetro=>>> $0{,}34*10^{-6}$ m^2/s

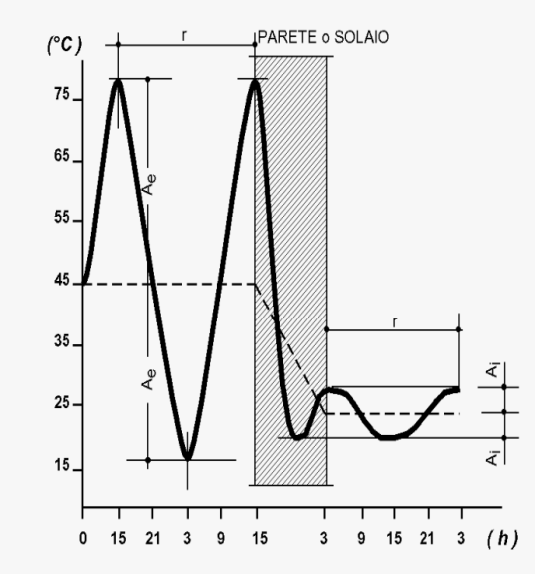
Mattone =>>> $0{,}52*10^{-6}$ m^2/s

Calcestruzzo =>>> $0{,}75*10^{-6}$ m^2/s

$$D = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{m^2}{s}$$

$$D = \frac{\cancel{W} \quad \cancel{Kg}\cancel{K} \quad m^{\cancel{3}\,2}}{\cancel{mK} \quad \cancel{W}s \quad \cancel{Kg}}$$

L'INERZIA TERMICA



L'inerzia termica è l'attitudine di un materiale di assorbire ed accumulare calore che successivamente viene ceduto all'ambiente ; è legata al fenomeno conduttivo ed è capace di :

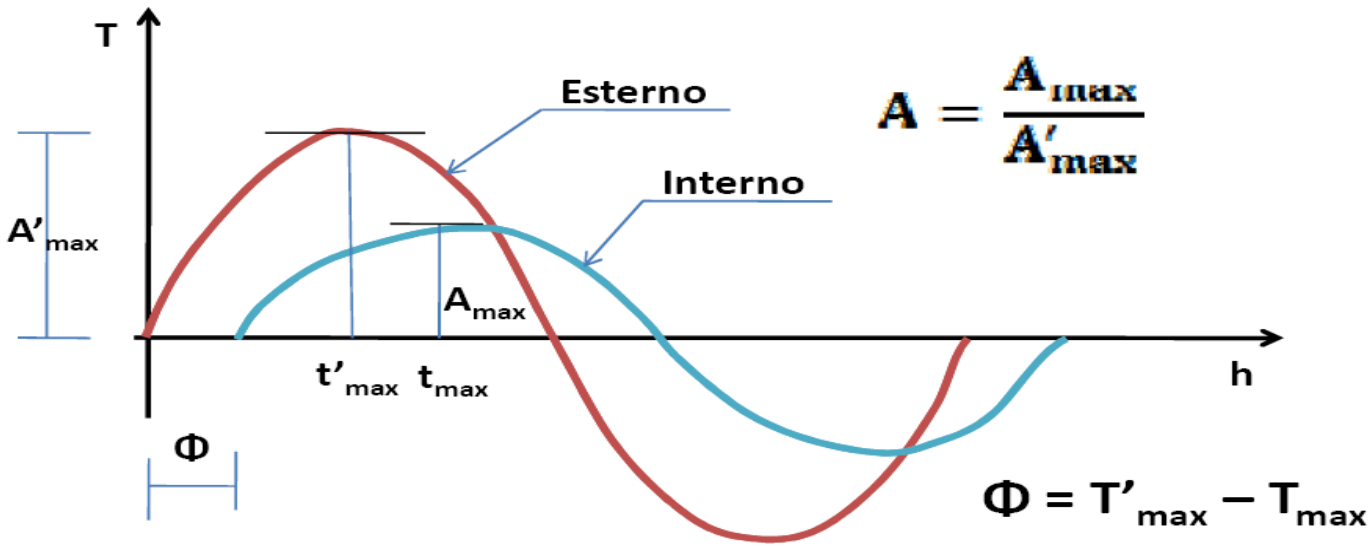
- ***mitigare le oscillazioni di temperatura nell'ambiente***
- ***realizzare migliori condizioni di benessere***
- ***limitare i costi di installazione e di gestione degli impianti***

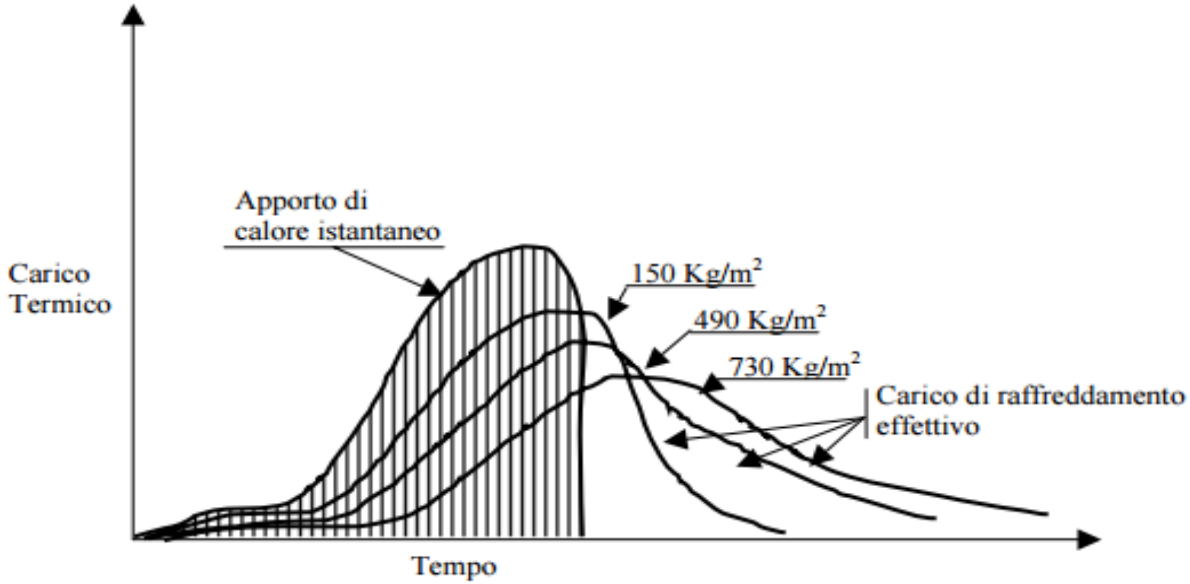
Infatti, il valore massimo della potenza termica richiesta per la climatizzazione estiva può essere ridotto sfasando in modo adeguato gli istanti in cui il carico termico per ventilazione e quello per trasmissione raggiungono i rispettivi picchi giornalieri.

E' possibile così evitare che all'interno accada quanto avviene all'esterno, ossia la presenza, quasi contemporanea della massima insolazione e del valore più alto della temperatura dell'aria

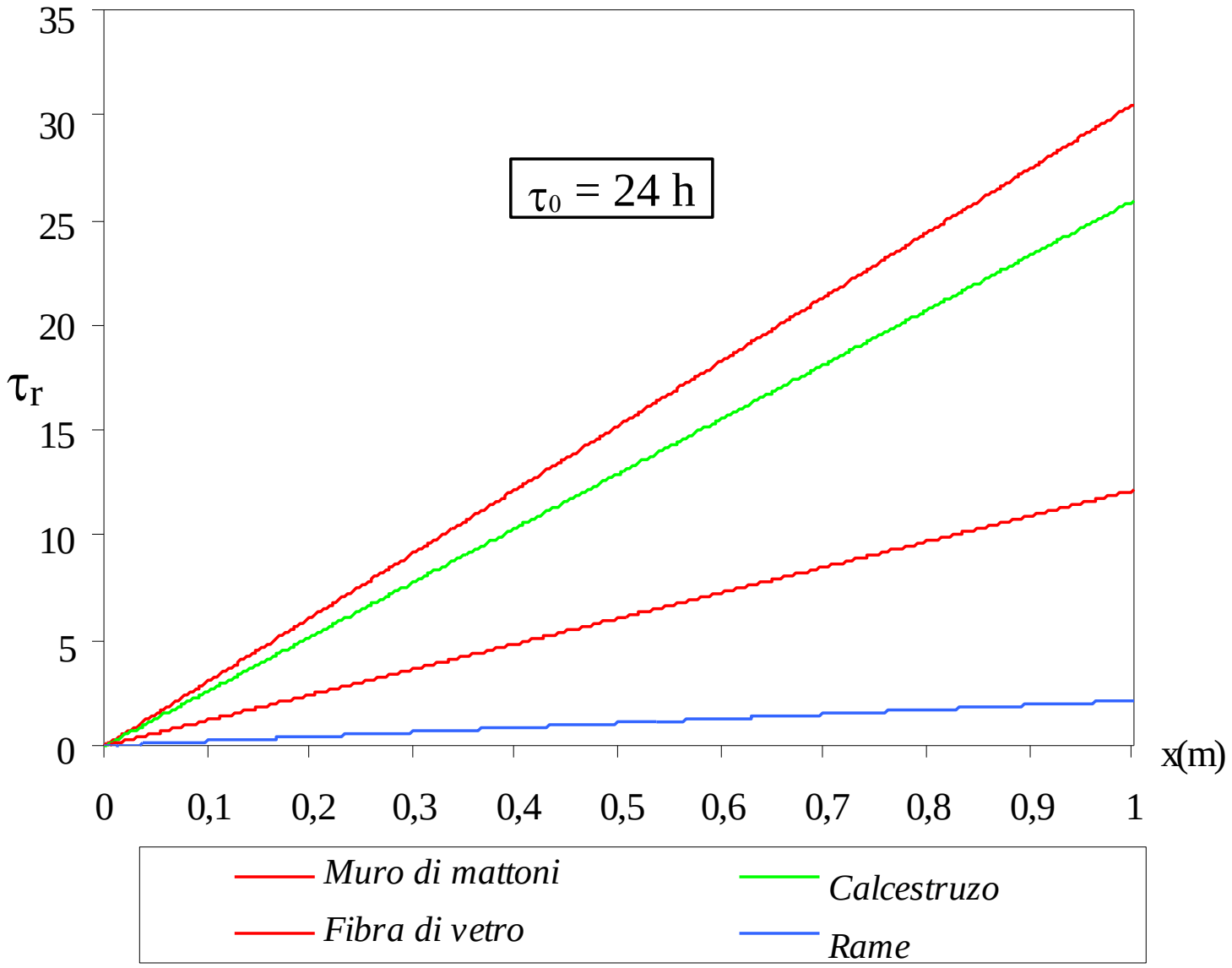
Con un valore del carico massimo di raffreddamento più basso, sarà necessario dimensionare un impianto con taglia e costo sicuramente inferiori e che avrà inoltre un migliore rendimento energetico

Sfasamento ϕ Smorzamento A

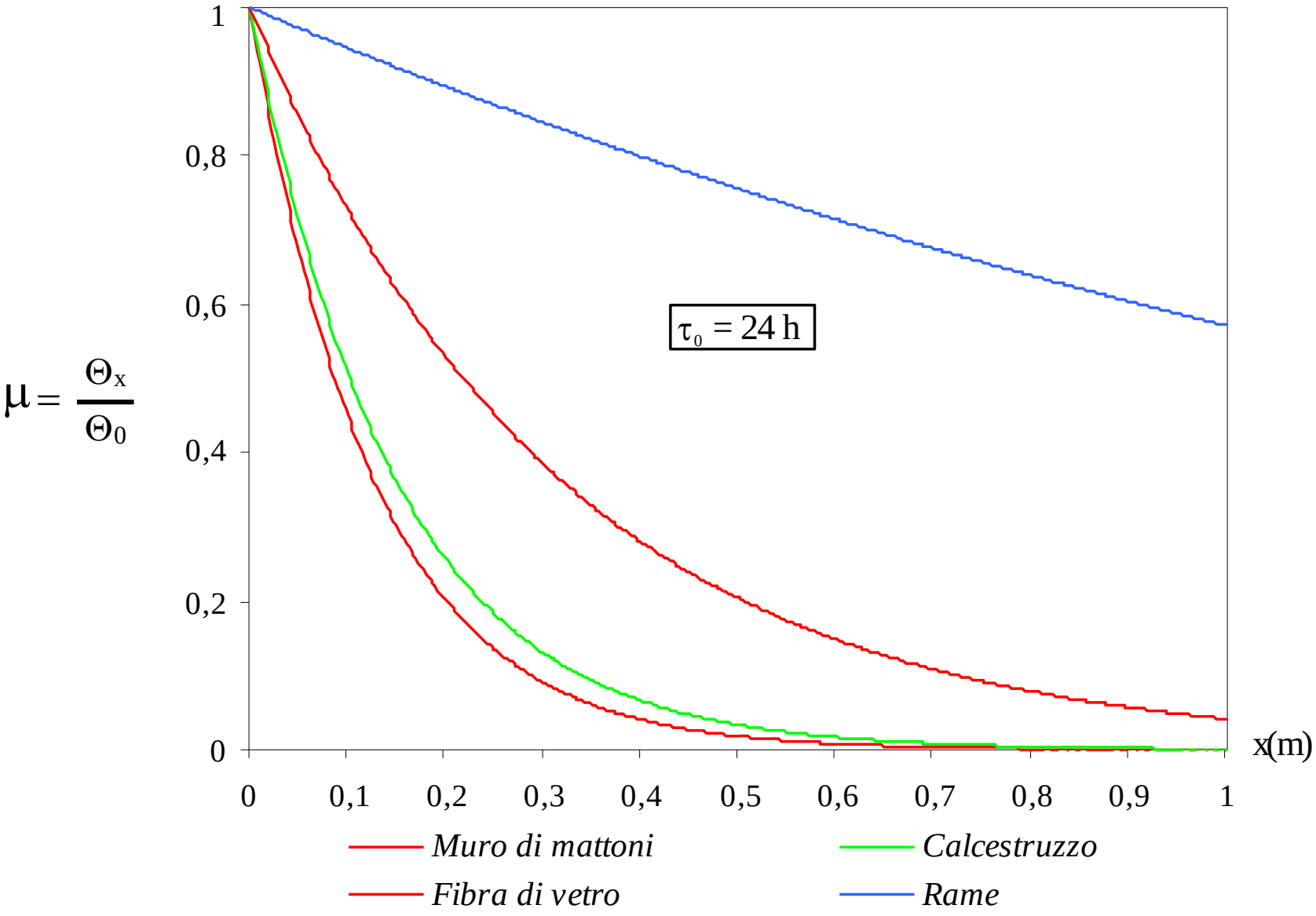




Andamento del tempo di ritardo di alcuni materiali in funzione dello spessore della parete



Andamento del fattore di smorzamento di alcuni materiali in funzione dello spessore della parete



RESISTENZA * CAPACITA' TERMICA *RC*

mc è CAPACITÀ TERMICA

1/hA è RESISTENZA TERMICA

La quantità $$m \cdot c \cdot \frac{1}{hA} = \frac{mc}{hA}$$

è detta costante di tempo τ_c = resistenza x capacità termica ***RC***

Pertanto il tempo di raffreddamento e/o di riscaldamento del corpo dipende dal prodotto *RC:*
una maggiore massa e quindi una maggiore capacità termica comporta un maggior tempo di raffreddamento o di riscaldamento, a parità di resistenza termica.

L'esponente dell'equazione di raffreddamento può scriversi :

$$\tau_c = \frac{mc}{hA} = \frac{\rho V c}{hA} = \frac{V}{A}\,\frac{\rho c}{h}$$

CALCOLO CARICO TERMICO ESTIVO

Attualmente come previsto dalla normativa italiana di riferimento per la determinazione del carico termico invernale, si distinguono:

CARICHI TERMICI PER TRASMISSIONE

Tenendo conto del contributo dell'irraggiamento solare e quindi della necessità di considerare una T esterna fittizia

CARICHI TERMICI PER INFILTRAZIONE

CARICHI TERMICI per apporti dovuti a persone, apparecchiature luci etc.

Irraggiamento solare

Parete vetrata esposta ad irraggiamento solare

1. RADIAZIONE SOLARE ATTRAVERSO IL VETRO.

- $Q_s = t_s G_i * S$

2. TRASMISSIONE DEL CALORE ATTRAVERSO I VETRI

- $Q = K \times S \times \Delta T$

Dove

K è la trasmittanza della superficie finestrata;

S è la superficie finestrata;

ΔT è la differenza di temperatura tra interno ed esterno.

Valori approssimativi del coefficiente di trasmissione K sono:

- Vetro doppio, telaio in legno ≡ 2.9 ÷ 3.2 $W/m^2\,°C$;
- Vetro doppio, telaio in metallo ≡ 3.3 ÷ 3.6 $W/m^2\,°C$;
- Vetro comune semplice ≡ 5 ÷ 6 $W/m^2\,°C$;

Nella tabella sono riportati i valori della radiazione solare con riferimento a latitudini nord: 45° (Venezia) e 40° (Napoli) [kcal/m²h (4,18/3600 kW/m²)]

RADIAZIONE SOLARE MAX MENSILE ATTRAVERSO VETRO SEMPLICE – FINESTRE CON TELAIO IN LEGNO – [kcal/hm²]										
Lat.	Mese/Esposizione	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Orizzontale
40 °	Giugno	46	360	439	301	146	301	439	360	642
	Luglio/Maggio	40	344	444	339	187	339	444	344	631
	Agosto/Aprile	29	276	439	395	276	396	439	276	580
	Settembre/marzo	24	157	404	439	379	439	404	157	496
	Ottobre/Febbraio	19	94	330	442	439	442	330	94	349
	Novembre/Gennaio	13	32	271	423	450	423	271	32	279
	Dicembre	13	27	233	401	447	401	233	27	230
45°	Giugno	44	349	440	333	199	333	440	349	620
	Luglio/Maggio	39	330	443	363	237	363	443	330	601
	Agosto/Aprile	29	265	433	411	325	411	433	265	541
	Settembre/marzo	23	147	389	439	403	439	389	147	448
	Ottobre/Febbraio	16	86	307	434	445	434	307	86	301
	Novembre/Gennaio	12	26	222	383	432	383	222	26	211
	Dicembre	11	23	155	349	414	349	155	23	169

Tabella per il calcolo dei carichi termici estivi attraverso le superfici opache considerando il contributo dell'irraggiamento solare.
Attraverso il concetto di temperatura equivalente si possono utilizzare le relazioni valide in regime stazionario

Tab. 2-73 - Differenze di temperatura equivalente ΔT_{eq} (°C) per calcolare il calore entrate attraverso i muri esposti al sole e muri in ombra. Valida per (1): muri di colore scuro - temperatura esterna a bulbo asciutto 34°C - temperatura ambiente 26°C - escursione termica giornaliera 11°C - mese luglio - 40° latitudine nord (2)

Parete rivolta a	Peso del muro (kg m^{-2}) (3)	Ora solare											
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Nord-Est	100	2.5	8.1	11.9	12.5	13.1	10.2	7.4	6.9	6.4	6.9	7.4	7.4
	300	-0.8	-1.4	-1.4	2.5	13.1	11.9	10.8	8.1	5.3	5.8	6.4	6.9
	500	1.9	1.3	1.9	1.9	1.9	5.3	8.5	8.1	7.4	6.4	5.3	5.8
	700	2.5	2.5	3	3	3	3	3	5.3	7.4	8.5	7.4	6.4
Est	100	0.2	9.2	16.4	18.1	19.7	19.2	17.4	10.8	6.4	6.9	7.4	7.4
	300	-0.8	-0.8	-0.3	11.3	16.4	16.9	16.9	10.2	7.4	6.9	6.4	6.9
	500	2.5	2.5	3	4.2	7.4	10.8	13.1	13.6	13.1	10.8	9.7	8.5
	700	5.8	5.3	5.3	4.7	4.2	4.7	5.3	8.1	9.7	10.2	9.7	9.2
Sud-Est	100	5.3	3	6.9	10.2	14.1	14.7	15.2	14.1	13.1	10.2	8.5	8.1
	300	0.2	0.2	-0.3	6.9	10.8	13.1	15.2	14.1	13.6	11.3	9.7	8.1
	500	3.6	3.6	3	3	3	5.8	8.5	9.2	9.7	10.2	9.7	8.5
	700	4.7	4.2	4.2	4.2	4.2	3.6	3	5.8	7.4	8.1	8.5	9.7
Sud	100	-0.8	-1.4	0.2	1.9	7.4	11.9	14.7	16.4	15.2	14.1	14.1	10.8
	300	-0.8	-1.9	-1.9	-1.4	3.6	6.4	10.8	13.1	13.6	14.1	14.1	12.5
	500	1.9	1.9	0.8	0.8	1.3	1.9	4.1	6.4	8.1	8.5	8.5	9.7
	700	3.6	3	2.5	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	3.6	5.3	5.3	6.9
Sud-Ovest	100	-1.4	-2.5	-2.5	-1.4	-0.3	1.9	3	10.2	14.1	18.6	21.9	22.5
	300	0.8	0.2	-0.3	-0.3	-0.3	0.2	0.8	4.2	6.4	13.1	17.5	10.2
	500	3.6	2.5	3	2.5	1.9	2.5	3	3.6	4.2	6.4	7.4	10.2
	700	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	3.6	3	3	3	3.6	4.2	4.7
Ovest	100	-1.4	-1.9	-2.5	-1.4	-0.3	1.3	3	7.4	10.8	17.5	21.9	24.7
	300	0.8	0.2	-0.3	-0.3	-0.3	0.8	1.9	3.6	5.3	10.2	14.2	18.6
	500	3.6	3.6	3	3	3	3	3	3.6	4.2	5.3	6.4	9.2
	700	6.4	5.8	5.3	4.7	4.2	4.2	4.2	4.7	5.3	5.3	5.3	5.8
Nord-Ovest	100	-1.9	-2.5	-2.5	-0.3	1.3	1.3	3	5.3	6.4	10.2	13.1	18.1
	300	-1.4	-1.9	-2.5	-1.4	-0.3	-0.3	0.8	3	4.2	5.3	6.4	11.3
	500	2.5	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.5	3	4.7
	700	4.2	3.6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3.6
Nord (ombr.)	100	-1.9	-1.9	-2.5	-1.9	-1.4	0.2	1.9	4.2	5.3	6.4	7.4	6.9
	300	-1.9	-1.9	-2.5	-1.9	-1.4	-0.8	-0.3	1.3	3	4.2	5.3	5.8
	500	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.2	0.8	1.3	1.9	2.5
	700	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	0.2	0.8	1.3

Parete rivolta a	Peso del muro (kg m^{-2}) (3)	Ora solare											
		18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
Nord-Est	100	7.4	6.4	5.3	4.2	3	1.9	0.8	-0.3	-1.4	-1.9	-2.5	-1.4
	300	7.4	6.9	6.4	5.8	5.3	4.2	3	1.9	0.8	0.2	-0.3	-0.8
	500	6.4	6.4	6.4	5.8	5.3	4.7	4.2	3.6	3	3	2.5	2.5
	700	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	4.7	4.7	4.2	3.6	3.6
Est	100	7.4	6.4	5.3	4.2	3	1.9	0.8	-0.3	-0.8	-1.4	-1.9	-1.9
	300	7.4	6.9	6.4	5.8	5.3	4.2	2.5	1.9	1.3	0.2	0.2	-0.3
	500	7.4	7.4	7.4	6.9	6.4	5.8	5.3	4.7	4.2	3.6	3.6	3
	700	8.5	7.4	6.4	6.9	7.4	7.4	7.4	6.9	6.9	6.4	6.4	6.4
Sud-Est	100	7.4	6.4	5.3	4.2	3	1.9	0.8	-0.3	-0.8	-0.8	-1.4	-1.4
	300	7.4	6.9	6.4	5.8	5.3	4.2	3	2.5	1.9	1.3	1.3	0.8
	500	7.4	6.9	7.4	5.8	5.3	5.3	5.3	4.7	4.7	4.2	4.2	3.6
	700	8.5	8.1	7.4	6.9	6.4	6.4	6.4	5.8	5.8	5.3	5.3	4.7
Sud	100	8.5	6.4	5.3	3.6	3	1.3	0.8	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.8
	300	10.8	8.1	6.4	5.3	4.2	3	1.9	0.8	0.2	0.2	-0.3	-0.8
	500	9.7	8.1	7.4	5.8	5.3	4.7	4.2	4.2	3.6	3	3	2.5
	700	7.4	8.1	8.5	8.5	7.4	6.4	5.3	5.3	4.7	4.7	4.2	3.6
Sud-Ovest	100	23.1	16.4	13.1	6.4	3	1.9	0.8	0.2	0.2	-0.3	-0.8	-0.8
	300	19.7	19.2	18.6	10.8	5.3	3.6	3	2.5	1.9	1.9	1.3	1.3
	500	11.9	12.5	13.1	12.5	11.9	8.1	5.3	5.3	4.7	4.7	4.2	3.6
	700	5.3	8.1	9.7	10.2	10.8	6.9	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Ovest	100	26.3	18.6	11.9	7.4	4.2	2.5	0.8	0.2	-0.3	-0.3	-0.8	-0.8
	300	21.9	22.5	19.7	15.2	8.5	5.3	3	2.5	1.9	1.3	1.3	0.8
	500	10.8	13.6	15.2	14.7	14.1	10.2	7.4	6.4	5.8	5.3	4.7	4.2
	700	6.4	7.4	8.5	11.3	11.9	12.5	11.9	10.8	9.7	8.5	8.1	6.9
Nord-Ovest	100	21.9	20.3	18.6	9.7	3	1.9	0.8	-0.3	-0.8	-0.8	-1.4	-1.4
	300	16.4	16.9	17.5	11.3	6.4	4.2	3	1.9	1.3	0.2	-0.3	-0.8
	500	6.4	9.1	10.8	11.3	11.9	7.4	4.2	3.6	3.6	3	3	2.5
	700	4.2	4.7	5.3	7.4	9.7	10.2	10.8	8.5	6.9	5.8	5.3	4.7
Nord (ombr.)	100	6.4	5.3	4.2	3	1.9	0.8	-0.3	-0.3	-0.8	-0.8	-1.4	-1.4
	300	6.4	6.4	6.4	5.3	4.2	3	1.9	0.8	0.2	-0.3	-0.8	-1.4
	500	2.5	2.5	4.2	3.6	3	2.5	1.9	1.3	1.3	0.8	0.8	0.2
	700	1.9	2.5	3	3.6	4.2	3.6	3	1.9	1.3	0.8	0.8	0.2

(1) Tutti i valori sono validi sia per muri isolati che per muri non isolati (2) Per altre condizioni riferirsi alle correzioni della Tab. 2-75.
(3) Per muri di peso inferiore ai 100 Kg m^{-2} impiegare i dati relativi a 100 Kg m^{-2}

Fonte: CARRIER Corporation.

Tab. 2-74 - Differenze di temperatura equivalente ΔT_{eq} (°C) per calcolare il calore entrate attraverso tetti soleggiati e tetti in ombra, colore scuro. Valida per (1): temperatura esterna al bulbo asciutto 34 °C - temperatura ambiente 26°C - escursione termica giornaliera 11°C - mese luglio - 40° latitudine nord (2)

Tetto	Peso del tetto (kg m^{-2})	Ora solare											
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Esposto al sole	50	-2.5	-3.6	-4.1	-3.1	-0.8	3.6	8.1	13.1	17.5	20.8	23.6	25.2
	100	-0.3	-0.8	-1.4	-0.8	0.8	4.7	8.5	12.5	16.4	19.7	22.5	23.6
	200	1.9	1.3	0.8	1.3	3	5.3	8.5	12.5	15.2	18.1	20.8	21.9
	300	4.7	4.2	3	3.6	4.2	5.8	8.5	11.9	14.7	16.9	19.2	20.8
	400	6.9	6.4	5.8	5.8	6.4	6.9	8.5	11.9	14.1	15.2	17.5	19.2
Ricoperto di acqua	100	-3.1	-1.4	-0.3	0.8	1.9	5.3	8.5	10.2	11.9	10.8	9.7	8.5
	200	-1.9	-1.4	-0.8	-0.8	-0.3	2.5	5.3	6.9	8.1	8.1	8.5	8.1
	300	-0.8	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	0.8	2.5	3.6	5.3	6.4	7.4	8.1
Irrorato di acqua	100	-2.5	-1.4	-0.3	0.8	1.9	4.2	6.4	8.1	9.7	9.2	8.5	8.1
	200	-1.4	-1.4	-0.8	-0.8	-0.3	0.8	2.5	4.7	6.9	7.4	7.4	7.4
	300	-0.8	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-0.3	0.8	2.5	4.2	8.5	6.4	6.9
In ombra	100	-3.1	-3.1	-2.5	-1.4	-0.3	0.8	3	4.7	6.4	6.9	7.4	6.9
	200	-3.1	-3.1	-2.5	-1.9	-1.4	-0.3	0.8	2.5	4.2	5.3	6.4	6.9
	300	-1.9	-1.9	-1.4	-1.4	-1.4	-0.8	-0.3	0.8	1.9	3	4.2	4.7

Tetto	Peso del tetto (kg m^{-2})	Ora solare											
		18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
Esposto al sole	50	24.7	22.5	19.2	15.2	11.9	8.5	5.3	3.6	1.3	0.2	-0.8	-1.9
	100	23.6	21.9	19.2	16.4	13.6	10.8	8.1	6.4	4.2	3	3	0.8
	200	22.5	21.3	19.2	17.5	15.2	13.1	10.8	9.2	6.9	5.8	5.8	3
	300	21.3	20.8	19.7	18.6	16.9	15.2	13.6	11.9	9.7	8.5	8.5	5.8
	400	20.3	20.3	19.2	18.6	18.6	17.5	16.4	14.7	12.5	10.8	10.8	7.4
Ricoperto di acqua	100	7.4	6.4	5.3	3	0.8	0.2	0.2	-0.8	-1.4	-1.9	-2.5	-3.1
	200	8.1	7.4	6.4	5.3	3.6	2.5	1.3	0.2	-0.8	-1.4	-1.9	-1.9
	300	8.5	8.1	7.4	6.4	5.3	4.2	3	1.9	1.3	0.8	0.2	-0.3
Irrorato di acqua	100	7.4	6.4	5.3	3	0.8	0.2	-0.3	-0.8	-1.4	-1.4	-1.9	-1.9
	200	7.4	6.9	6.4	4.7	3.6	2.5	1.3	0.2	-0.3	-0.3	-0.8	-0.8
	300	7.4	6.9	6.4	5.8	5.3	4.2	3	1.9	0.8	0.2	-0.3	-0.8
In ombra	100	6.4	5.3	4.2	2.5	0.8	0.2	-0.3	-0.8	-1.9	-2.5	-3.1	-3.1
	200	6.4	5.8	5.3	4.2	3	1.9	0.8	-0.3	-0.8	-1.9	-2.5	-3.1
	300	5.3	5.3	5.3	4.7	4.2	3	1.9	0.8	0.2	-0.3	-0.8	-1.4

(1) Nel caso in cui il sottotetto sia ventilato e il soffitto isolato, ridurre la differenza di temperatura equivalente del 25%. Per tetti inclinati, si usi l'area del tetto proiettata su un piano orizzontale
(2) Per altre condizioni riferirsi alle correzioni della Tab. 2-75.
(3) Per muri di peso inferiore ai 100 Kg m^{-2} impiegare i dati relativi a 100 Kg m^{-2}

Fonte: CARRIER Corporation.

m_f massa frontale è la somma della densità di ogni strato moltiplicata per la superficie: determina lo smorzamento ed il tempo di ritardo dell'onda termica

In una trattazione più approfondita andrebbero inseriti coefficienti correttivi che tengono conto del colore della parete e dei diversi andamenti di temperatura dell'aria esterna

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità δ · 10¹² [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Laterizi: mattoni pieni, forati, leggeri	600	18-36	0,25
	800		0,30
	1.000		0,36
	1.200		0,43
	1.400		0,50
	1.600		0,59
	1.800		0,72
	2.000		0,90
Legno di abete	450	4,5	0,12
Legno di pino	550	4,5	0,15
Legno di acero	715	4,5	0,18
Legno di quercia	850	4,5	0,22
Mastici per tenute	1.000-1.650	–	0,04
Asfalto	2.100	0	0,70
Asfalto con sabbia	2.300		1,15
Bitumi	1.200	0	0,17
Bitumi con sabbia	1.300	0	0,26
Cartone catramato	1.600		0,50
Fogli di materiale sintetico	1.100	0,01-0,14	0,23
Argille espanse in granuli da 3 a 25 mm	280	–	0,09
	330		0,10
	450		0,12
Fibre di cellulosa	32	–	0,058
Perliti espanse in granuli da 0,1 a 2,3 mm	100	–	0,066
Polistiroli espansi in granuli	15	–	0,054
Pomici naturali	400	–	0,08
Scorie espanse	600	–	0,13
Vermiculiti espanse in granuli da 0,1 a 12 mm	80	–	0,077
	120		0,082
Ciottoli e pietre frantumate	1.500	–	0,7
Ghiaia grossa senza argilla	1.700	–	1,20
Sabbia secca	1.700	–	0,6
Cloruro di polivinile espanso rigido in lastre	30	0,5-1	0,039
	40		0,041
Polietilene espanso non reticolato	30	0,5-1	0,050
	50		0,060
Polietilene espanso reticolato	33	0,5-1	0,048
	50		0,058
Polistirene espanso sinterizzato	10	3,6-9	0,056
	15	2,5-6	0,047
	20	1,8-4,5	0,044
	25	1,8-4,5	0,042
Polistirene espanso per termocompressione	20	–	0,040
	25		0,039
	30		0,039
Polistirene espanso estruso con pelle	30	–	0,036
	35		0,035

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità δ · 10¹² [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Calcestruzzi a struttura aperta di argilla espansa	500	18-36	0,16
	600		0,18
	700		0,21
	800		0,24
	900		0,27
	1.000		0,31
Calcestruzzi cellulare da autoclave	400	18-36	0,15
	500		0,17
	600		0,19
	700		0,22
	800		0,25
Calcestruzzi di inerti espansi di origine vulcanica	1.000	18-36	0,38
	1.200		0,47
	1.400		0,58
Calcestruzzi di perlite o vermiculite	250	18-36	0,13
	400		0,15
Carta e cartone	1.000	1-2	0,16
Cartone bitumato	1.100	0,06-0,09	0,23
Cartongesso in lastre	900	23	0,21
Cartone ondulato	100	–	0,065
Fibre di vetro, pannelli rigidi	100	150	0,038
Fibre minerali, feltri resinati	30	150	0,045
Fibre minerali, pannelli semi rigidi	35	150	0,044
	40		0,042
	55		0,040
Fibre minerali, pannelli rigidi	80	150	0,039
	100		0,038
	125		0,038
Fibre minerali, pannelli a fibre orientate	100	150	0,048
Fibre minerali, feltri trapuntati	60	150	0,044
	80		0,044
	100		0,045
Fibre minerali, feltri da loppe di altoforno	40	150	0,054
Fibre minerali, pannelli da loppe di altoforno	40	150	0,054
	60		0,048
	80		0,046
	100		0,046
	150		0,048
Malte di gesso per intonaci	600	18	0,29
	750		0,35
	900		0,41
	1.000		0,47
	1.200		0,58
Intonaci di gesso puro	1.200	18	0,35
Intonaci di calce e gesso	1.400	18	0,70
Malte di calce o di calce e cemento	1.800	5-12	0,90
Malte di cemento	2.000	5-12	1,40

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Polistirene espanso estruso senza pelle	30	0,6-2,2	0,041
	50		0,034
Poliuretani in lastre da blocchi	25	1-2	0,034
	32		0,032
	40		0,032
	50		0,032
Polisocianurati in lastre da blocchi	32	1-2	0,032
	40		0,032
Poliuretani espansi in situ	37	1,8-6	0,035
Resine fenoliche in lastre	35	3,6-6	0,041
	60		0,044
	80		0,046
Resine ureiche espanse in situ	8	30-140	0,057
	12		0,054
	15		0,051
	30		0,048
Piastrelle di porcellana	2.300	–	1,0
Vetro cellulare espanso	130	0	0,055
	150		0,060
	180		0,066
Vetro da finestre	2.500	0	1,0
Celluloide	1.350	–	0,35
Policarbonato PC	1.150	–	0,23
Politetrafluoroetilene PTFE	2.200	–	0,24
Polietilene PE	950	–	0,35
Policloruro di vinile PVC	1.400	–	0,16
Polistirene PS	1.100	–	0,17
Resine epossidiche	1.200	–	0,20
Resine poliestere	2.000	–	0,50
Acciaio	7.800	–	52
Acciaio inox	8.000	–	17
Argento	10.500	–	420
Alluminio	2.700	–	220
Leghe di alluminio	2.800	–	160
Bronzo	8.700	–	65
Ferro	7.870	–	80
Ghisa	7.200	–	50
Nichel	8.800	–	65
Ottone	8.400	–	110
Piombo	11.300	–	35
Rame	8.900	–	380
Zinco	7.100	–	110
Pannelli a base di perlite espansa	190	26	0,071
Pannelli di fibre di legno	800	2,6	0,14
	900		0,16
	1.000		0,18

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Pannelli di lana di legno	300	36-90	0,085
	400		0,097
	500		0,11
Pannelli di spaccato di legno	400	–	0,12
	500		0,14
	600		0,16
Pannelli di trucioli di legno pressati	500	1,8-3,6	0,10
	700		0,15
Pannelli di trucioli di legno estrusi	700	9	0,17
Pannelli di sughero espanso puro	130	6,7-10	0,045
Pannelli di sughero espanso con leganti	90	6,7-10	0,043
	130	4-21	0,045
	200	4-21	0,052
Ardesia	2.700	–	2,0
Basalto	2.800	–	3,5
Calcare	2.100	–	1,6
	2.700		2,9
	2.800		3,5
Dolomite	2.700	–	1,8
Granito	2.500	–	3,2
	3.000		4,1
Lava	2.200	–	2,9
Marmo	2.700	–	3,0
Porfido	2.200	–	2,9
Tufo	1.500	–	0,63
	2.300		1,7

Densità e conduttività dei materiali da costruzione *(segue)*

Valori di conduttività termica “λ”

seguito **Tab. 4.VII**

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Calcestruzzi a struttura aperta di argilla espansa	500	18-36	0,16
	600		0,18
	700		0,21
	800		0,24
	900		0,27
	1.000		0,31
Calcestruzzi cellulare da autoclave	400	18-36	0,15
	500		0,17
	600		0,19
	700		0,22
	800		0,25
Calcestruzzi di inerti espansi di origine vulcanica	1.000	18-36	0,38
	1.200		0,47
	1.400		0,58
Calcestruzzi di perlite o vermiculite	250	18-36	0,13
	400		0,15
Carta e cartone	1.000	1-2	0,16
Cartone bitumato	1.100	0,06-0,09	0,23
Cartongesso in lastre	900	23	0,21
Cartone ondulato	100	–	0,065
Fibre di vetro, pannelli rigidi	100	150	0,038
Fibre minerali, feltri resinati	30	150	0,045
Fibre minerali, pannelli semi rigidi	35	150	0,044
	40		0,042
	55		0,040
Fibre minerali, pannelli rigidi	80	150	0,039
	100		0,038
	125		0,038
Fibre minerali, pannelli a fibre orientate	100	150	0,048
Fibre minerali, feltri trapuntati	60	150	0,044
	80		0,044
	100		0,045
Fibre minerali, feltri da loppe di altoforno	40	150	0,054
Fibre minerali, pannelli da loppe di altoforno	40	150	0,054
	60		0,048
	80		0,046
	100		0,046
	150		0,048
Malte di gesso per intonaci	600	18	0,29
	750		0,35
	900		0,41
	1.000		0,47
	1.200		0,58
Intonaci di gesso puro	1.200	18	0,35
Intonaci di calce e gesso	1.400	18	0,70
Malte di calce o di calce e cemento	1.800	5-12	0,90
Malte di cemento	2.000	5-12	1,40

segue

Valori di conduttività termica “λ”

seguito **TAB. 4.VII**

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Laterizi: mattoni pieni, forati, leggeri	600	18-36	0,25
	800		0,30
	1.000		0,36
	1.200		0,43
	1.400		0,50
	1.600		0,59
	1.800		0,72
	2.000		0,90
Legno di abete	450	4,5	0,12
Legno di pino	550	4,5	0,15
Legno di acero	715	4,5	0,18
Legno di quercia	850	4,5	0,22
Mastici per tenute	1.000-1.650	–	0,04
Asfalto	2.100	0	0,70
Asfalto con sabbia	2.300		1,15
Bitumi	1.200	0	0,17
Bitumi con sabbia	1.300	0	0,26
Cartone catramato	1.600		0,50
Fogli di materiale sintetico	1.100	0,01-0,14	0,23
Argille espanse in granuli da 3 a 25 mm	280	–	0,09
	330		0,10
	450		0,12
Fibre di cellulosa	32	–	0,058
Perliti espanse in granuli da 0,1 a 2,3 mm	100	–	0,066
Polistiroli espansi in granuli	15	–	0,054
Pomici naturali	400	–	0,08
Scorie espanse	600	–	0,13
Vermiculiti espanse in granuli da 0,1 a 12 mm	80	–	0,077
	120		0,082
Ciottoli e pietre frantumate	1.500	–	0,7
Ghiaia grossa senza argilla	1.700	–	1,20
Sabbia secca	1.700	–	0,6
Cloruro di polivinile espanso rigido in lastre	30	0,5-1	0,039
	40		0,041
Polietilene espanso non reticolato	30	0,5-1	0,050
	50		0,060
Polietilene espanso reticolato	33	0,5-1	0,048
	50		0,058
Polistirene espanso sinterizzato	10	3,6-9	0,056
	15	2,5-6	0,047
	20	1,8-4,5	0,044
	25	1,8-4,5	0,042
Polistirene espanso per termocompressione	20	–	0,040
	25		0,039
	30		0,039
Polistirene espanso estruso con pelle	30	–	0,036
	35		0,035

segue

Valori di conduttività termica “λ”

seguito **TAB. 4.VII**

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Polistirene espanso estruso senza pelle	30	0,6-2,2	0,041
	50		0,034
Poliuretani in lastre da blocchi	25	1-2	0,034
	32		0,032
	40		0,032
	50		0,032
Polisocianurati in lastre da blocchi	32	1-2	0,032
	40		0,032
Poliuretani espansi in situ	37	1,8-6	0,035
Resine fenoliche in lastre	35	3,6-6	0,041
	60		0,044
	80		0,046
Resine ureiche espanse in situ	8	30-140	0,057
	12		0,054
	15		0,051
	30		0,048
Piastrelle di porcellana	2.300	–	1,0
Vetro cellulare espanso	130	0	0,055
	150		0,060
	180		0,066
Vetro da finestre	2.500	0	1,0
Celluloide	1.350	–	0,35
Policarbonato PC	1.150		0,23
Politetrafluoroetilene PTFE	2.200	–	0,24
Polietilene PE	950	–	0,35
Policloruro di vinile PVC	1.400	–	0,16
Polistirene PS	1.100	–	0,17
Resine epossidiche	1.200	–	0,20
Resine poliestere	2.000	–	0,50
Acciaio	7.800	–	52
Acciaio inox	8.000	–	17
Argento	10.500	–	420
Alluminio	2.700		220
Leghe di alluminio	2.800	–	160
Bronzo	8.700	–	65
Ferro	7.870	–	80
Ghisa	7.200	–	50
Nichel	8.800	–	65
Ottone	8.400	–	110
Piombo	11.300	–	35
Rame	8.900	–	380
Zinco	7.100	–	110
Pannelli a base di perlite espansa	190	26	0,071
Pannelli di fibre di legno	800	2,6	0,14
	900		0,16
	1.000		0,18

Valori di conduttività termica “λ”

seguito **TAB. 4.VII**

Materiale	Densità ρ [kg/m3]	Permeabilità δ · 10^{12} [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Pannelli di lana di legno	300	36-90	0,085
	400		0,097
	500		0,11
Pannelli di spaccato di legno	400	–	0,12
	500		0,14
	600		0,16
Pannelli di trucioli di legno pressati	500	1,8-3,6	0,10
	700		0,15
Pannelli di trucioli di legno estrusi	700	9	0,17
Pannelli di sughero espanso puro	130	6,7-10	0,045
Pannelli di sughero espanso con leganti	90	6,7-10	0,043
	130	4-21	0,045
	200	4-21	0,052
Ardesia	2.700	–	2,0
Basalto	2.800	–	3,5
Calcare	2.100	–	1,6
	2.700		2,9
	2.800		3,5
Dolomite	2.700	–	1,8
Granito	2.500	–	3,2
	3.000		4,1
Lava	2.200	–	2,9
Marmo	2.700	–	3,0
Porfido	2.200	–	2,9
Tufo	1.500	–	0,63
	2.300		1,7