

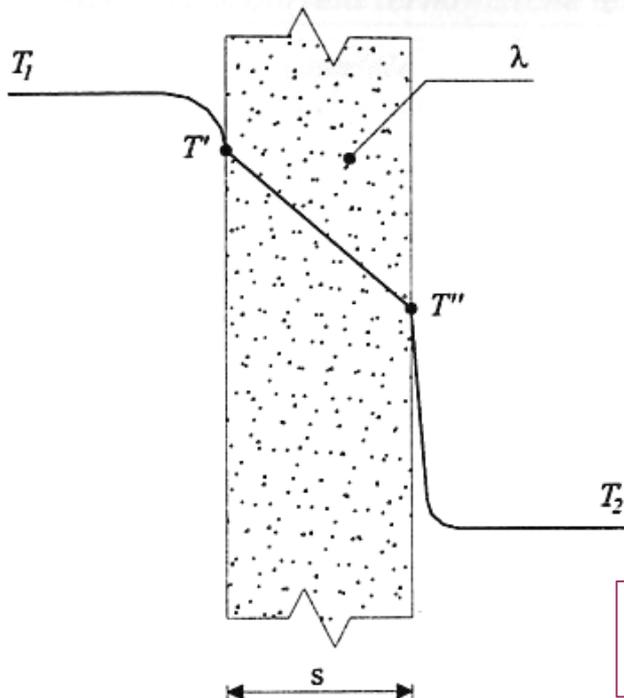
Trasmittanza di una parete

Quantità di calore q scambiata tra due fluidi aventi temperature T_1 e T_2 separati da una parete piana di dimensioni trasversali grandi rispetto allo spessore

Ritenute valide le ipotesi dell'adduzione, siano q_1 e q_2 i flussi termici ai confini della parete e q il flusso termico che attraversa la parete per effetto della conducibilità interna

Se il fenomeno si svolge in **regime stazionario**, le quantità di calore q_1 , q_2 , q sono fra loro uguali

$$q_1 = q_2 = q$$



$$(T_1 - T') = \frac{q}{k_1}$$

$$(T' - T'') = \frac{s \cdot q}{\lambda}$$

$$(T'' - T_2) = \frac{q}{k_2}$$

Andamento della temperatura attraverso una parete piana tra due fluidi

Sommando membro a membro e semplificando, si ha:

$$T_1 - T_2 = q \left(\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2} \right)$$

Il *flusso termico per unità di superficie* è fornito dalla:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

Il termine **H** è definito *trasmissione* della parete:

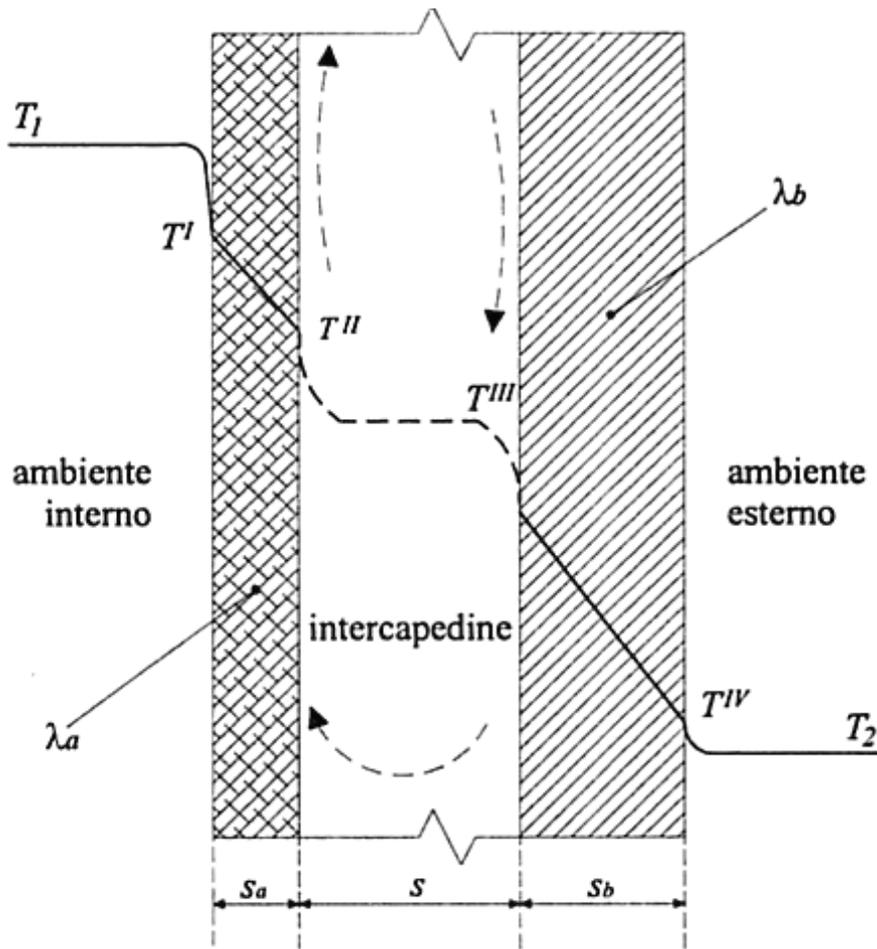
$$H = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

Il *flusso termico globale* q è dato da:

$$q = H(T_1 - T_2)$$

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{tot}}}$$

Parete con intercapedine



Andamento qualitativo della temperatura in una parete verticale con intercapedine

T_1, T_2 = temperature del fluido

T^I, T^{IV} = temperatura delle facce esterne della parete

T^{II}, T^{III} = temperature facce interne dell'intercapedine

Trasmittanza dell'intercapedine

$$H = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{s_b}{\lambda_b} + \frac{1}{k_4}}$$

Il terzo e quarto termine al denominatore sono riferiti all'intercapedine

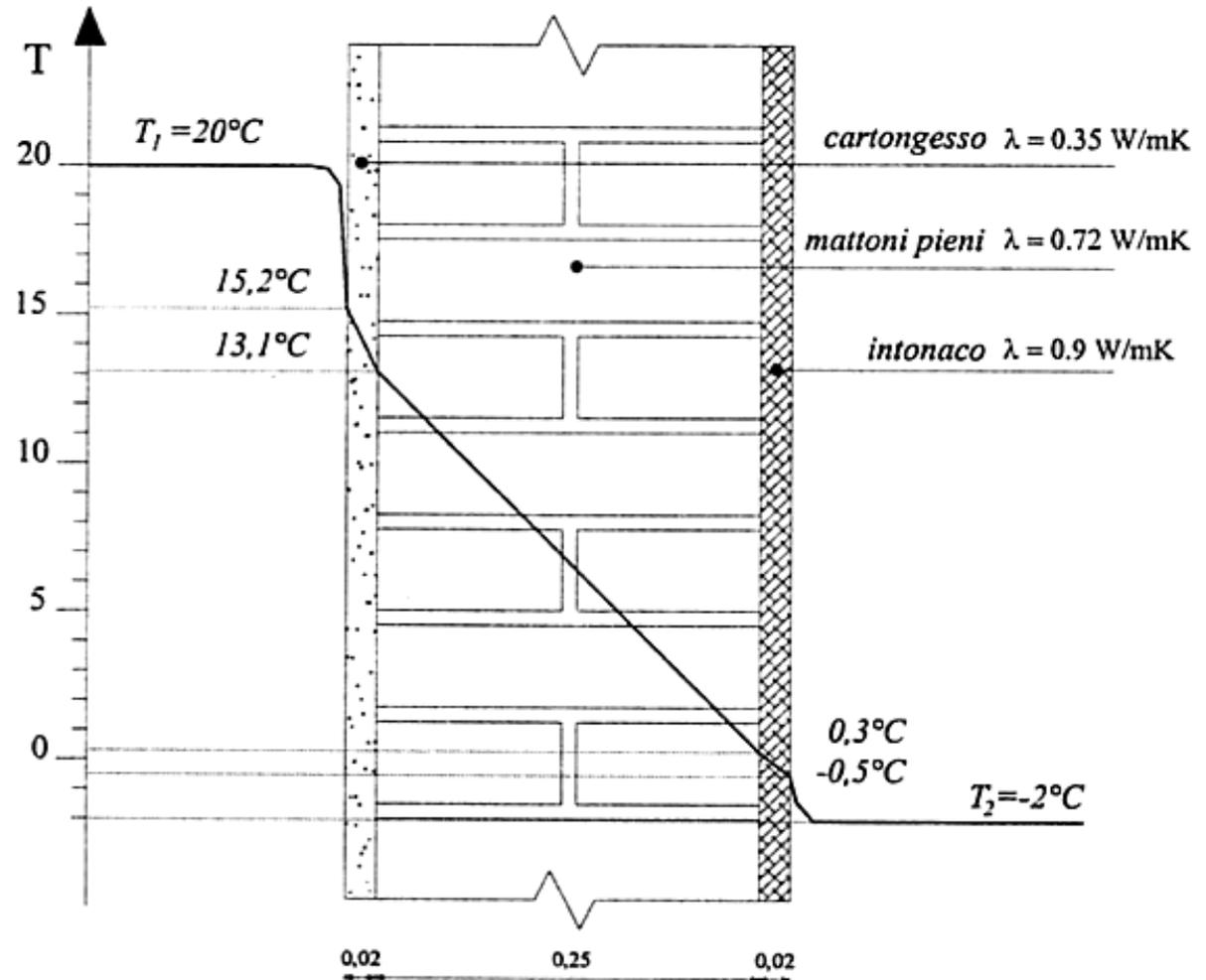
E' possibile quindi definire resistenza dell'intercapedine:

$$R_i = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$

Parete opaca non soleggiata che separa due ambienti a temperature diverse

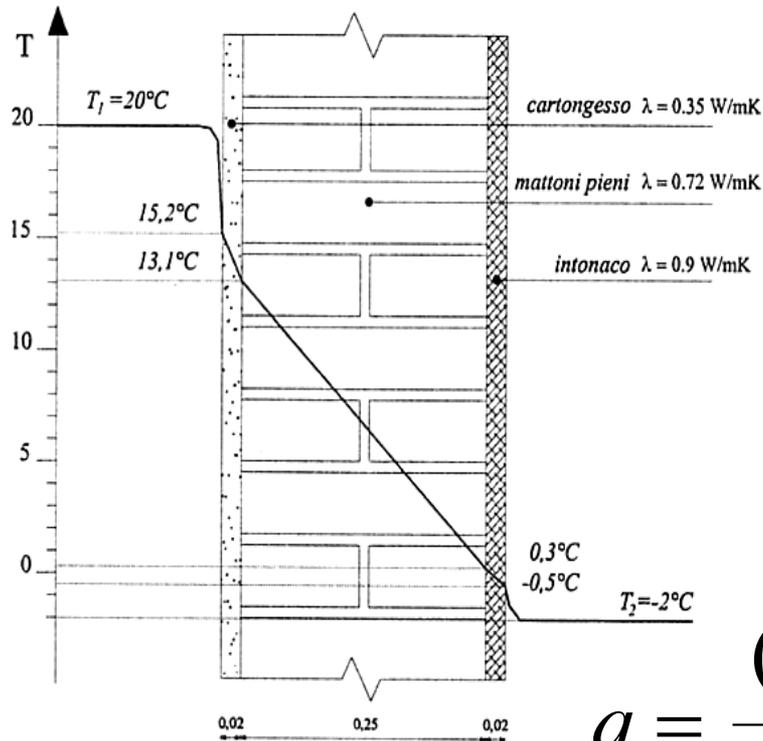
$$K_i = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_e = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$$



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



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

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

$$R_p = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} = 0,412$$

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{tot}}} = \frac{22}{0,562} = 39,1 \text{ [W/m}^2 \text{]}$$

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

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:

$$Q_L = Q_T + Q_V$$

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

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

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

V = Volume edificio

C = Calore specifico Aria
p.a

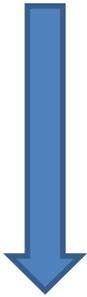
Trasmissione del calore:

(periodo estivo)

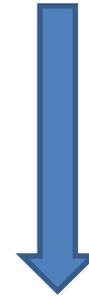
Regime stazionario:
condizioni microclimatiche
costanti nel tempo

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**

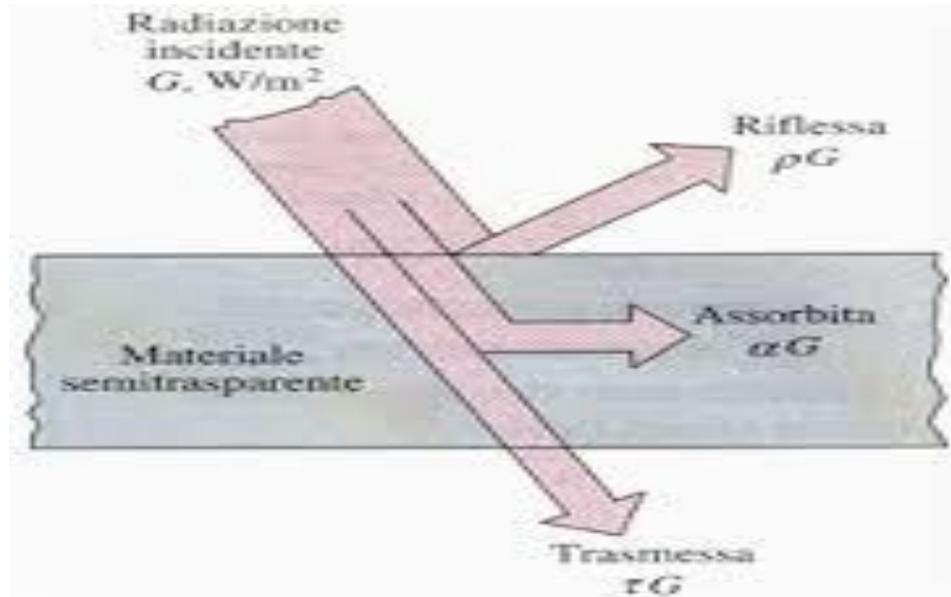
Proprietà dell'involucro nel periodo estivo

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.

Irraggiamento solare



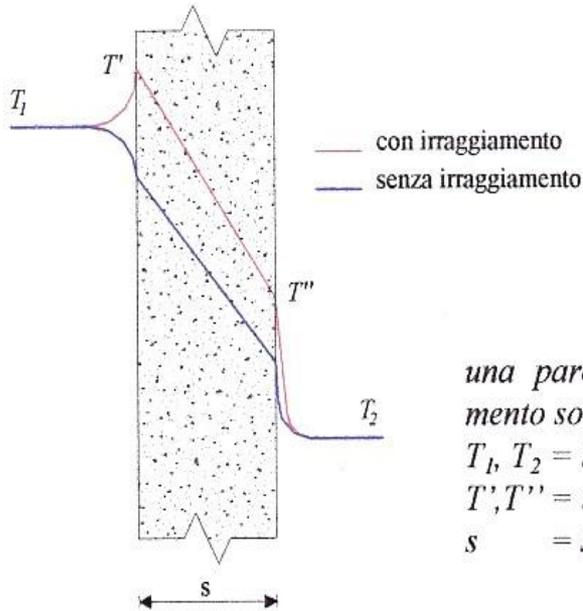
$$\alpha = G_{ass}/G \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$
$$\rho = G_{rifl}/G \quad 0 \leq \rho \leq 1$$
$$\tau = G_{tras}/G \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

La radiazione incidente su una superficie per unità di area e per unità di tempo è detta irradiazione e si indica con G .

Irraggiamento solare

Parete opaca esposta ad irraggiamento solare



andamento della temperatura in una parete opaca esposta ad irraggiamento solare.

T_1, T_2 = temperature della aria;
 T', T'' = temperatura delle facce estreme;
 s = spessore della parete.

$$G_a = a_s G_i$$

a_s = coefficiente di assorbimento medio della parete per l'energia solare

G_i = potenza incidente **raggiante** sulla parete per unità di superficie

$$G_a = q_1 + q_2$$

$$q_1 = k_1 (T' - T_1)$$

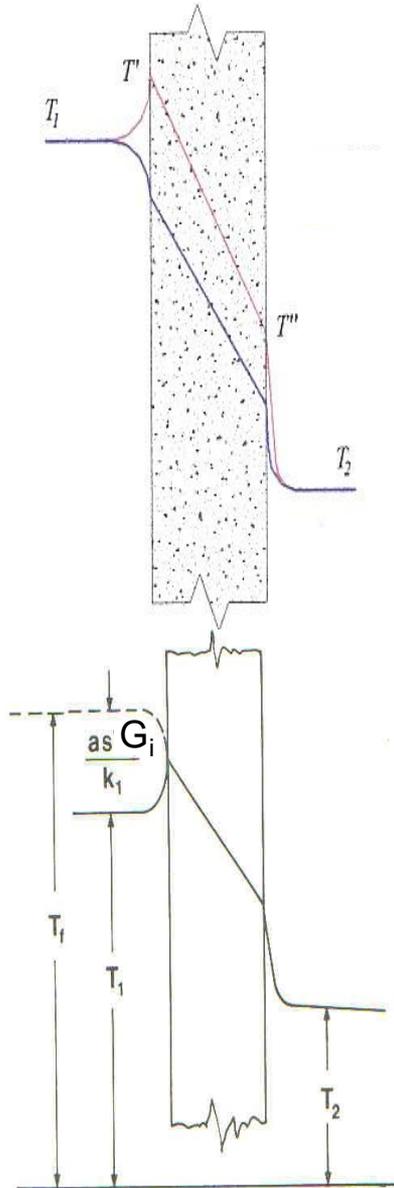
$$q_2 = \frac{T' - T_2}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

La quantità di calore assorbita dalla parete in parte viene riemessa verso l'esterno (q_1 , che non interessa come contributo perché esce fuori) ed una quota entra attraverso la parete (q_2)

$$a_s G_i = k_1 (T' - T_1) + \frac{T' - T_2}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

Irraggiamento solare

Parete opaca esposta ad irraggiamento solare



$$q_2 = H (T_f - T_2)$$

Introduciamo da questo momento il concetto di T_f ovvero la temperatura che dovrebbe avere l'aria esterna in caso di parete non soleggiata per far passare la stessa quantità di calore che passa in presenza di soleggiamento per poter quantificare il nostro calore sempre con le medesime espressioni.

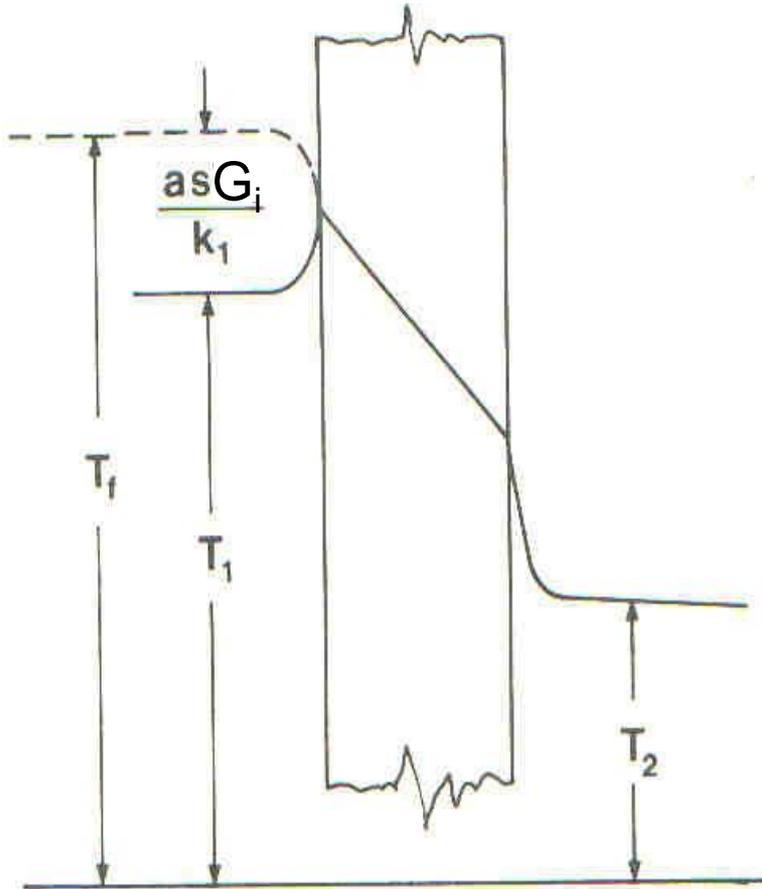
$$\begin{cases} q_2 = H_{totale} (T_f - T_2) \\ q_2 = K_1 (T_f - T') \end{cases}$$

$$a_s G_i = k_1 (T' - T_1) + \frac{T' - T_2}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

$$a_s G_i - k_1 (T' - T_1) = k_1 (T_f - T')$$

$$T_f = \frac{a_s G_i}{k_1} + T_1$$

Irraggiamento solare



Confronto fra l'andamento reale della temperatura e quello fittizio.

La radiazione solare incidente G_i determina un flusso termico attraverso la parete maggiore di quello che avremmo per il solo contatto con l'aria esterna a temperatura T_1 .

Per considerare tale contributo si sostituisce la T_1 con una temperatura fittizia T_f che dipende dalle proprietà assorbenti della parete alle lunghezze d'onda della radiazione solare (a_s), dalle modalità di riemissione da parte della parete del calore assorbito (fattore di adduzione K_1), dalla radiazione incidente G_i .

In questo modo si può continuare ad usare la formula per il calcolo di Q introdotta nel caso di assenza di irraggiamento solare

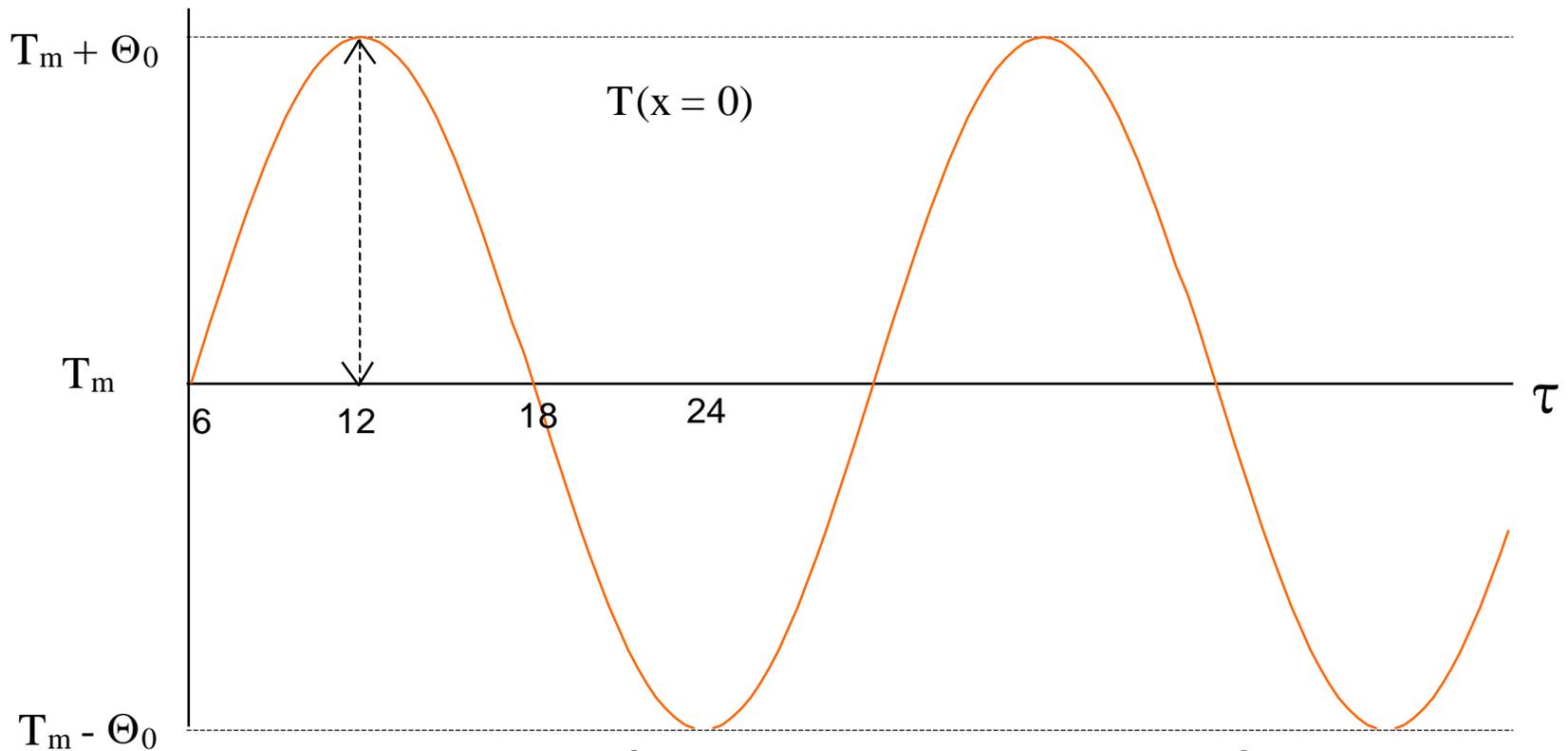
Manca ancora un riferimento alla massa della parete e quindi alla cosiddetta inerzia termica che verrà introdotto nella temperatura equivalente nelle slides successive (calcolo estivo)

$T \neq$ 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:

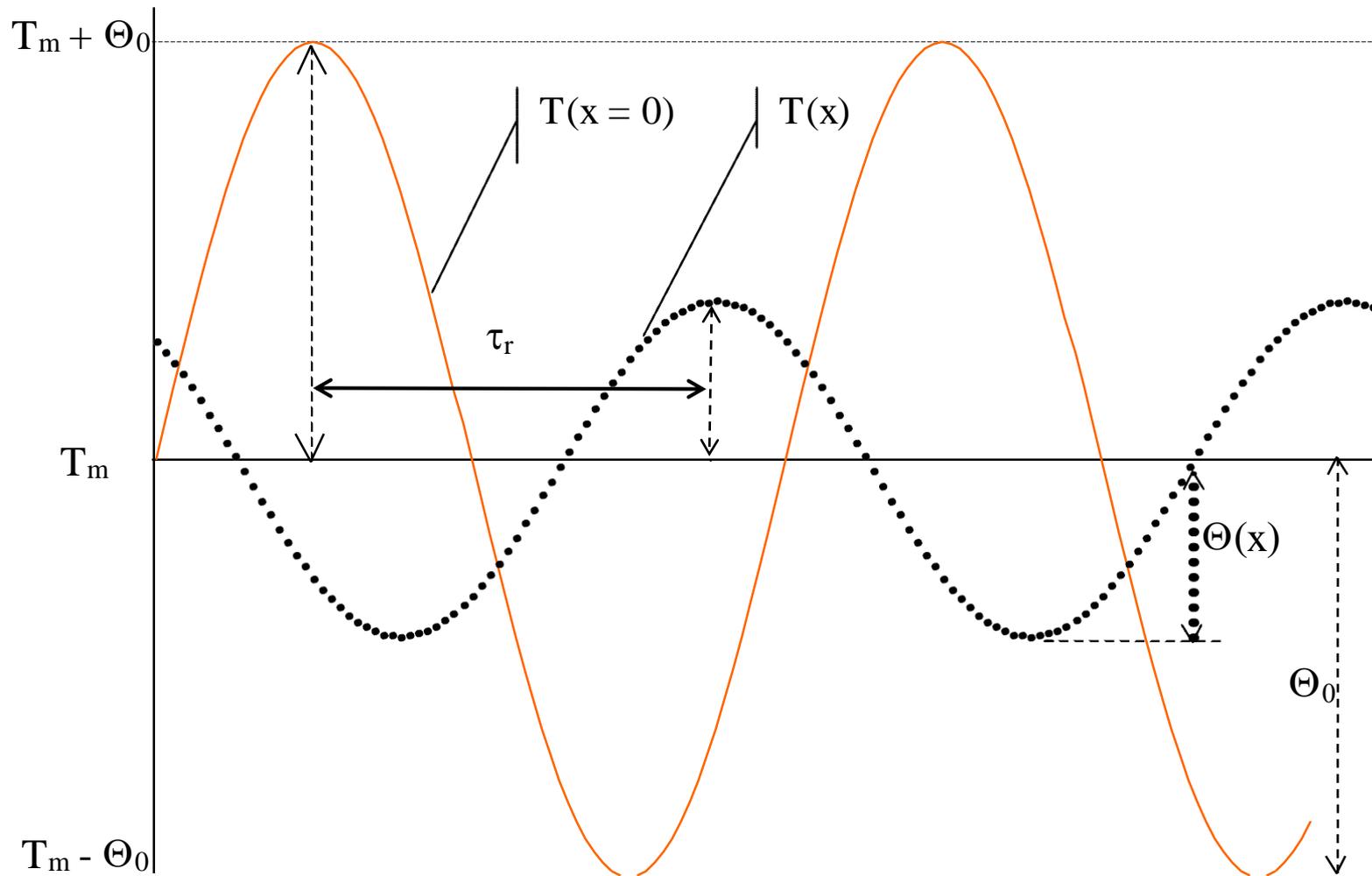
$$T(0, \tau) = T_m + \Theta_0 \text{sen}(\omega\tau)$$



— *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:

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

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

D rappresenta la diffusività termica (m²/s) ed è una proprietà specifica del materiale che caratterizza **la conduzione non stazionaria del calore**

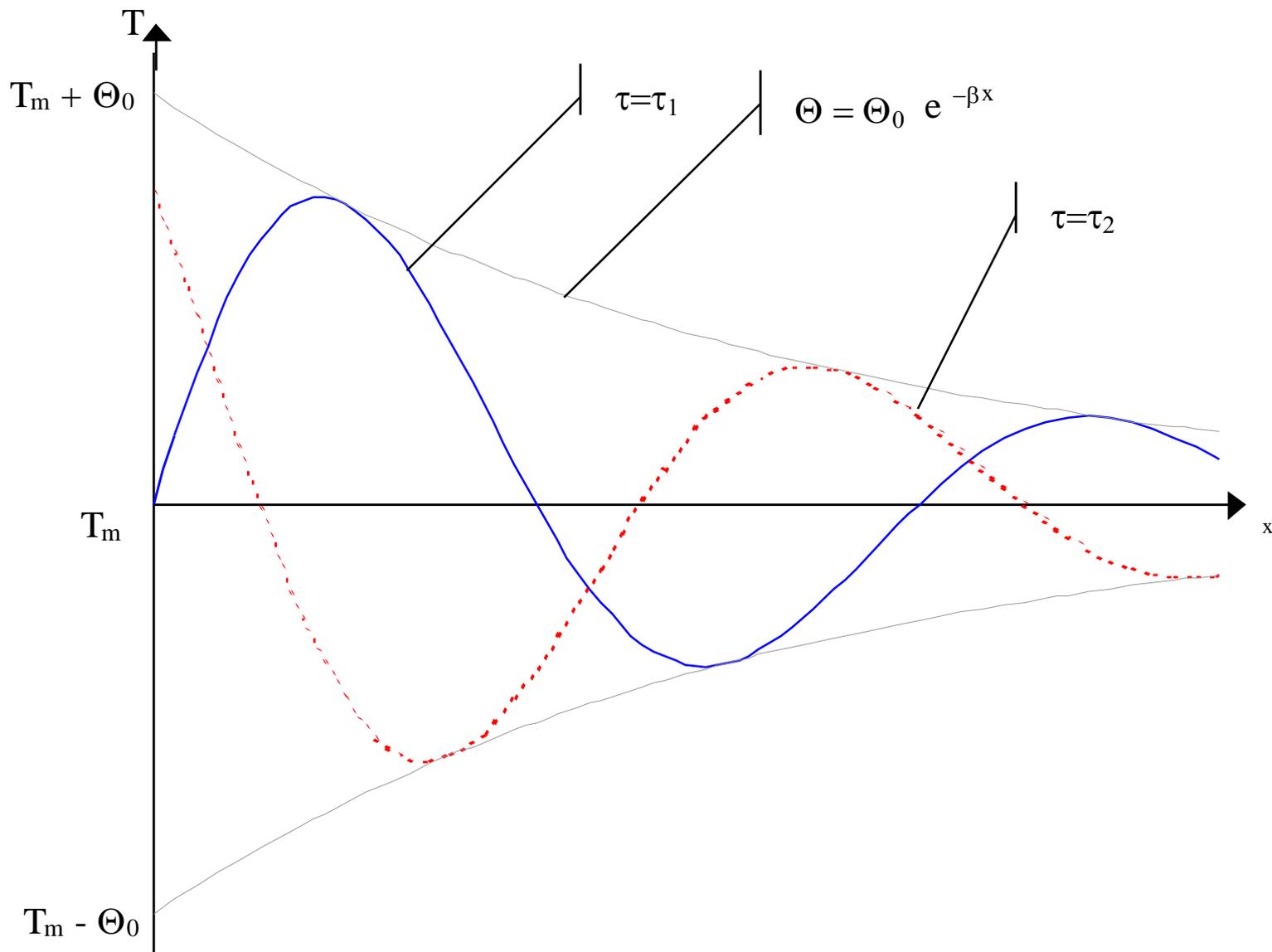
$$\Theta_x = \Theta_0 e^{-\beta x}$$

Ampiezza dell'oscillazione decresce nello spazio

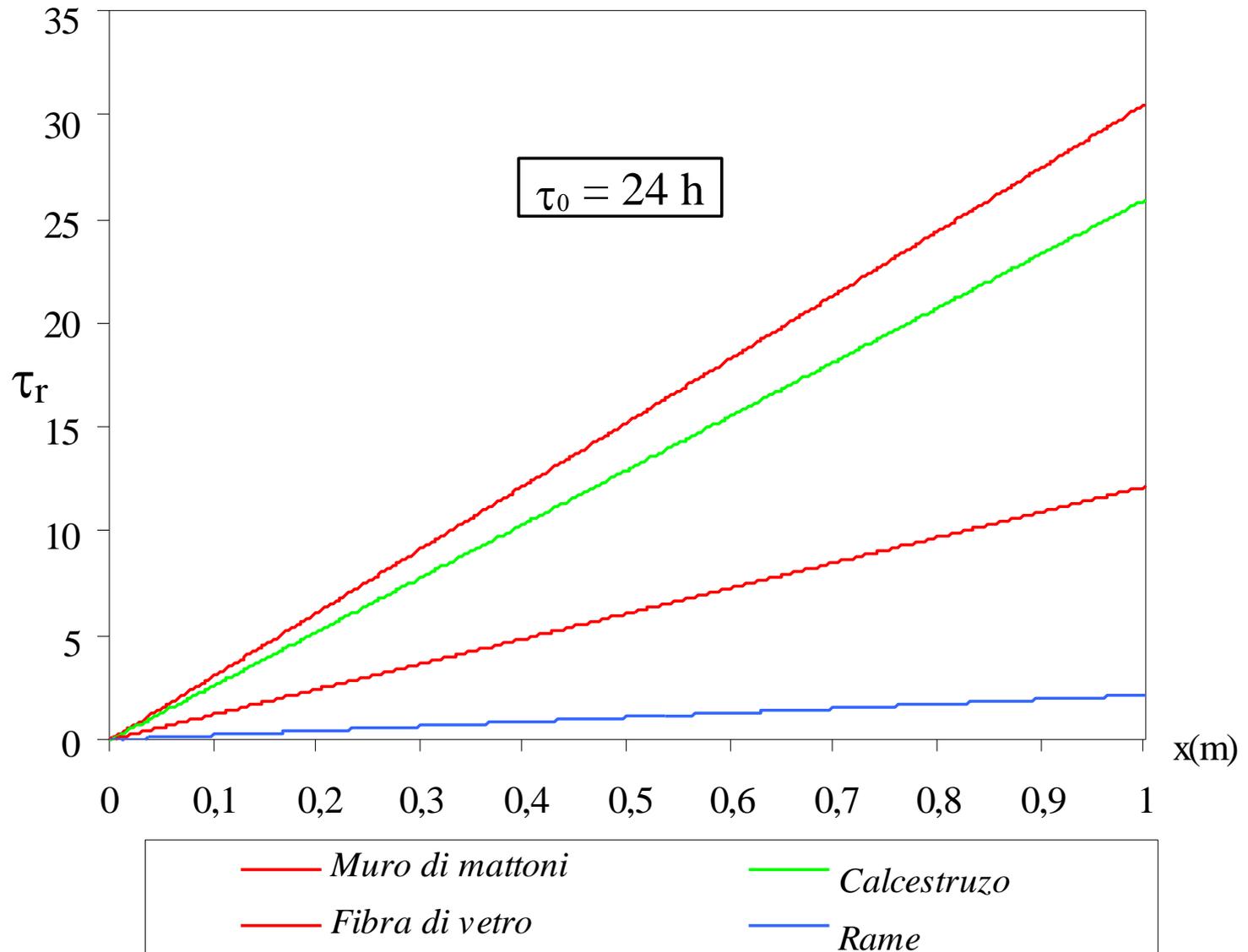
$$T_r = \frac{\beta x}{\omega}$$

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

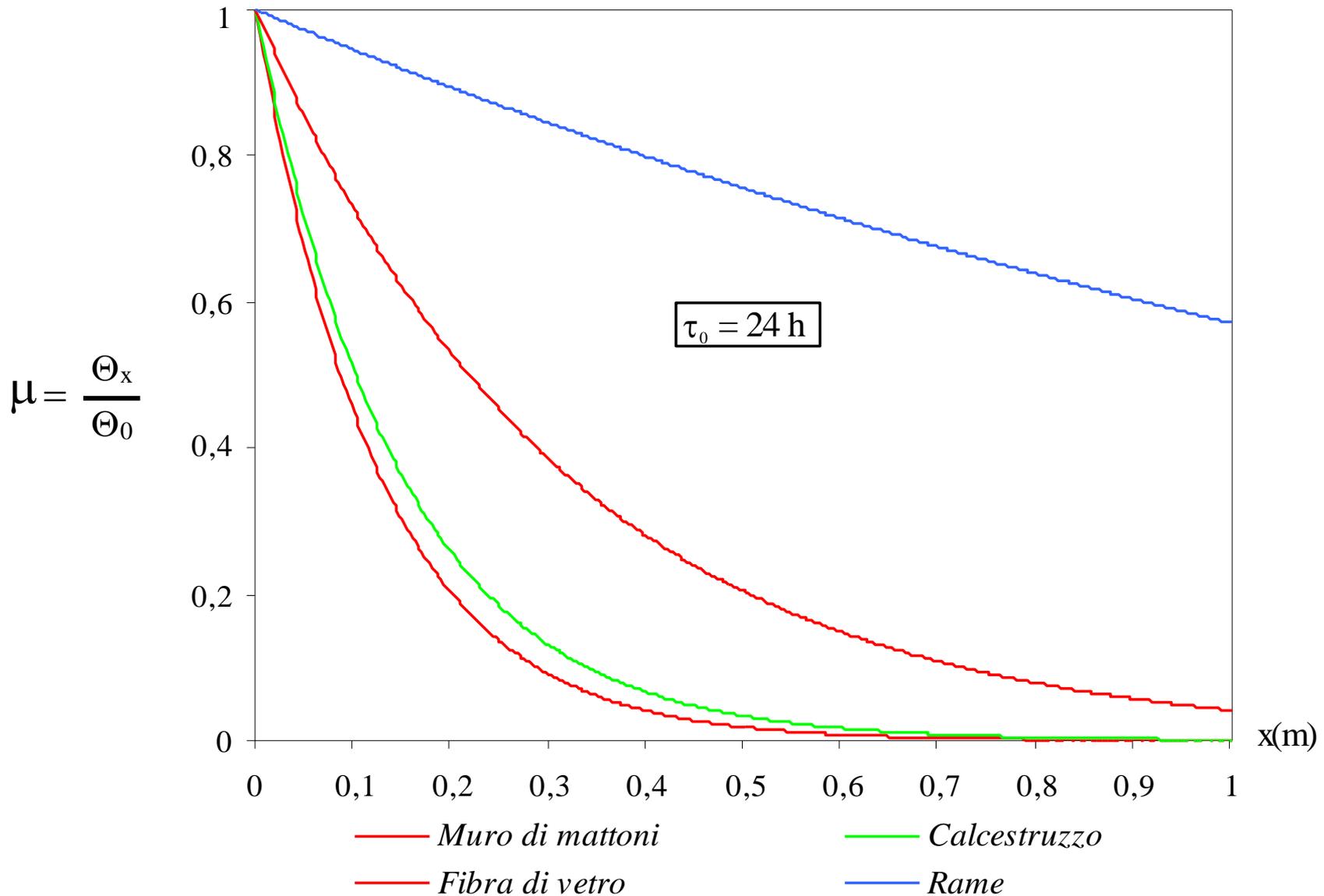
Muro di Fourier: andamenti spaziali della temperatura in due diversi istanti τ_1 e τ_2



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



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.

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

La diffusività termica D [m²/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° C variano dai $0,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ per l'acqua ad un valore circa 1000 volte superiore per l'argento dove $a = 174 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

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

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

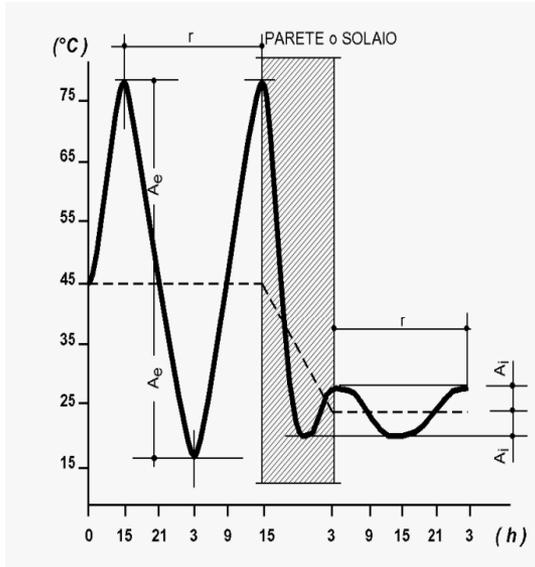
Mattone =>>> $0,52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

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

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

$$D = \frac{\cancel{\text{W}} \quad \cancel{\text{KgK}} \quad \text{m}^3 \quad ^2}{\cancel{\text{mK}} \quad \cancel{\text{Ws}} \quad \cancel{\text{Kg}}}$$

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**

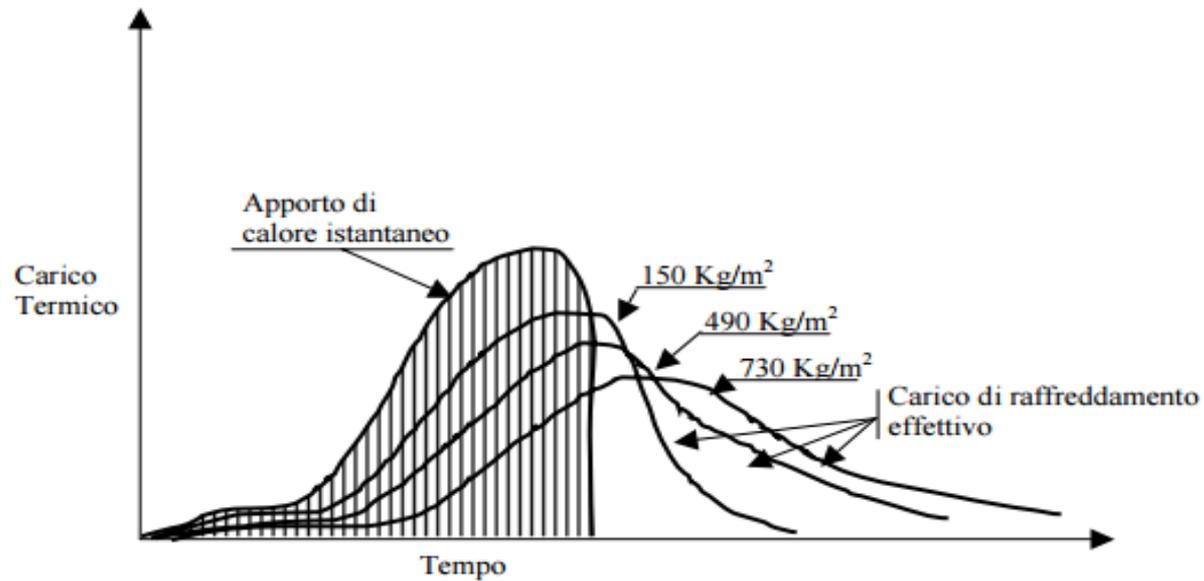
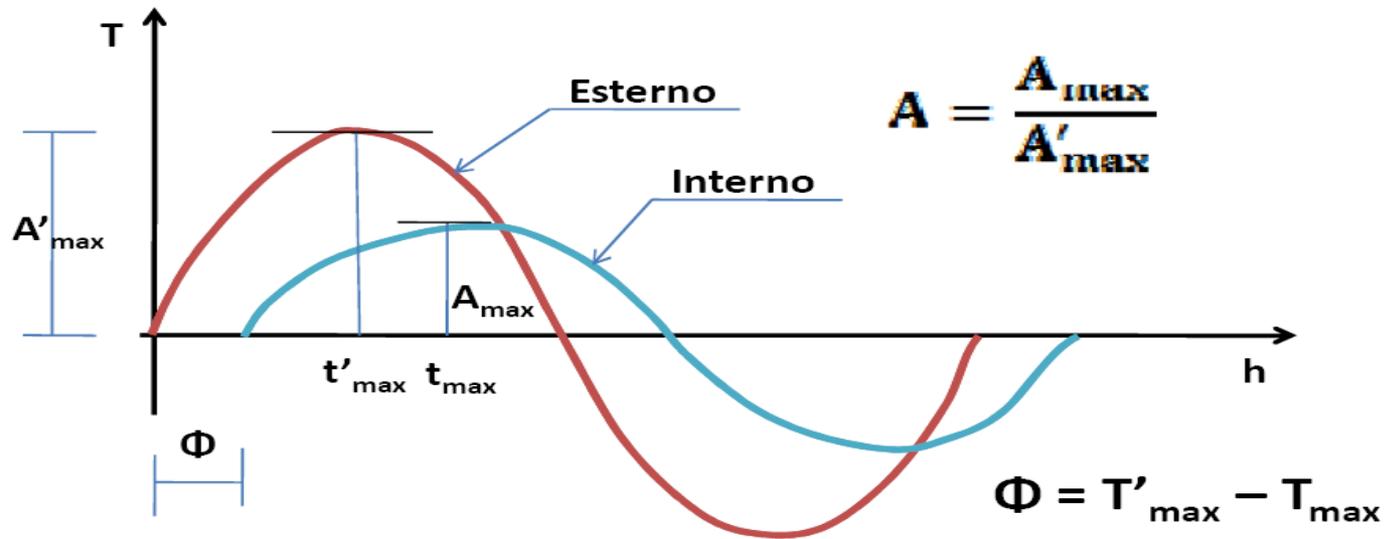
Infatti, il **valore massimo della potenza termica** richiesta per la climatizzazione estiva può essere ridotto **sfasando** in modo adeguato gli istanti in cui il carico termico per ventilazione e quello per trasmissione raggiungono i rispettivi picchi giornalieri.

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



CALCOLO CARICO TERMICO ESTIVO

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



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

1. RADIAZIONE SOLARE ATTRAVERSO IL VETRO.

- $Q_s = t_s G_i \cdot S$

2. TRASMISSIONE DEL CALORE ATTRAVERSO I VETRI

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

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 $\cong 2.9 + 3.2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- Vetro doppio, telaio in metallo $\cong 3.3 + 3.6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- Vetro comune semplice $\cong 5 + 6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;

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 |