

Comitato Termotecnico Italiano  
I PROTAGONISTI DELL'EFFICIENZA ENERGETICA:  
I MATERIALI ISOLANTI  
Milano 6 Febbraio 2009

**DEFINIZIONE E CALCOLO DELLA  
TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA**

**prof. ing. Vincenzo Corrado**

**Politecnico di Torino  
Dipartimento di Energetica  
Gruppo di ricerca TEBE**



# CONTENUTI DELLA PRESENTAZIONE

---

- REQUISITI TERMICI DEI COMPONENTI OPACHI: L'INERZIA TERMICA
- IL CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA NELLA LEGISLAZIONE
- LA SOLLECITAZIONE TERMICA SULLA PARETE
- IL METODO DELL'ANALISI ARMONICA
- LA TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA
- CONCLUSIONI

# REQUISITI TERMICI DEI COMPONENTI OPACHI

- **Isolamento termico** (condizioni invernali)
  - ⇒ trasmittanza termica
  - ⇒ UNI EN ISO 6946:2007
- **Controllo dell'inerzia termica** (condizioni estive)
  - ⇒ parametri termici dinamici
  - ⇒ UNI EN ISO 13786:2008
- **Controllo della condensazione superficiale** (condizioni invernali)
  - ⇒ fattore di qualità termica
  - ⇒ UNI EN ISO 13788:2003
- **Controllo della condensazione interna** (condizioni invernali)
  - ⇒ profilo pressione di vapore
  - ⇒ UNI EN ISO 13788:2003

# INERZIA TERMICA DELLA PARETE

È l'attitudine della parete a ridurre (smorzamento) e ritardare (sfasamento) l'effetto di sollecitazioni dinamiche sul carico termico dell'ambiente.

- Si distingue tra sollecitazioni termiche:
  - sul lato esterno del componente
    - variazione giornaliera della temperatura esterna
    - variazione giornaliera della radiazione incidente sul componente
  - sul lato interno sul lato interno del componente
    - radiazione solare attraverso i vetri
    - occupazione, apporti interni
    - intermittenza impianto di riscaldamento/raffrescamento

# CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA

## CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA (SOLLECITAZIONE ESTERNA)

- Questo requisito è tanto più importante quanto più elevata è l'escursione giornaliera della temperatura (stagione estiva, climi caldi secchi).
- L'inerzia termica di un componente è legata alla sua capacità di accumulo (massa), ma anche allo stesso isolamento termico.

## CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA (SOLLECITAZIONE INTERNA)

- Questo requisito è tanto più importante quanto più elevata l'escursione giornaliera dei carichi interni (apporti interni variabili, grandi superfici vetrate non schermate).
- L'inerzia termica di un componente è legata alla capacità di accumulo (massa) dei primi 10 centimetri a contatto con l'aria interna, ma anche alla posizione dello strato di isolamento termico.

# CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA: IL D. LGS. 311/2006

Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica

Riferimento legislativo	Decreto legislativo 192/05 (modificato dal decreto legislativo 311/06), allegato I comma 9 lettera b
Ambito di applicazione	<ul style="list-style-type: none"><li>• Edifici di nuova costruzione</li><li>• Ristrutturazione integrale dell'involucro di edifici esistenti</li><li>• Demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria di edifici esistenti</li><li>• Ampliamento superiore al 20 % in volumetria dell'intero edificio esistente</li></ul>
Esclusioni	<ul style="list-style-type: none"><li>• Edifici adibiti ad attività sportive, industriali e artigianali</li><li>• Zona climatica F</li><li>• Località in cui l'irradianza media mensile sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione sia minore di 290 W/m<sup>2</sup></li></ul>
Espressione del requisito	<ul style="list-style-type: none"><li>• Massa superficiale delle pareti opache verticali, orizzontali o inclinate superiore a 230 kg/m<sup>2</sup> oppure</li><li>• Utilizzo alternativo di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano in modo equivalente di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare</li></ul>

# CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA: I NUOVI DECRETI

Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica

Riferimento legislativo	Schema di DPR di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192
Ambito di applicazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edifici di nuova costruzione</li> <li>• Ristrutturazione integrale dell'involucro di edifici esistenti</li> <li>• Demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria di edifici esistenti</li> <li>• Ampliamento superiore al 20 % in volumetria dell'intero edificio esistente</li> </ul>
Esclusioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edifici adibiti ad attività <b>commerciali</b>, sportive, <b>scolastiche</b>, industriali e artigianali</li> <li>• Zona climatica F</li> <li>• Località in cui l'irradianza media mensile sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione sia minore di <math>290 \text{ W/m}^2</math></li> </ul>
Espressione del requisito	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Massa superficiale superiore a <math>230 \text{ kg/m}^2</math> (<b>pareti opache verticali con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest /nord/nord-est</b>) oppure</li> <li>• <b>Modulo della trasmittanza termica periodica inferiore a <math>0,12 \text{ W/m}^2\text{K}</math> (pareti opache verticali con l'eccezione di quelle nel quadrante nord-ovest/nord/nord-est) e inferiore a <math>0,20 \text{ W/m}^2\text{K}</math> (pareti opache orizzontali o inclinate)</b> oppure</li> <li>• Utilizzo alternativo di tecniche e materiali, anche innovativi, <b>ovvero coperture a verde</b>, che permettano in modo equivalente di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare</li> </ul>

# LA SOLLECITAZIONE TERMICA SULLA PARETE

## TEMPERATURA ESTERNA EQUIVALENTE

Temperatura uniforme dell'ambiente esterno con il quale la parete scambierebbe lo stesso flusso termico per irraggiamento e convezione scambiato con l'ambiente reale non uniforme

$$\theta_{e,eq} = \theta_e + \frac{F_r \cdot 5\varepsilon \cdot \Delta\theta_{er}}{h_e} + \frac{\alpha_s \cdot I}{h_e}$$

$F_r$  = fattore di vista tra la parete e la volta celeste

$\varepsilon$  = emissività della superficie esterna della parete [-]

$h_e$  = adduttanza termica esterna [W/m<sup>2</sup>K]

$\Delta\theta_{er}$  = differenza tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente della volta celeste [K]



# LA SOLLECITAZIONE TERMICA SULLA PARETE: ESEMPIO

Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica

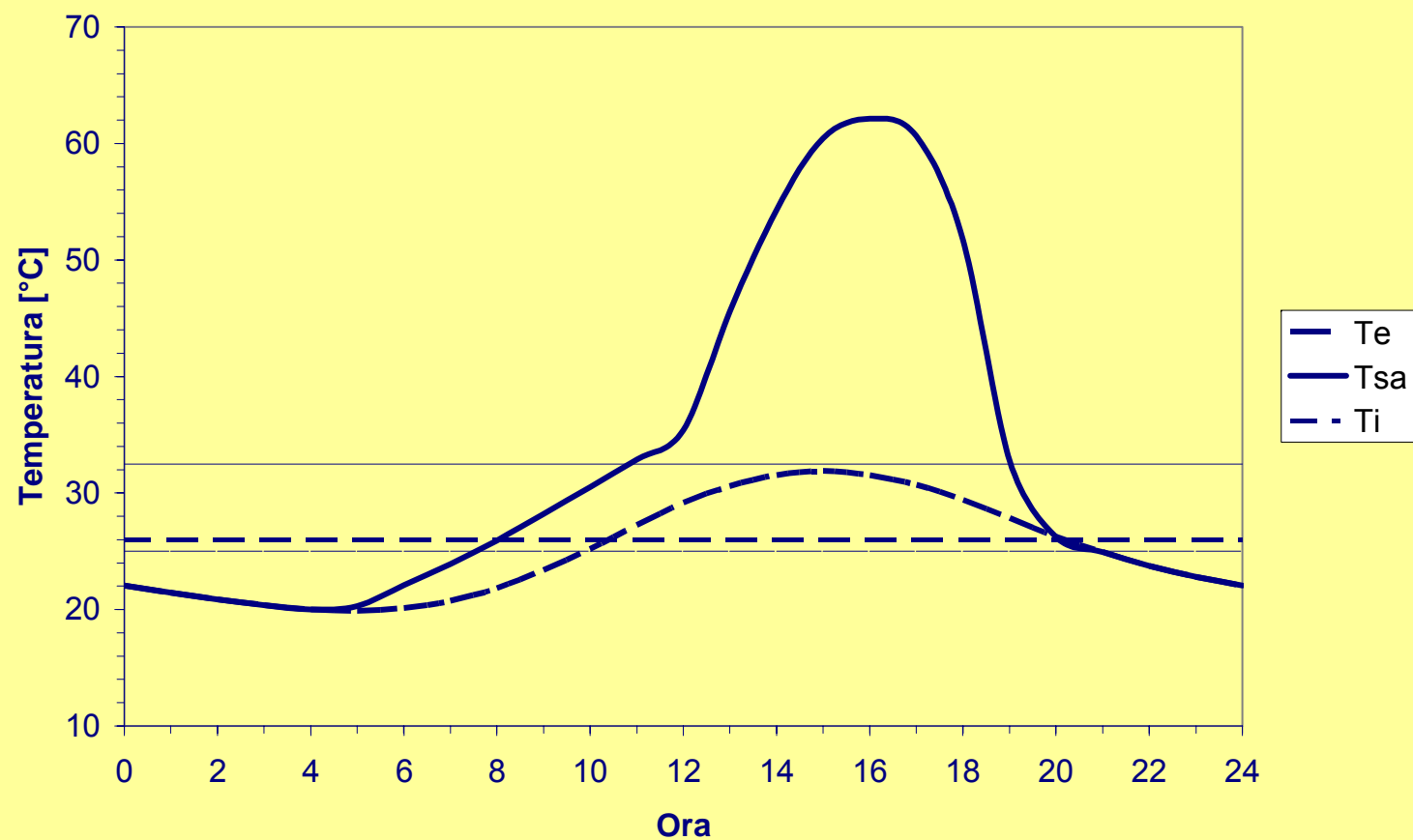
- Località: Milano
- Parete verticale esposta a Ovest
- Giorno estivo di progetto (15 Luglio)
- $h_e = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$                        $\alpha_{\text{sol}} = 0,6$

Ora	Temperatura [ °C]	Irradianza solare [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura esterna equivalente [°C]
3	20,4	0	20,4
6	20,1	49	22,1
9	23,4	120	28,2
12	29,1	156	35,4
15	31,9	714	60,5
18	29,4	558	51,7
21	24,9	0	24,9
24	22,1	0	22,1

# LA SOLLECITAZIONE TERMICA SULLA PARETE: ESEMPIO

Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica

- Località: Milano
- Parete verticale esposta a Ovest
- Giorno estivo di progetto (15 Luglio)



# METODO DELL'ANALISI ARMONICA

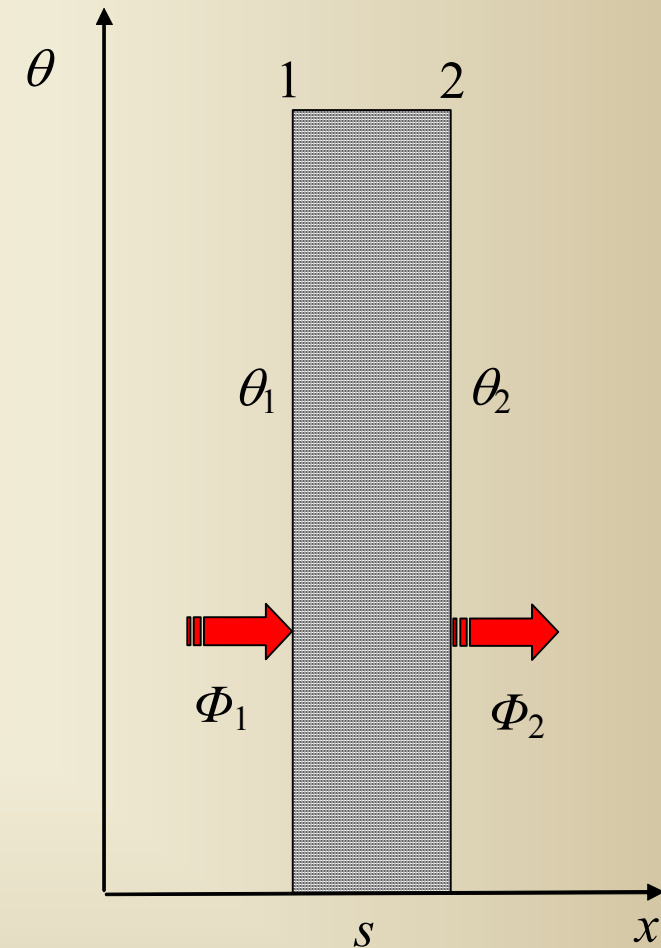
Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica

$$\theta_1 = \bar{\theta}_1 + \sum_{j=1}^n \tilde{\theta}_1^{(j)} = \bar{\theta}_1 + \sum_{j=1}^n \left| \hat{\theta}_1^{(j)} \right| \cos(\omega^{(j)}t + \psi_1^{(j)})$$

$$\theta_2 = \bar{\theta}_2 + \sum_{j=1}^n \tilde{\theta}_2^{(j)} = \bar{\theta}_2 + \sum_{j=1}^n \left| \hat{\theta}_2^{(j)} \right| \cos(\omega^{(j)}t + \psi_2^{(j)})$$

$$\Phi_1 = \bar{\Phi}_1 + \sum_{j=1}^n \tilde{\Phi}_1^{(j)} = \bar{\Phi}_1 + \sum_{j=1}^n \left| \hat{\Phi}_1^{(j)} \right| \cos(\omega^{(j)}t + \chi_1^{(j)})$$

$$\Phi_2 = \bar{\Phi}_2 + \sum_{j=1}^n \tilde{\Phi}_2^{(j)} = \bar{\Phi}_2 + \sum_{j=1}^n \left| \hat{\Phi}_2^{(j)} \right| \cos(\omega^{(j)}t + \chi_2^{(j)})$$



# MATRICE DI TRASFERIMENTO TERMICO DI UNO STRATO

Per uno strato piano omogeneo la relazione tra le funzioni sinusoidali che esprimono l'andamento di temperature e flussi sulle due facce dello strato è espressa da una matrice di numeri complessi:

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi)$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [ \cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi) ] \}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) ] \}$$

$$\xi = \frac{d}{\delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot c}} = \sqrt{\frac{a \cdot T}{\pi}}$$

# MATRICE DI TRASFERIMENTO TERMICO DI UNA PARETE

Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica



1 2 3 4

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = Z_{se} Z_N Z_{N-1} \dots Z_3 Z_2 Z_1 Z_{si}$$

$$Z_s = \begin{pmatrix} 1 & -R_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$R_s$  è la resistenza termica dello strato limitare

# LA TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA

## TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA, FATTORE DI ATTENUAZIONE E SFASAMENTO

Se la temperatura esterna varia con legge sinusoidale e periodo di 24 h:

- $\theta_e = \theta_{e,m} + \Delta\theta_{e,max} \cdot \cos(2\pi \cdot t / 24)$
- $\theta_i = \theta_{e,m}$

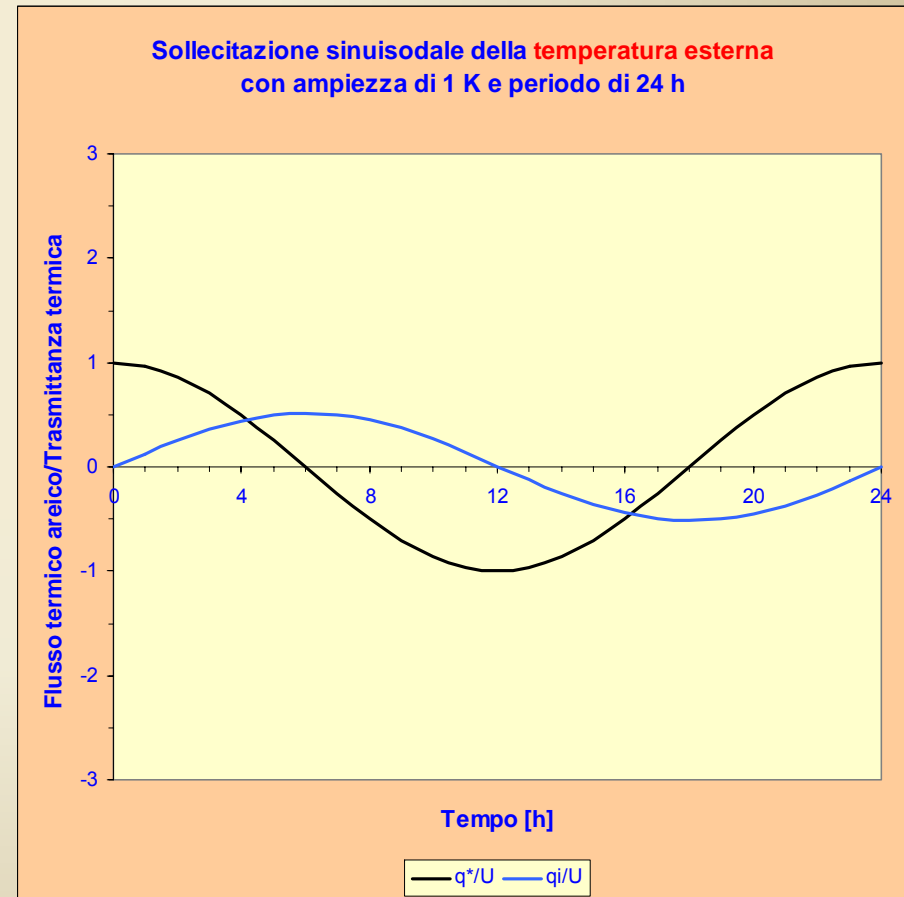
Il flusso termico areico sulla faccia interna della parete vale:

- in assenza d'inerzia termica →
  - $q_i^* = U \cdot \Delta\theta_{e,max} \cdot \cos(2\pi \cdot t / 24)$
- in presenza d'inerzia termica →
  - $q_i = f_a \cdot U \cdot \Delta\theta_{e,max} \cdot \cos(2\pi \cdot (t - \varphi_a) / 24)$
  - $= Y_{ie} \cdot \Delta\theta_{e,max} \cdot \cos(2\pi \cdot (t - \varphi_a) / 24)$

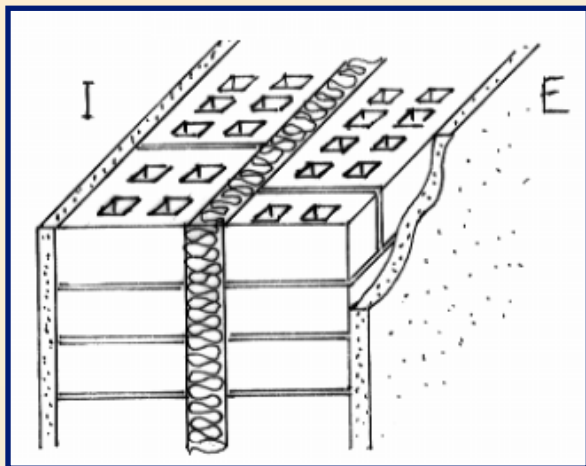
$f_a$  = fattore di attenuazione [-]

$\varphi_a$  = sfasamento o ritardo temporale [h]

$Y_{ie}$  = trasmittanza termica periodica [W/m<sup>2</sup>K]



## ESEMPIO DI CALCOLO DI PARAMETRI DINAMICI



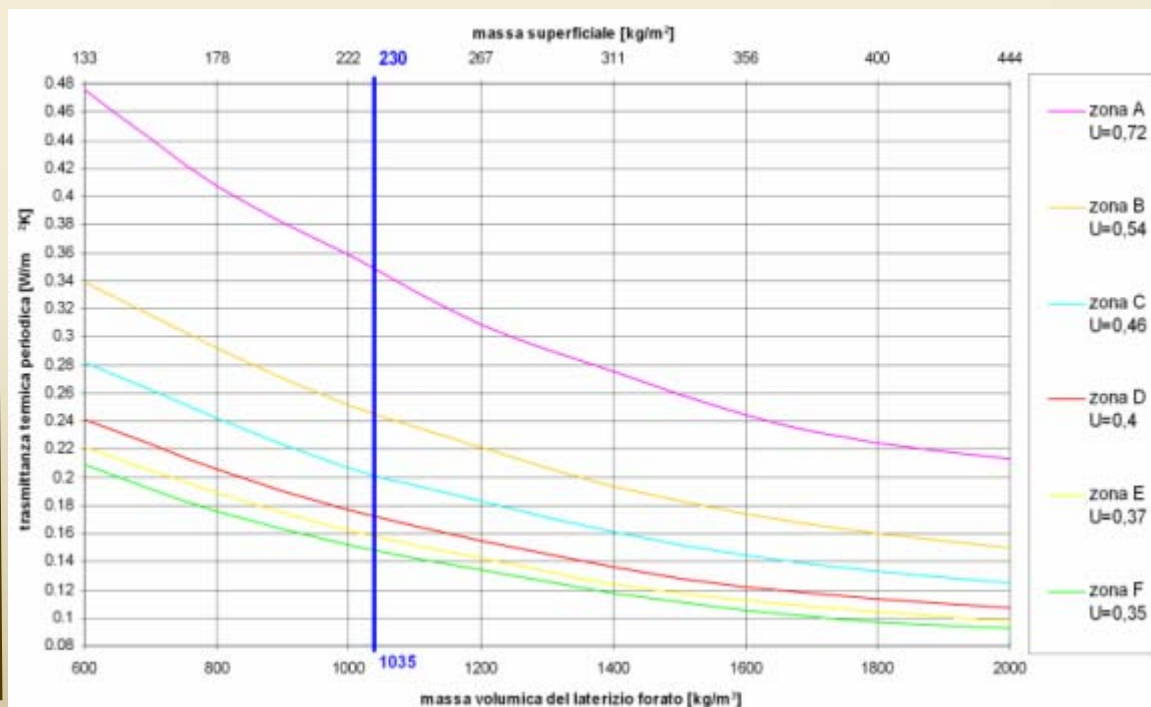
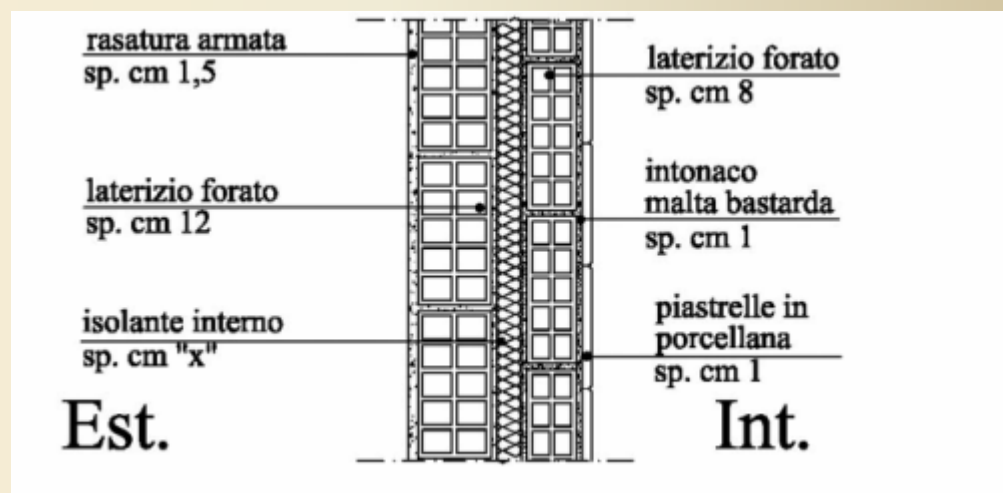
Stratigrafia		s	$\rho$	c	$\lambda$	R
(int-est)		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg°C]	[W/m°C]	[m <sup>2</sup> °C/W]
Strato liminare interno						0,13
I	Intonaco	2,0	1800	910	0,900	
II	Calcestruzzo	12,0	1200	840	0,430	
III	Polistirolo espanso	6,0	15	1220	0,054	
IV	Calcestruzzo	12,0	1200	840	0,430	
V	Intonaco	2,0	1800	910	0,900	
VI						
VII						
VIII						
IX						
X						
Strato liminare esterno						0,04

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna ( $Y_{ii}$ )	4,336 W/(m <sup>2</sup> K)	1,96 h
Ammettenza termica esterna ( $Y_{ee}$ )	6,308 W/(m <sup>2</sup> K)	3,04 h
Trasmittanza termica periodica ( $Y_{ie}$ )	<b>0,139 W/(m<sup>2</sup>K)</b>	-10,92 h
Capacità termica areica interna ( $\kappa_i$ )	<b>61,5 kJ/(m<sup>2</sup>K)</b>	
Capacità termica areica esterna ( $\kappa_e$ )	88,4 kJ/(m <sup>2</sup> K)	
Resistenza termica (R)	1,884 (m <sup>2</sup> K)/W	
Trasmittanza termica (U)	<b>0,531 W/(m<sup>2</sup>K)</b>	
Fattore di attenuazione (f)	<b>0,262</b>	

Spessore (s)	<b>34,0 cm</b>	
Massa superficiale (m)	<b>361 kg/m<sup>2</sup></b>	
Sfasamento ( $\varphi$ )	<b>10,92 h</b>	

# TRASM. TERMICA PERIODICA VS. ISOLAMENTO E MASSA

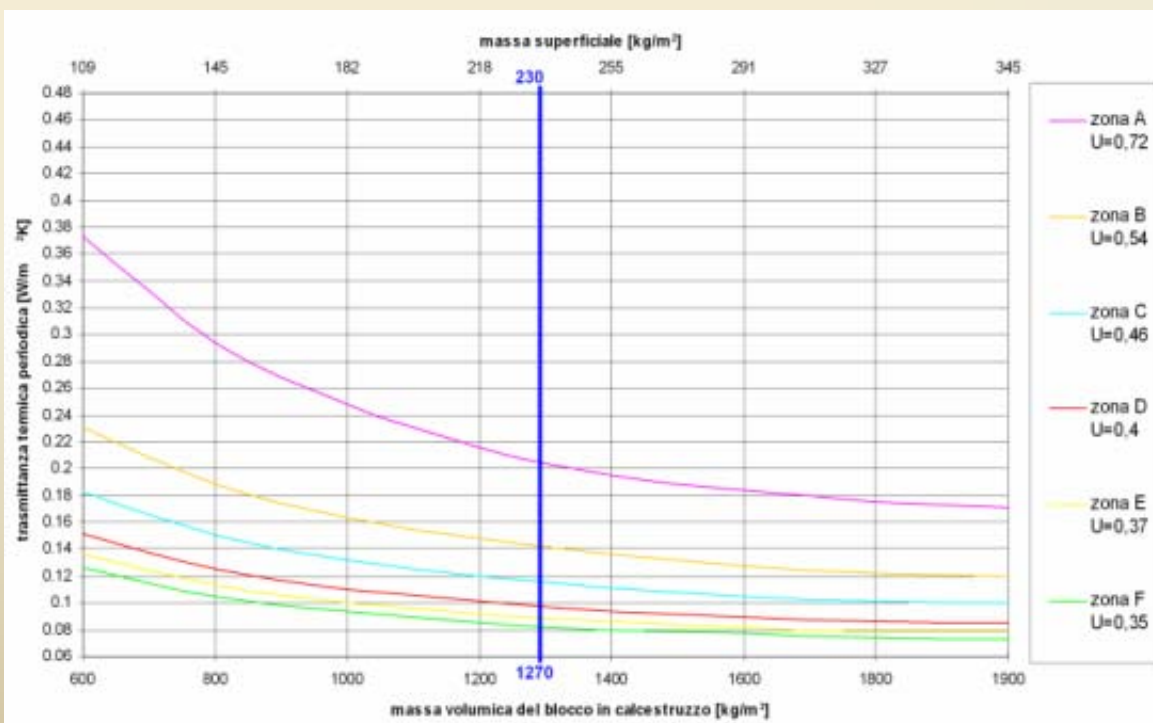
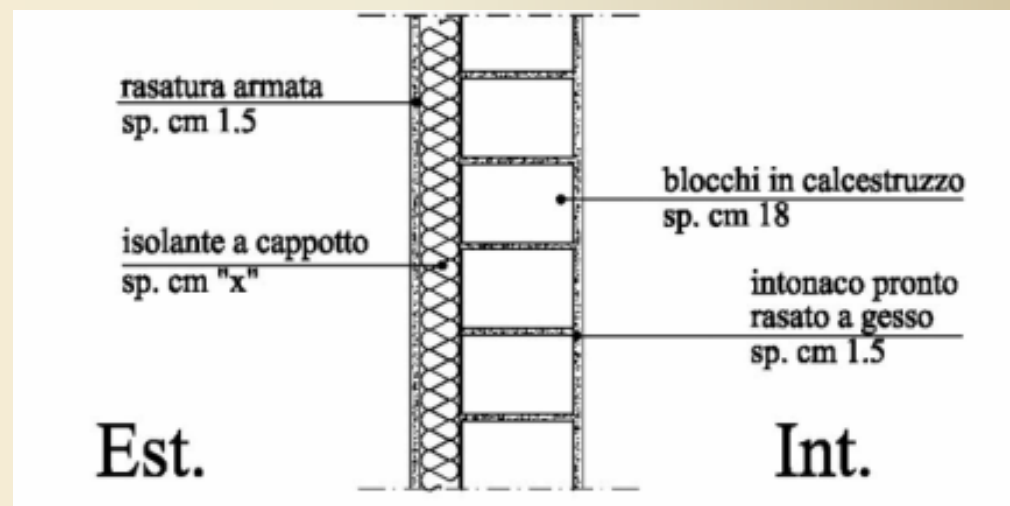
- Parete doppia
- Trasmittanza termica secondo D.Lgs. 311/06 (anno 2008)





# TRASM. TERMICA PERIODICA VS. ISOLAMENTO E MASSA

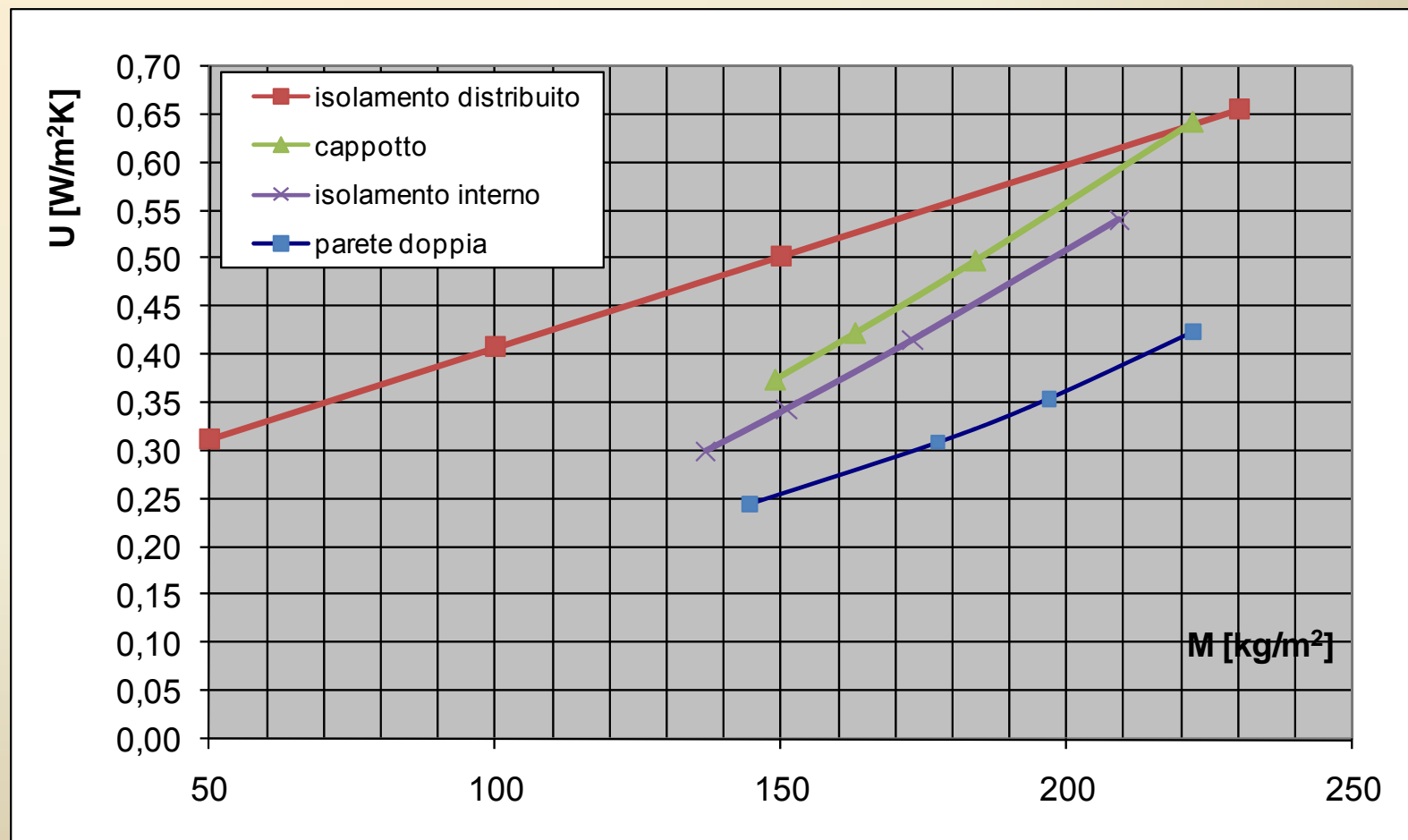
- Parete a cappotto
- Trasmittanza termica secondo D.Lgs. 311/06 (anno 2008)



# TRASM. TERMICA PERIODICA VS. ISOLAMENTO E MASSA

Definizione e calcolo della trasmittanza termica periodica

Curve a trasmittanza termica periodica costante



## CONCLUSIONI

- La trasmittanza termica periodica è il parametro più idoneo a caratterizzare la capacità di un componente edilizio di attenuare una sollecitazione termica periodica sulla sua faccia esterna quale è ad esempio la variazione dell'irraggiamento solare incidente.
- Il valore della trasmittanza termica periodica dipende sia dalla capacità di accumulo termico, sia dal grado di isolamento termico della parete: pertanto un limite di trasmittanza periodica lascia al progettista la scelta tra agire sull'isolamento o sulla massa.
- A parità di massa superficiale e di trasmittanza termica, la trasmittanza termica periodica varia anche in funzione della tipologia costruttiva (stratigrafia, posizione dell'isolante).
- Nelle zone più fredde, il maggiore grado d'isolamento termico richiesto, produce anche una riduzione della trasmittanza termica periodica tale da rendere superflua una massa elevata.
- Ulteriori approfondimenti sono necessari per soluzioni non convenzionali (pareti ventilate, uso di PCM).