

## COMPORTAMENTO TERMICO DELLE STRUTTURE OPACHE

**Regime stazionario**

le caratteristiche termofisiche *non dipendono* dal tempo  
 le temperature interna ed esterna non dipendono dal tempo:  
*temperature di progetto*

⇒ trasmittanza termica in regime stazionario **U**

**condizioni di progetto invernale: dimensionamento impianto**

**Regime variabile**

le caratteristiche termofisiche *dipendono* dal tempo  
 le temperature interna ed esterna dipendono dal tempo: *profili di temperatura*

⇒ capacità termica

sfasamento temporale dell'onda termica  
 smorzamento della potenza termica trasmessa

⇒ trasmittanza termica dinamica  $Y_{IE}$

**fabbisogno termico**

Francesca Cappelletti

1

Per la valutazione dello scambio termico in *regime stazionario* (indipendenza dal tempo) è possibile scrivere:

$$q_{trasmesso} = A \frac{(t_i - t_e)}{R_{totale}} = A \cdot U \cdot (t_i - t_e)$$

ovvero trattare i singoli materiali come resistenze termiche

Conduttive  $R_t = s/\lambda$

Convettive  $R_t = 1/h$

Radiante  $R_t = \frac{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}}{\sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$

U = trasmittanza termica della struttura =  $1/R_{tot}$

Francesca Cappelletti

2

La parete opaca si caratterizza con le seguenti proprietà:

spessori  $s$  [m];  
conducibilità termiche  $\lambda$  [W/(m K)];  
conduttanze  $C$  [W/(m<sup>2</sup> K)];  
densità  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>];  
calore specifico  $c$  [J/(kg K)]

La parete ha superficie  $A$  [m<sup>2</sup>]

la resistenza totale di scambio  $R_{tot}$  è la somma delle resistenze termiche definite di seguito (UNI EN ISO 6946):

$$R_{tot} = R_t + R'_t + R_{si} + R_{se}$$

$R_t$  = resistenza termica di strato omogeneo;

$R'_t$  = resistenza termica di strato non omogeneo;

$R_{si}$  = resistenza superficiale interna;

$R_{se}$  = resistenza superficiale esterna.

$R_t$  = resistenza termica di uno strato omogeneo di spessore  $s$  [m] e conducibilità termica  $\lambda$  [W/(m K)]:

$$R_t = \frac{s}{\lambda} \left[ \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

$\lambda$  è ricavata da valori tabulati o secondo UNI EN ISO 10456

$R'_t$  = resistenza termica di uno strato non omogeneo di spessore  $s$  [m] e conduttanza termica  $C$  [W/(m<sup>2</sup> K)]:

$$R'_t = \frac{1}{C} \left[ \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

[(m <sup>2</sup> K)/W]	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R <sub>si</sub>	0,10	0,13	0,17
R <sub>se</sub>	0,04	0,04	0,04

Per pareti verticali, andranno utilizzate le resistenze riportate nella colonna centrale.

Un flusso termico ascendente è considerato tale su soffitti disperdenti; un flusso termico è discendente sotto pavimenti disperdenti.

E' considerato orizzontale anche un flusso termico inclinato fino a  $\pm 30^\circ$  sul piano orizzontale.

### Trasmittanze termiche limite D.Lgs. 311 (dal 2010) [W/(m<sup>2</sup> K)]

Zona climatica	Parete verticale	Copertura	Pavimento verso locale non risc.	Finestra
A	0,62	0,38	0,65	4,6
B	0,48	0,38	0,49	3,0
C	0,40	0,38	0,42	2,6
D	0,36	0,32	0,36	2,4
E	0,34	0,30	0,33	2,2
F	0,33	0,29	0,32	2,0

# 1

## PER L'ESERCITAZIONE PROGETTUALE

Informazioni da reperire:

- 1) Gradi giorno della località di progetto
- 2) Sulla base dei gradi giorno, individuare la zona climatica
- 3) Sulla base della zona climatica individuare i requisiti di involucro edilizio che devono essere rispettati

# 2

## PER L'ESERCITAZIONE PROGETTUALE

Preparare un foglio Excel in cui siano preparate delle tabelle contenenti le seguenti colonne:

- Materiale
- Spessore
- Conducibilità termica
- Densità
- Calore specifico
- Permeabilità all'aria
- Resistenza termica

AGGIUNGERE PER OGNI COMPONENTE UNA CELLA DI CALCOLO PER:

- Resistenza termica totale
- Trasmittanza termica stazionaria

2

Parete 1	Trasmissione nominale	W/m²K		cond.tà λ	Rt da perizia calore specifico	perm.tà δ	Resistenza termica
		spessore	densità				
Posizione		m	kg/m³	W/(m K)	kJ/(kg K)	ng/(m s Pa)	
Tipo							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
Totale							

Francesca Cappelletti

9

## Energia scambiata per trasmissione attraverso l'involucro edilizio

### Procedura di calcolo

Energia scambiata per trasmissione per ogni mese:

$$Q_T = H_T (\theta_i - \theta_e) t$$

$H_{T,k}$  = coefficiente di scambio termico con l'ambiente a temperatura  $\theta_e$ ;  
 $\theta_i$  = temperatura interna di regolazione della zona termica o dell'edificio;  
 $t$  = periodo di calcolo [s]  
 $H_T$  è calcolato in accordo con UNI EN 13789- 2008  
 $\theta_e$  = temperatura esterna (media mensile)

Francesca Cappelletti

11

Per computare il coefficiente di scambio termico per trasmissione  $H_T$  :

$$H_T = H_D + H_S + H_U$$

$H_S$  è il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno

$H_U$  è il coefficiente di scambio termico tra spazio riscaldato e spazio non riscaldato

**$H_D$  è il coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno:**

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j$$

$A_i$  = superficie dell'elemento  $i$ -esimo dell'involucro edilizio [ $m^2$ ];

$U_i$  = trasmittanza termica dell'elemento  $i$ -esimo [ $W/(m^2K)$ ];

$l_k$  = lunghezza del ponte termico lineare, [m];

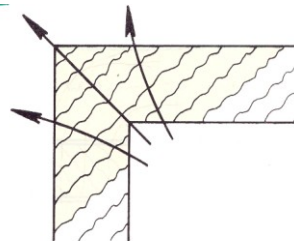
$\Psi_k$  = trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare  $k$ , [ $W/(m K)$ ];

$\chi_j$  = trasmittanza termica puntuale del ponte termico  $j$ , [ $W/K$ ]

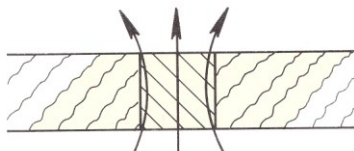
## Ponte termico

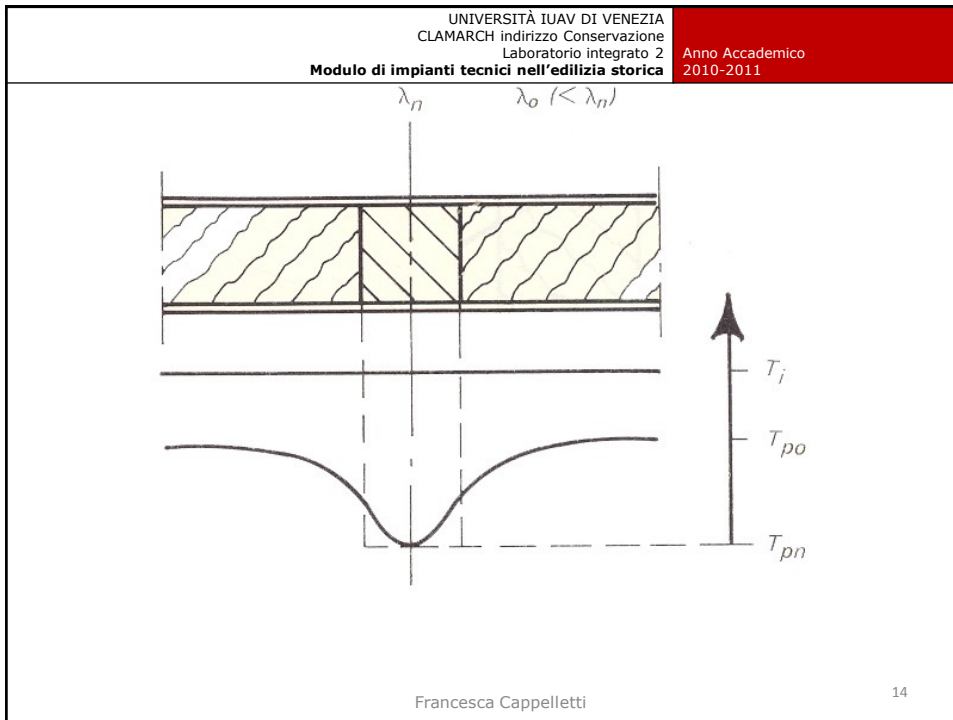
Il ponte termico è una configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico dalla condizione di flusso monodirezionale tra superficie interna ed esterna di una parete.

a) Ponte termico di forma



b) Ponte termico di struttura





UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA  
CLAMARCH indirizzo Conservazione  
Laboratorio integrato 2  
**Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica**

Anno Accademico  
2010-2011

## Effetti del ponte termico

- aumento delle dispersioni termiche
- disomogeneità di temperatura su superficie interna

### Caratterizzazione

- **Trasmittanza termica lineica o coefficiente lineico  $\Psi$  [W/(m K)]**
- Coefficiente di eterogeneità di temperatura superficiale interna  $\rho_m$

$$\rho_m = \frac{T_i - T_{p,n}}{T_i - T_{p,o}}$$

$T_i$  = temperatura aria interna;  
 $T_{p,n}$  = temperatura sulla sup. interna nella zona del ponte termico;  
 $T_{p,o}$  = temperatura sulla sup. interna nella zona indisturbata

Francesca Cappelletti

15

## Calcolo del flusso termico attraverso i ponti termici

Il calcolo dei flussi termici dovuti ai ponti termici può essere effettuato con precisione utilizzando metodi numerici dettagliati in accordo con :

- UNI EN ISO 10211-1      flusso termico tridimensionale e flusso termico bidimensionale
- UNI EN ISO 14683      consente di calcolare i flussi termici attraverso metodi semplificati in corrispondenza alle giunzioni tra elementi di edifici

Generalmente l'influenza dei ponti termici puntuali, esplicitata dal termine  $\chi_i$ , può essere trascurata.

La trasmittanza termica lineica  $\Psi$  può essere determinata con la relazione:

$$\Psi = L^{2D} - \sum U_i l_i$$

$L^{2D}$  è il coefficiente di accoppiamento termico lineico ottenuto con un calcolo bidimensionale del componente che separa i due ambienti considerati;

$U_i$  è la trasmittanza termica dell'i-esimo componente monodimensionale che separa i due ambienti considerati;

$l_i$  è la lunghezza del modello geometrico bidimensionale cui si applica il valore  $U_i$ .

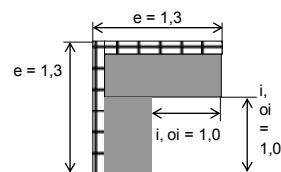
## Metodo

I coefficienti lineici  $\psi$  possono essere ricavati secondo UNI EN ISO 10211 considerando le ipotesi di

- regime stazionario
- flusso bidimensionale

$$L_{2D} = \frac{\Phi_l}{(\theta_i - \theta_e)} \quad [W/(m \cdot K)]$$

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \quad [W/(m \cdot K)]$$



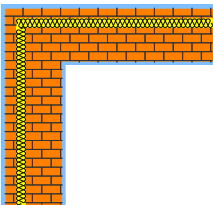
Il flusso termico attraverso i ponti termici può essere calcolato utilizzando dei programmi di simulazione.



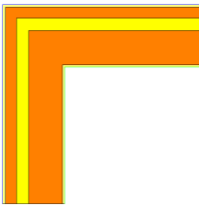
UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA  
CLAMARCH indirizzo Conservazione  
Laboratorio integrato 2  
**Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica**

Anno Accademico  
2010-2011

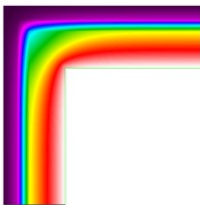
MODELLO CAD



MODELLO THERM



ANDAMENTO  
ISOTERME



$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j$$

Flusso termico bidimensionale	L <sub>2D</sub> = 0.38 W/(m K)
Trasmittanza termica parete:	U = 0.15 W/(m <sup>2</sup> K)
Lunghezza interna parete:	l <sub>int</sub> = 1 m
<b>Trasmittanza termica lineare:</b>	<b>Ψ = 0.08 W/(m K)</b>

Francesca Cappelletti

18

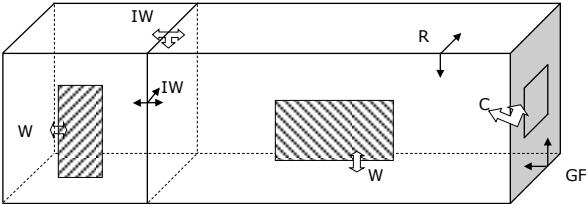
UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA  
CLAMARCH indirizzo Conservazione  
Laboratorio integrato 2  
**Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica**


Anno Accademico  
2010-2011

## UNI EN ISO 14683:2008

Secondo la codifica fornita dalla norma i ponti termici sono classificati attraverso l'uso di lettere che corrispondono al tipo di nodo associate ad un numero che differenzia i dettagli a seconda della modalità di posa dell'isolante termico.

- angoli C
- solaio interpiano: IF
- solaio di copertura: R
- terrazzi: B
- solaio a terra: GF
- partizioni interne: IW
- serramenti: W





Francesca Cappelletti

19

UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA CLAMARCH indirizzo Conservazione Laboratorio integrato 2 Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica				Anno Accademico 2010-2011
<b>UNI EN ISO 14683</b>				
F1 $\Psi_e = 0,00$ $\Psi_{oi} = 0,00$ $\Psi_i = 0,05$ $L^{2D} = 0,74$ 	F2 $\Psi_e = 0,80$ $\Psi_{oi} = 0,80$ $\Psi_i = 0,90$ $L^{2D} = 1,56$ 	F3 $\Psi_e = 0,75$ $\Psi_{oi} = 0,75$ $\Psi_i = 0,80$ $L^{2D} = 1,50$ 	F4 $\Psi_e = 0,55$ $\Psi_{oi} = 0,55$ $\Psi_i = 0,60$ $L^{2D} = 1,36$ 	
F5 $\Psi_e = 0,60$ $\Psi_{oi} = 0,60$ $\Psi_i = 0,65$ $L^{2D} = 1,33$ 	F6 $\Psi_e = 0,65$ $\Psi_{oi} = 0,65$ $\Psi_i = 0,70$ $L^{2D} = 1,40$ 	F7 $\Psi_e = 0,65$ $\Psi_{oi} = 0,65$ $\Psi_i = 0,70$ $L^{2D} = 1,41$ 	F8 $\Psi_e = 0,20$ $\Psi_{oi} = 0,20$ $\Psi_i = 0,30$ $L^{2D} = 0,99$ 	
Parete	Parete leggera	Strato isolante	Soletta/pilastro	Telaio
Francesca Cappelletti				20

UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA CLAMARCH indirizzo Conservazione Laboratorio integrato 2 Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica				Anno Accademico 2010-2011
<h2>Massa superficiale</h2>				
È la massa di tutti i materiali costituenti la struttura compresi i giunti di malta, ma esclusi gli intonaci.				
$Ms = \sum \rho_i s_i$				
$\rho$ = densità del primo strato interno (escluso intonaco)				
$s$ = spessore dello strato di materiale omogeneo [m]				
Francesca Cappelletti				22

## Capacità termica $C_m$

E' la capacità del materiale di immagazzinare una significativa quantità di energia termica e di ritardarne le riemissione:

$$C_m = \sum_j \kappa_j A_j$$

$\kappa$  = capacità termica areica secondo UNI EN ISO 13786 dell'elemento j-esimo

$A$  = superficie dell'elemento j-esimo

Sono considerati tutti gli elementi in contatto diretto con l'aria ambiente interno.

In forma semplificata la capacità termica areica è data da:

$$\kappa = \sum_i c_i \rho_i d_i$$

## Capacità termica $C_m$

In forma semplificata la capacità termica areica è data da:

$$\kappa = \sum_i c_i \rho_i d_i$$

Dove  $d$  è il minimo tra:

- metà spessore della parete
- lo spessore di tutti i materiali compresi tra la zona di interesse e il primo strato isolante
- 10 cm dall'interno

## 2

### PER L'ESERCITAZIONE PROGETTUALE

Preparare un foglio Excel in cui siano preparate delle tabelle contenenti le seguenti colonne:

- Materiale
- Spessore
- Conducibilità termica
- Densità
- Calore specifico
- Permeabilità all'aria
- Resistenza termica

AGGIUNGERE PER OGNI COMPONENTE UNA CELLA DI CALCOLO PER:

- Resistenza termica totale
- Trasmittanza termica stazionaria
- **Massa superficiale**
- **Capacità termica areica**

Francesca Cappelletti

25

### COMPORAMENTO DINAMICO

Poniamo che la temperatura superficiale esterna della parete,  $T_s$ , in conseguenza dell'andamento della temperatura esterna abbia un andamento sinusoidale espresso dalla relazione seguente:

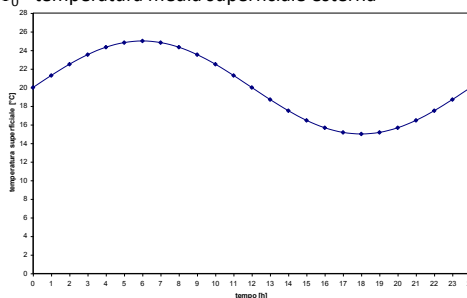
$$T_s = T_0 + A \sin(\omega t)$$

$A$  = ampiezza dell'oscillazione di temperatura ( $T_{\max} - T_{\text{media}}$ )

$\omega = 2\pi/\tau_T$  = pulsazione

$\tau_T$  = periodo, tempo necessario affinché si verifichi una oscillazione completa di temperatura (24h)

$T_0$  = temperatura media superficiale esterna



Andamento sinusoidale della temperatura esterna intorno a un valore medio di 20°C e con ampiezza di 5°C.

Francesca Cappelletti

26

l'equazione generale della conduzione può assumere la forma seguente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Integrando l'equazione differenziale con la condizione al contorno si ottiene la seguente funzione soluzione:

$$T = T_0 + A e^{(-\gamma x)} \text{sen}(\omega \tau - \gamma x)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \sqrt{\frac{\pi c \rho}{P \lambda}} \quad \text{costante di smorzamento dell'onda termica}$$

#### Osservazione n°1

L'oscillazione di temperatura alla generica ascissa di profondità  $x_a$  presenta lo stesso periodo dell'oscillazione imposta in  $x = 0$  nello stesso generico istante  $t$

#### Osservazione n°2

L'oscillazione di temperatura alla generica ascissa di profondità  $x_a$  risulta in ritardo (sfasata) rispetto alla oscillazione imposta in  $x = 0$

#### Osservazione n°3

L'oscillazione di temperatura alla generica ascissa di profondità  $x_a$  risulta smorzata rispetto alla oscillazione imposta in  $x = 0$

#### Osservazione n°4:

Lo smorzamento e lo sfasamento aumentano al crescere della distanza  $x$

Lo smorzamento e lo sfasamento aumentano al crescere del parametro  $\gamma$  e quindi al diminuire della diffusività termica, ovvero all'aumentare del calore specifico e della densità del materiale

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \sqrt{\frac{\pi c \rho}{P \lambda}}$$

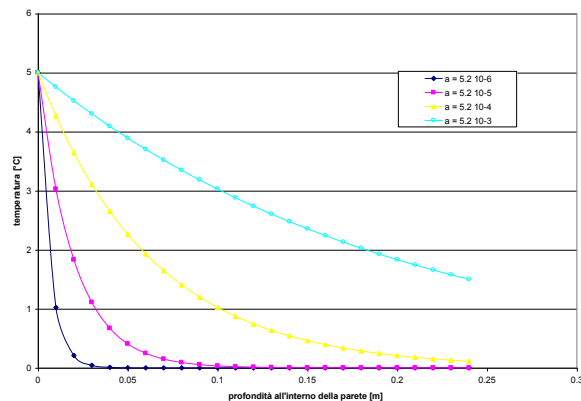
$$\omega = 2 \pi / P$$

$P$  = periodo (es. 24 h = 86 600 s)

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

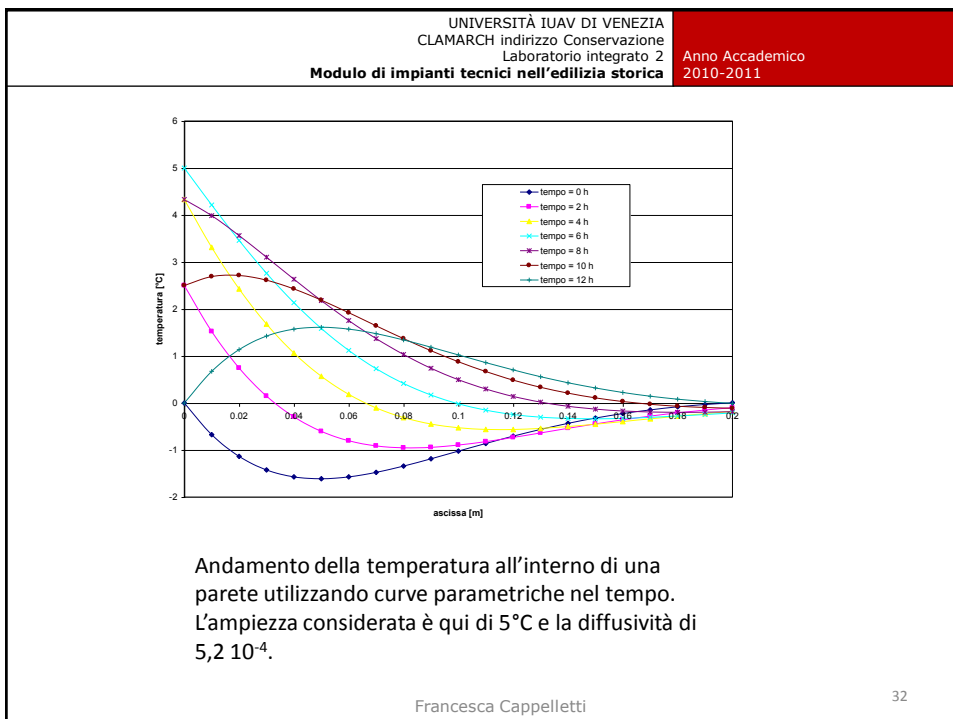
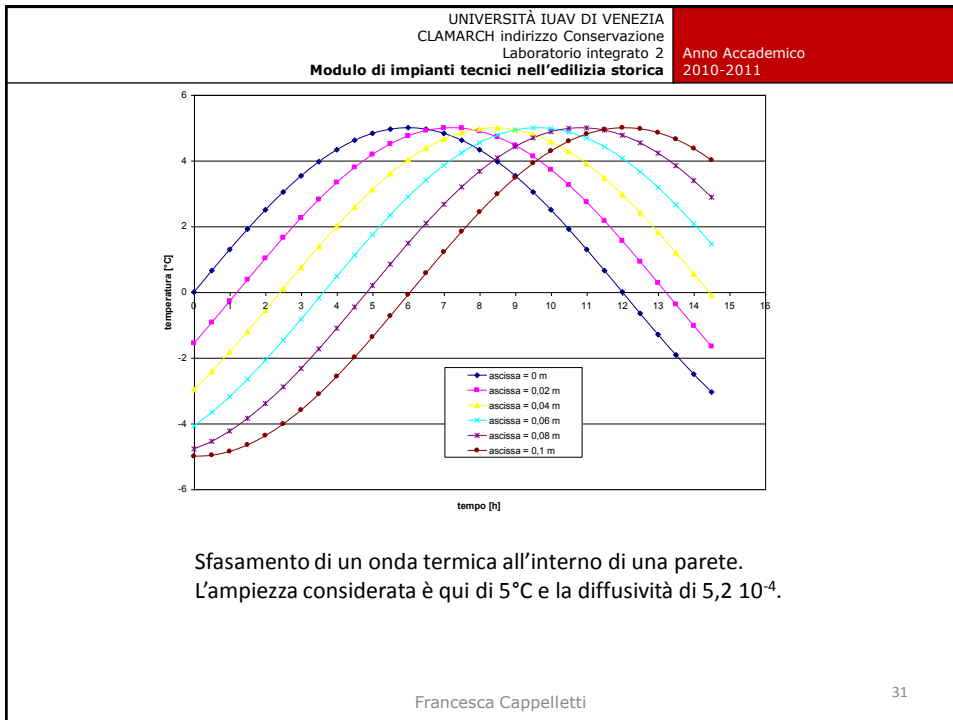
$\rho$  = densità [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $\lambda$  = conducibilità termica [ $\text{W}/(\text{m K})$ ]

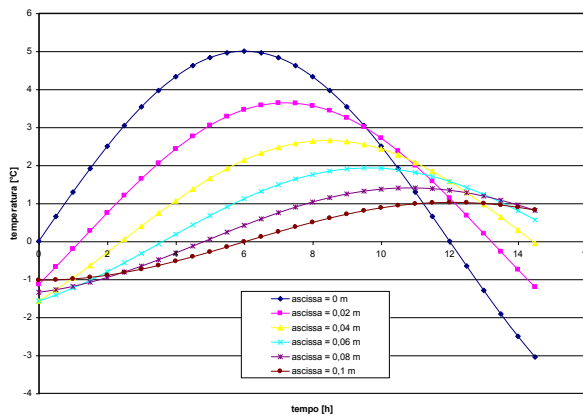
$c$  = calore specifico [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]



Smorzamento dell'ampiezza di oscillazione di un'onda termica all'interno di una parete.

L'ampiezza considerata è qui di 5°C. Si tenga presente che la diffusività di  $5,2 \cdot 10^{-4}$  corrisponde a quella di una parete in mattoni.





Andamento della temperatura nel tempo per una parete in diversi punti. L'ampiezza considerata è qui di 5°C e la diffusività di  $5,2 \cdot 10^{-4}$ .

Francesca Cappelletti

33

## DPR 59/09

### DPR 59 – 2009 Art. 1, comma 4

#### Definizioni

Trasmittanza termica periodica  $Y_{IE}$   $W/(m^2K)$ , e' il parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore, definita e determinata secondo la norma UNI EN ISO 13786:2008 e successivi aggiornamenti.

Francesca Cappelletti

34



## DPR 59/09

Il progettista "esegue, in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva,  $I_{m,s} \geq 290 \text{ W/m}^2$ :

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

- 1.1 che il valore della massa superficiale  $M_s$ , di cui al comma 22 dell'allegato A, sia superiore a  $230 \text{ kg/m}^2$ ;
- 1.2 che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica ( $Y_{IE}$ ), di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a  $0,12 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ ;

2) relativamente a tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica  $Y_{IE}$ , di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a  $0,20 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

## 3

### PER L'ESERCITAZIONE PROGETTUALE

Informazioni da reperire/verificare:

- 1) valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva,  $I_{m,s} \geq 290 \text{ W/m}^2$

UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA  
CLAMARCH indirizzo Conservazione  
Laboratorio integrato 2  
Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica

Anno Accademico  
2010-2011

**Trasmittanza Termica Periodica**

$\theta_e = \theta_0 + A \sin(\omega t)$

$q_i = q_0 + B \sin[\omega(t + \Delta t)]$

$A =$  ampiezza escursione termica  
 $B =$  ampiezza escursione flusso  
 $P =$  periodo (24 h)  
 $\omega = 2\pi/P =$  freq. ang.

Francesca Cappelletti 37

UNIVERSITÀ IUAV DI VENEZIA  
CLAMARCH indirizzo Conservazione  
Laboratorio integrato 2  
Modulo di impianti tecnici nell'edilizia storica

Anno Accademico  
2010-2011

La **trasmittanza termica periodica** tra esterno ed interno è definita come:

$$Y_{ie} = B/A = Uf \quad [W/(m^2 K)]$$

La potenza termica max trasmessa è quindi pari a:

$$q_{max} = U(\vartheta_e - \vartheta_i) + A Y_{ie} \quad [W/m^2]$$

$$q_{max} = U[(\vartheta_e - \vartheta_i) + Af] \quad [W/m^2]$$

Francesca Cappelletti 38

In regime estivo (quando la temperatura media esterna è circa uguale a quella interna) è "come se" la trasmittanza termica stazionaria  $U$  venisse *maggiorata* di una quantità pari a:

$$Y_{ie} A / (\vartheta_e - \vartheta_i) = U f A / (\vartheta_e - \vartheta_i)$$

$Y_{ie}$  = trasmittanza termica periodica

$f$  = fattore di attenuazione

$A$  = semiampiezza dell'escursione termica

## Un esempio: il tetto

descrizione (dall'interno)	s	$\lambda$	$\rho$	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 impermeabilizzante	0,0015	0,1	680	1700
coppi	0,02	2	1250	2700

$$U_{copertura} = 0,291 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$M_s = 86,1 \text{ kg}/\text{m}^2$$

$$Y_{IE} = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$\text{time shift} = 9,31 \text{ [h]}$$

## Alcuni criteri di valutazione

- Grandi capacità termiche determinano un aumento del ritardo temporale con cui il fenomeno superficiale viene riprodotto all'interno
- In generale si può dire che:
  - Un aumento di spessore della parete comporta un ritardo temporale con cui i picchi di oscillazione si verificano (= aumento dello sfasamento)
  - Un aumento della capacità termica areica comporta un aumento del fattore di decremento (= riduzione in ampiezza delle oscillazioni periodiche)

## E per gli edifici esistenti?

- Nel caso di edifici esistenti le proprietà dei materiali sono solo ipotizzabili a meno di non andare ad eseguire dei carotaggi di materiale da analizzare in laboratorio
- Le misure in opera sono di difficile e lunga esecuzione
- Le fonti in cui ricercare indicazioni sono:
  - Normativa tecnica (UNI/TS 11300 parte 1; UNI 10351)
  - Fonti bibliografiche (manuali, manuale Ashrae...)

