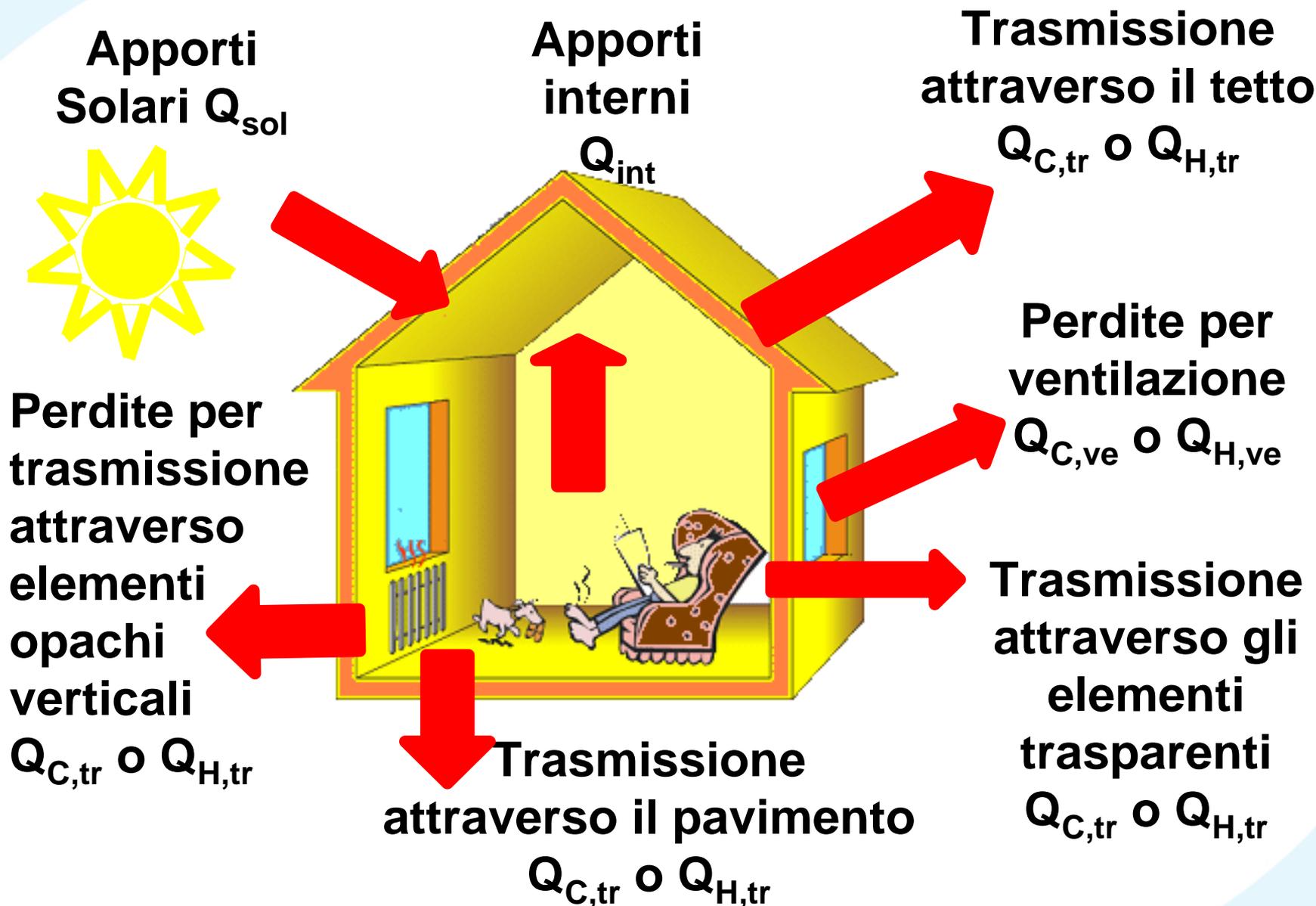


EFFICIENZA ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Fabbisogno energetico degli edifici e ponti termici

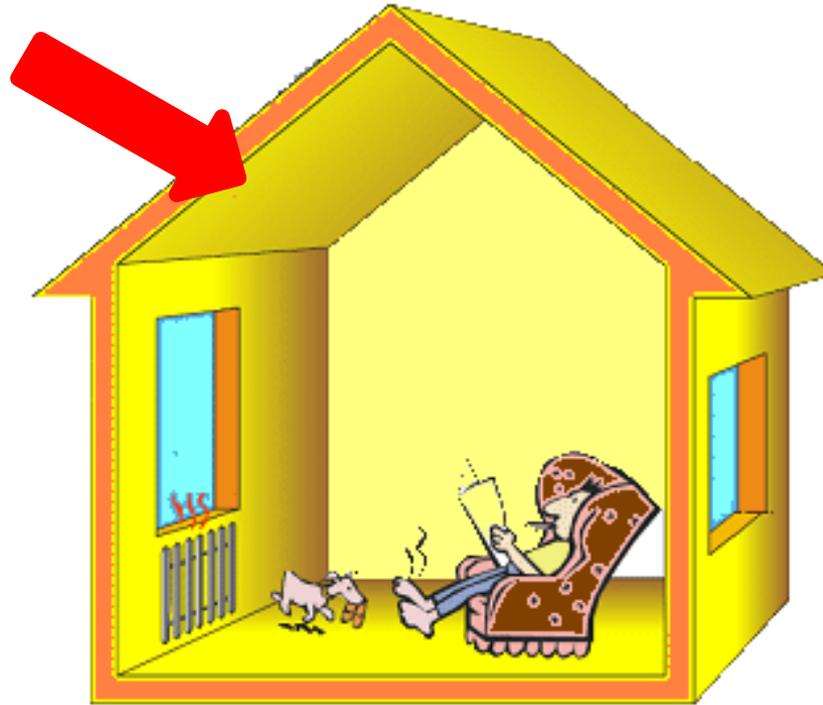
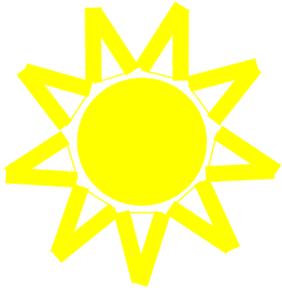
Prof. Paola Ricciardi

DISPERSIONI TERMICHE



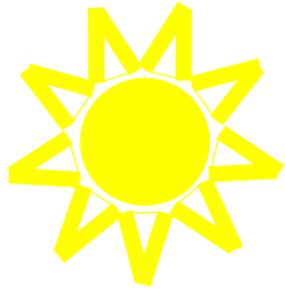
DISPERSIONI TERMICHE

Apporti
Solari Q_{sol}



Q_{sol} sono gli apporti solari, in MJ

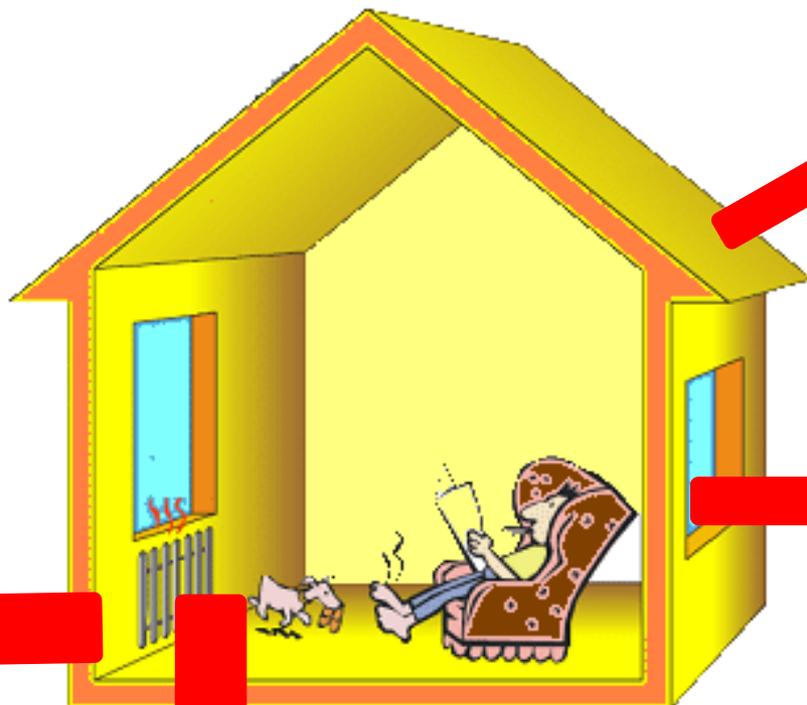
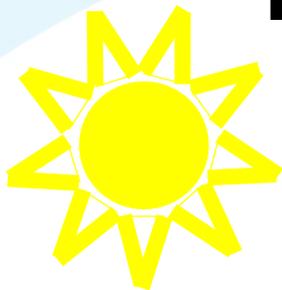
DISPERSIONI TERMICHE



Apporti
interni
 Q_{int}

Q_{int} sono gli apporti interni, in MJ

DISPERSIONI TERMICHE



Trasmissione
attraverso il tetto

$$Q_{C,tr} \text{ o } Q_{H,tr}$$

Perdite per
trasmissione
attraverso
elementi
opachi
verticali

$$Q_{C,tr} \text{ o } Q_{H,tr}$$

Trasmissione
attraverso gli
elementi
trasparenti

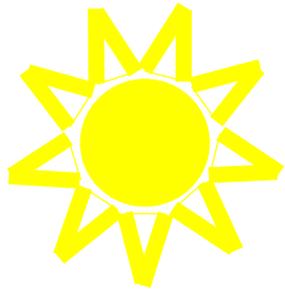
$$Q_{C,tr} \text{ o } Q_{H,tr}$$

Trasmissione
attraverso il pavimento $Q_{C,tr} \text{ o } Q_{H,tr}$

$Q_{C,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di
raffrescamento, in MJ

$Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di
riscaldamento, in MJ

DISPERSIONI TERMICHE



Trasmissione
attraverso gli
elementi
trasparenti
 $Q_{C,tr}$ o $Q_{H,tr}$

$Q_{C,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di
raffrescamento, in MJ

$Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di
riscaldamento, in MJ

DISPERSIONI TERMICHE



Perdite per
ventilazione
 $Q_{C,ve}$ o $Q_{H,ve}$

$Q_{C,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di
raffrescamento, in MJ

$Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di
riscaldamento, in MJ

UNI EN ISO 13790:2008 - Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento

UNI EN ISO 13789:2008 - Prestazione termica degli edifici - Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione - Metodo di calcolo

Nota: In Italia è la specifica tecnica UNI/TS 11300-1 che definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790 e sostituisce la UNI EN ISO 13789.

UNI EN ISO 13790:2008 - Calcolo degli scambi termici

Per ogni zona dell'edificio gli scambi termici per riscaldamento si calcolano: $Q_{H,tr}$

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t$$

$H_{tr,adj}$ = coefficiente di scambio termico espresso in W/K

$\theta_{int,set,H}$ = temperatura interna espressa in °C

θ_e = temperatura media esterna espressa in °C

t = tempo: durata del mese espressa in Ms (10^6 s)

$F_{r,k}$ = fattore di forma tra componente edilizio e volta celeste

$\phi_{r,mn,k}$ = extra flusso dovuto alla radiazione infrarossa dal componente edilizio mediato nel tempo espresso in W

UNI EN ISO 13790:2008 - Calcolo del fabbisogno di energia

Il coefficiente di scambio termico : $H_{tr, adj}$

$$H_{tr, adj} = H_D + H_g + H_u + H_A$$

H_D = coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso ambiente esterno, espresso in W/K

H_g = coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno, espresso in W/K

H_u = coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione attraverso gli ambiente non climatizzati, espresso in W/K

H_A = coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone climatizzate a temperatura diversa, espresso in W/K

↓ **Calcolo H_D**

COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno UNI EN ISO 13789:2008

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum I_k \Psi_k + \sum \chi_j \quad [\text{W/K}]$$

A_i = area dell'elemento di edificio i, [m²]

U_i = trasmittanza termica dell'elemento i [W/(m²K)]

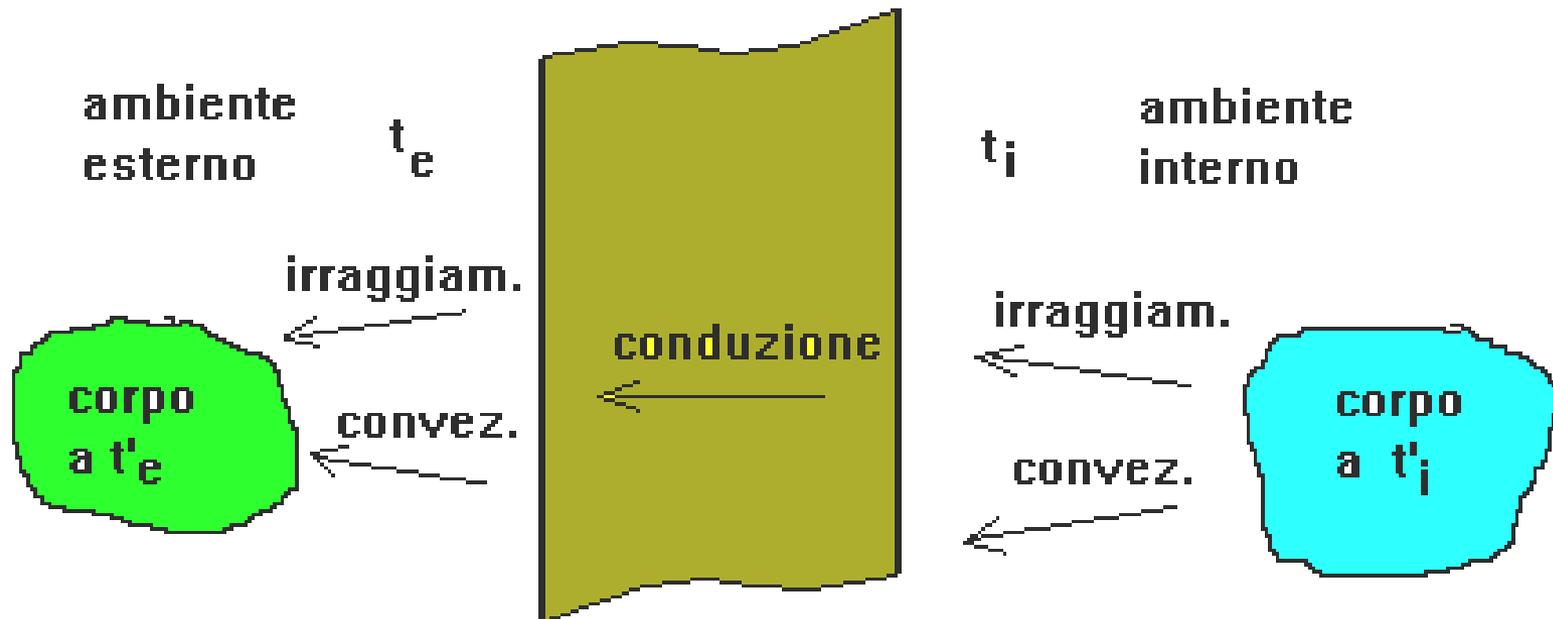
I_k = lunghezza di ogni giunto [m]

Ψ_k = trasmittanza lineica [W/mK]

χ_j = trasmittanza termica di punto - ponte termico di punto [W/K]

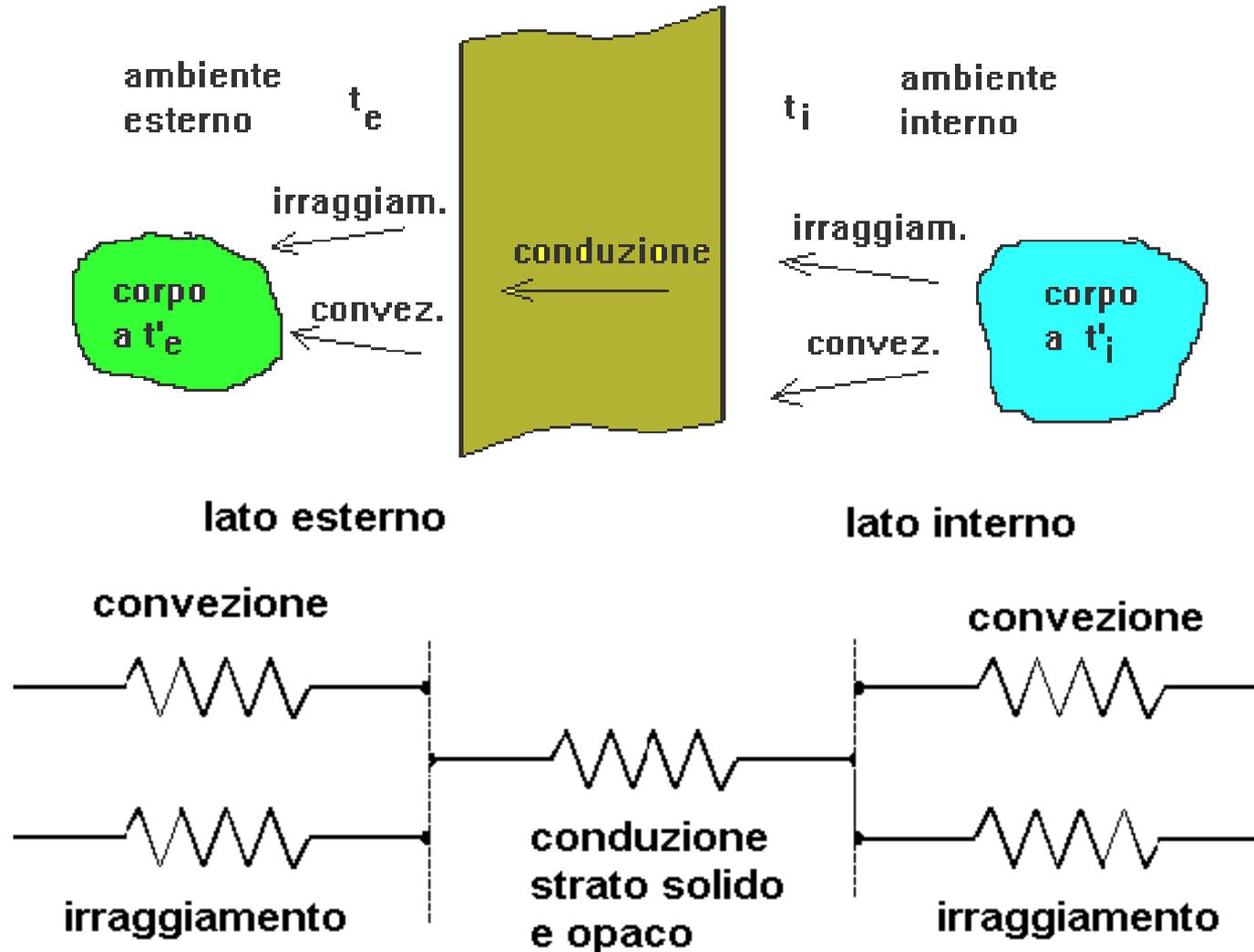
Calcolo di U

U- TRASMITTANZA TERMICA – per la valutazione del coefficiente globale di scambio termico



**Meccanismi combinati di scambio termico attraverso
una superficie piana**

U – CALCOLO MEDIANTE RESISTENZE TERMICHE

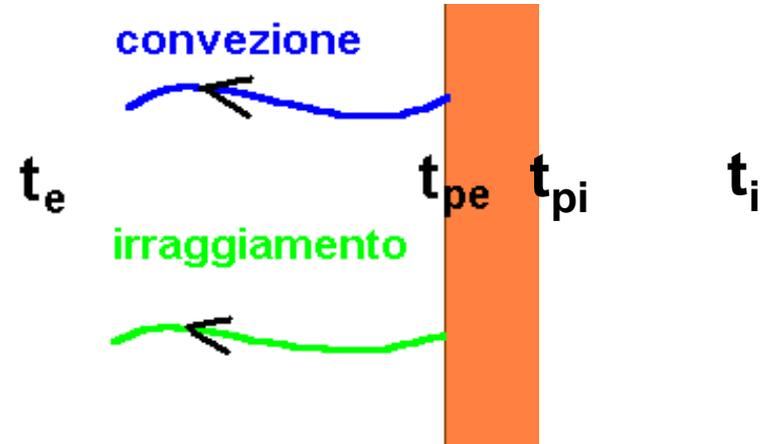


U – CALCOLO MEDIANTE RESISTENZE TERMICHE

Ipotesi: $t_i > t_{pi} > t_{pe} > t_e$

$t'_i = t_i$ e $t_e = t'_e$

regime stazionario



**Convezione e irraggiamento
lato esterno ed interno**

flussi scambiati in parallelo: φ_c e φ_{irr}

$$\varphi_c + \varphi_{irr} = h_c A (t_{pe} - t_e) + h_{irr} A (t_{pe} - t_e)$$

$$\varphi = (h_c + h_{irr}) A (t_{pe} - t_e)$$

$$\varphi = (t_{pe} - t_e) / R$$

Resistenza liminare di scambio

$$R = 1/(h_c + h_{irr}) A = 1 / (h A)$$

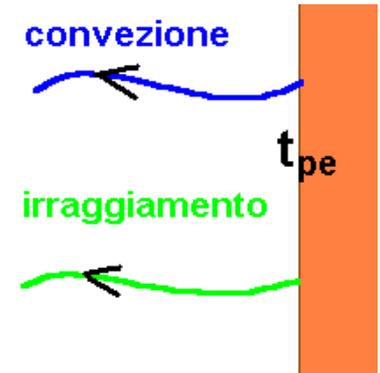
U – CALCOLO MEDIANTE RESISTENZE TERMICHE

Lato interno: $R_i = 1 / (h_i A) [K/W]$

Lato esterno: $R_e = 1 / (h_e A)$

R_i e R_e = resistenze termiche liminari

h_i e h_e = coefficienti liminari di scambio (adduttanze)



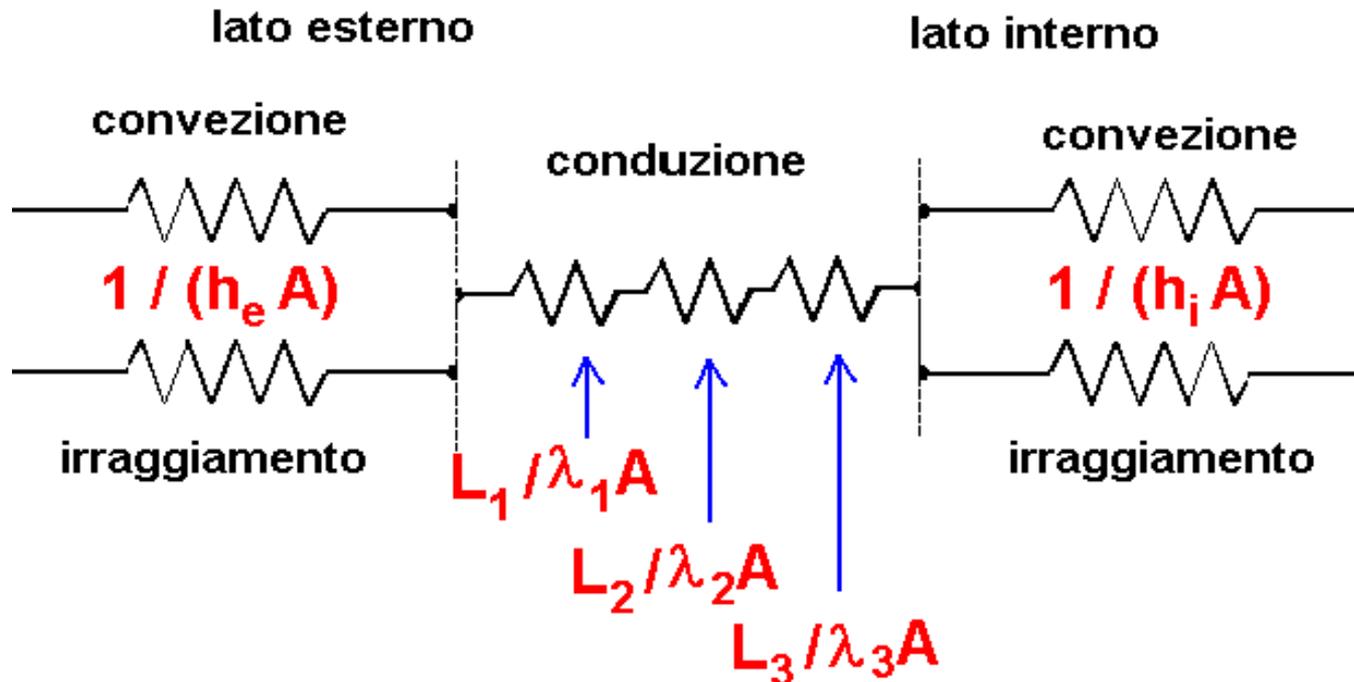
Tipo	1/h _i	1/h _e
Parete verticale	0,123	0,043
Parete orizzontale (flusso ascendente)	0,107	0,043
Strato d'aria orizzontale (flusso di calore Discendente)	0,172	0,061

U – CALCOLO MEDIANTE RESISTENZE TERMICHE

Conduzione attraverso gli strati

Resistenza termica per conduzione:

$$R = \sum_i L_i / (\lambda_i A) \quad [\text{K/W}]$$



U – CALCOLO MEDIANTE RESISTENZE TERMICHE - struttura piana

flusso termico: $\varphi = (t_i - t_e) / R_t$ [W]

R_t [K/W] totale resistenza termica

$$R_t = 1/h_i A + \sum_i L_i / (\lambda_i A) + 1/h_e A \quad [\text{K/W}]$$

$$R_t = (1/h_i + \sum_i L_i / \lambda_i + 1/h_e) / A \quad [\text{K/W}]$$

Resistenza termica specifica R'_t

$$R'_t = (1/h_i + \sum_i L_i / \lambda_i + 1/h_e) \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$R_t = R'_t / A \quad R'_t = R_t A$$

Trasmittanza termica $U = 1 / R'_t$ [W/m²K]

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1}$$

U – CALCOLO MEDIANTE RESISTENZE TERMICHE struttura piana, espressione generale

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_a} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

C = conduttanza dello strato [W/m²K]

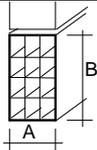
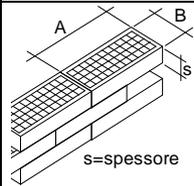
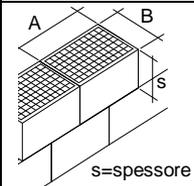
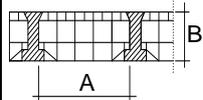
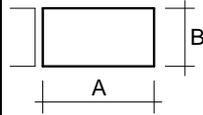
1/C_a = resistenza termica di eventuali intercapedini d'aria

**Tabella Conduttanza unitaria C_a
per intercapedini d'aria (W/m²K)**

Tipo di intercapedine	Spessore 1 cm	Spessore 2 - 10 cm
Strato d'aria orizzontale (flusso di calore ascendente)	7,56	6,98
Strato d'aria verticale	7,56	6,40
Strato d'aria orizzontale (flusso di calore discendente)	7,56	5,23

Tabella conduttanza di alcuni materiali UNI 10351:1994 Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_a} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1}$$

TIPO DI STRUTTURA	Dim. A (cm)	Dim. B (cm)	Conduttanza unitaria C (W/m ² K)	Schema della struttura
TAVOLATO DI MATTONI FORATI DI LATERIZIO	4	25	9,09	
	6	25	7,69	
	8	25	5,00	
	10	25	3,70	
	12	25	3,22	
	15	25	2,22	
MURO IN MATTONI SEMPIENI	spessore (cm) 5	25	12	
	6	28	14	
	12	25	12	
	12	25	24	
	12	25	24	
MURO IN BLOCCHI FORATI	spessore (cm) 25	25	25	
	25	25	30	
	25	25	37	
	25	25	37	
SOLAIO IN BLOCCHI FORATI DI LATERIZIO	49,5	16	3,33	
	49,5	20	3,03	
	49,5	24	2,56	
SOLAIO TIPO PREDALLES	120	12	asc. 3,57, disc. 3,33	
	120	20	asc. 2,77, disc. 2,63	
	120	25	asc. 2,38, disc. 2,22	

Nota: La conduttanza unitaria è fornita dalla norma correlata alla UNI 10351:

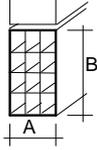
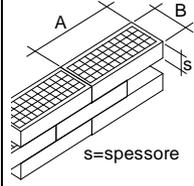
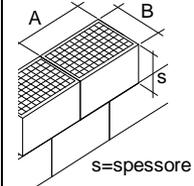
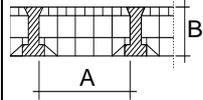
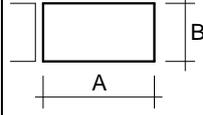
UNI 10355 - Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.

Tabella conduttanza di alcuni materiali UNI 10351:1994

Materiali da costruzione.

Conduttività termica e permeabilità al vapore

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_a} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1}$$

TIPO DI STRUTTURA	Dim. A (cm)	Dim. B (cm)	Conduttanza unitaria C (W/m ² K)	Schema della struttura		
TAVOLATO DI MATTONI FORATI DI LATERIZIO	4	25	9,09			
	6	25	7,69			
	8	25	5,00			
	10	25	3,70			
	12	25	3,22			
	15	25	2,22			
MURO IN MATTONI SEMPIENI	spessore (cm)	5	25	12	5,26	
		6	28	14	4,16	
		12	25	12	4,16	
		12	25	24	2,70	
MURO IN BLOCCHI FORATI	spessore (cm)	25	25	25	1,25	
		25	25	30	1,06	
		25	25	37	0,94	
SOLAIO IN BLOCCHI FORATI DI LATERIZIO	49,5	16	3,33			
	49,5	20	3,03			
	49,5	24	2,56			
SOLAIO TIPO PREDALLES	120	12	asc. 3,57, disc. 3,33			
	120	20	asc. 2,77, disc. 2,63			
	120	25	asc. 2,38, disc. 2,22			

Nota: La conduttanza unitaria è fornita dalla norma correlata alla UNI 10351:

UNI 10355 - Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.

TRASMITTANZA TERMICA DI UNA STRUTTURA PIANA E FLUSSO TERMICO

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_a} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

flusso termico: $\varphi = (t_i - t_e) / R_t = U A (t_i - t_e) \quad [\text{W}]$

flusso termico specifico:

$$\varphi' = (t_i - t_e) / R'_t = U (t_i - t_e) \quad [\text{W/m}^2]$$

Tabella conduttività di alcuni materiali UNI 10351:1994

Materiale	ρ (kg/m ³)	$\delta_a 10^{12}$ (kg/msPa)	$\delta_u 10^{12}$ (kg/msPa)	λ_m (W/mK)	m %	λ (W/mK)
Aria in quiete						
aria a 293 K	1,3	193	193			0,026
Calcestruzzo a struttura chiusa						
calcestruzzo confezionato con aggregati naturali (valori di calcolo per pareti esterne e interne protette)	2.000	1,3-2,6	1,8-2,4	1,01	15	1,16
	2.200	1,3-2,6	1,8-2,4	1,29	15	1,48
	2.400	1,3-2,6	1,8-2,4	1,66	15	1,91
calcestruzzo di argille espanse (conduttività di riferimento relativa a materiale secco)	1.000	1,3-2,6	1,8-2,4	0,25	20	0,31
	1.100	1,3-2,6	1,8-2,4	0,29	20	0,35
	1.200	1,3-2,6	1,8-2,4	0,33	20	0,39
	1.300	1,3-2,6	1,8-2,4	0,37	20	0,44
	1.400	1,3-2,6	1,8-2,4	0,42	20	0,50
	1.500	1,3-2,6	1,8-2,4	0,47	20	0,57
	1.600	1,3-2,6	1,8-2,4	0,54	20	0,65
1.700	1,3-2,6	1,8-2,4	0,63	20	0,75	
Calcestruzzo a struttura aperta						
calcestruzzo di argille espanse (conduttività di riferimento relativa a materiale secco)	500	18-36	60	0,14	20	0,16
	600	18-36	60	0,16	20	0,18
	700	18-36	60	0,18	20	0,21
	800	18-36	60	0,20	20	0,24
	900	18-36	60	0,22	20	0,27
	1.000	18-36	60	0,25	20	0,31
calcestruzzo cellulare da autoclave (valori di calcolo per pareti interne o esterne protette)	400	18-36	40-60	0,12	25	0,15
	500	18-36	40-60	0,14	25	0,17
	600	18-36	40-60	0,15	25	0,19
	700	18-36	40-60	0,17	25	0,22
	800	18-36	40-60	0,20	25	0,25
calcestruzzo di inerti espansi di origine vulcanica (valori orientativi di calcolo per pareti interne o esterne protette)	1.000					0,38
	1.200					0,47
	1.400					0,58

Tabella conduttività di alcuni materiali UNI 10351:1994

Materiale	ρ (kg/m ³)	δ_a 10 ¹² (kg/msPa)	δ_u 10 ¹² (kg/msPa)	λ_m (W/mK)	m %	λ (W/mK)
Fibre minerali ottenute da rocce feldspatiche						
feltri resinati	30	150	150	0,041	10	0,045
pannelli semirigidi	35	150	150	0,040	10	0,044
	40	150	150	0,038	10	0,042
	55	150	150	0,036	10	0,040
pannelli rigidi	80	150	150	0,035	10	0,039
	100	150	150	0,034	10	0,038
	125	150	150	0,034	10	0,038
pannelli di fibre orientate	100	150	150	0,044	10	0,048
Fibre minerali ottenute da rocce basaltiche						
feltri trapuntati	60	150	150	0,037	20	0,044
	80	150	150	0,037	20	0,044
	100	150	150	0,038	20	0,045
Fibre minerali ottenute da loppe di altoforno						
feltri	40	150	150	0,049	10	0,054
pannelli rigidi e semirigidi	40	150	150	0,049	10	0,054
	60	150	150	0,044	10	0,048
	80	150	150	0,042	10	0,046
	100	150	150	0,042	10	0,046
	150	150	150	0,044	10	0,048
Intonaci e malte						
malte di gesso per intonaci o in pannelli con inerti di vario tipo	600	18	18			0,29
	750	18	18			0,35
	900	18	18			0,41
	1.000	18	18			0,47
	1.200	18	18			0,58
intonaco di gesso puro	1.200	18	18			0,35
intonaco di calce e gesso	1.400	18	18			0,70
intonaco di calce o di calce e cemento	1.800	5÷12	5÷12			0,90
malta di cemento	2.000	5÷12	5÷12			1,40

STRUTTURE TRASPARENTI

$$U_s = \frac{A_v U_v + A_t U_t}{A_v + A_t}$$

U_v trasmittanza termica dell'elemento vetrato ($\text{W/m}^2\text{K}$)

A_v area dell'elemento vetrato (m^2)

U_t trasmittanza termica del telaio ($\text{W/m}^2\text{K}$)

A_t area del telaio (m^2)

STRUTTURE TRASPARENTI

$$U_v = \left(\frac{1}{h_e} + \sum_{i=1}^n r_i \cdot s + \sum_{j=1}^{n-1} R_{sj} + \frac{1}{h_i} \right)^{-1}$$

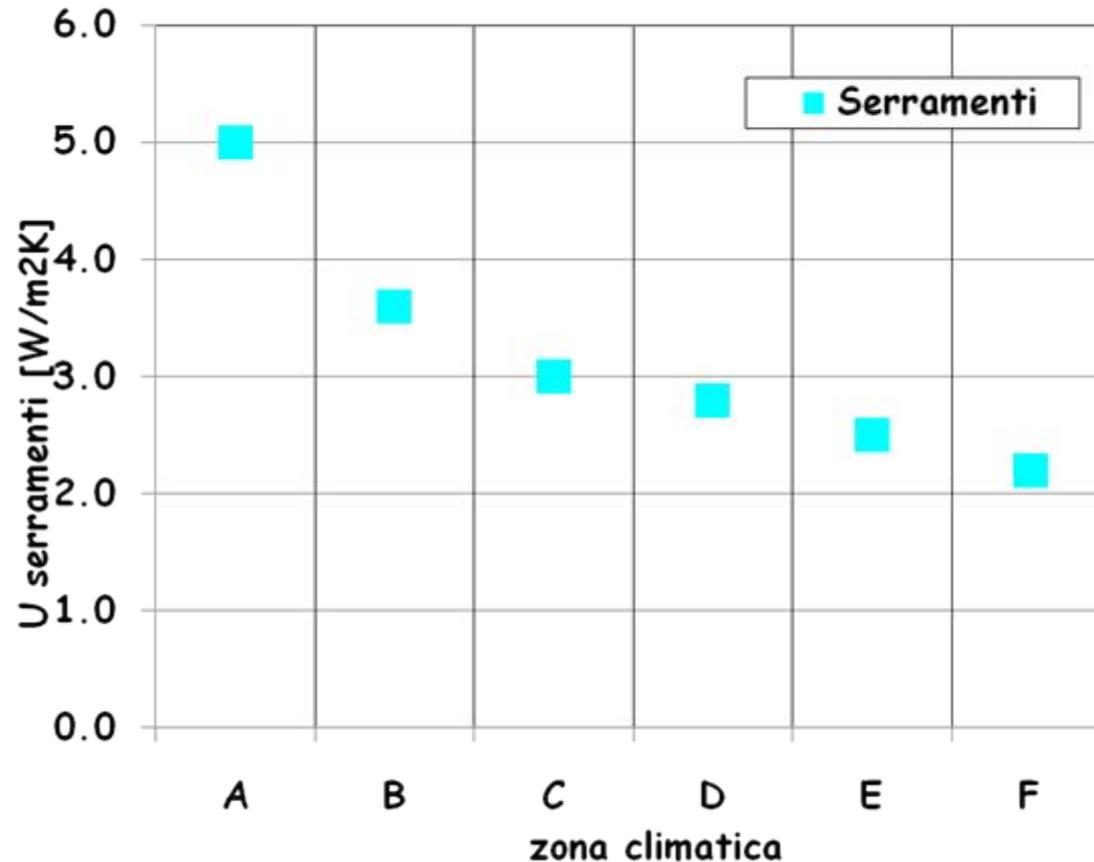
$$h_e = 25$$

$$h_i = 3,6 + 4,4 \frac{\varepsilon}{0,837}$$

- r** resistività della lastra di vetro (mK/W)
- s** spessore del vetro (m)
- R_s** resistenza termica dello strato racchiuso tra le due lastre (m²K / W)
- n** numero di lastre del componente trasparente
- ε** emissività della lastra di vetro

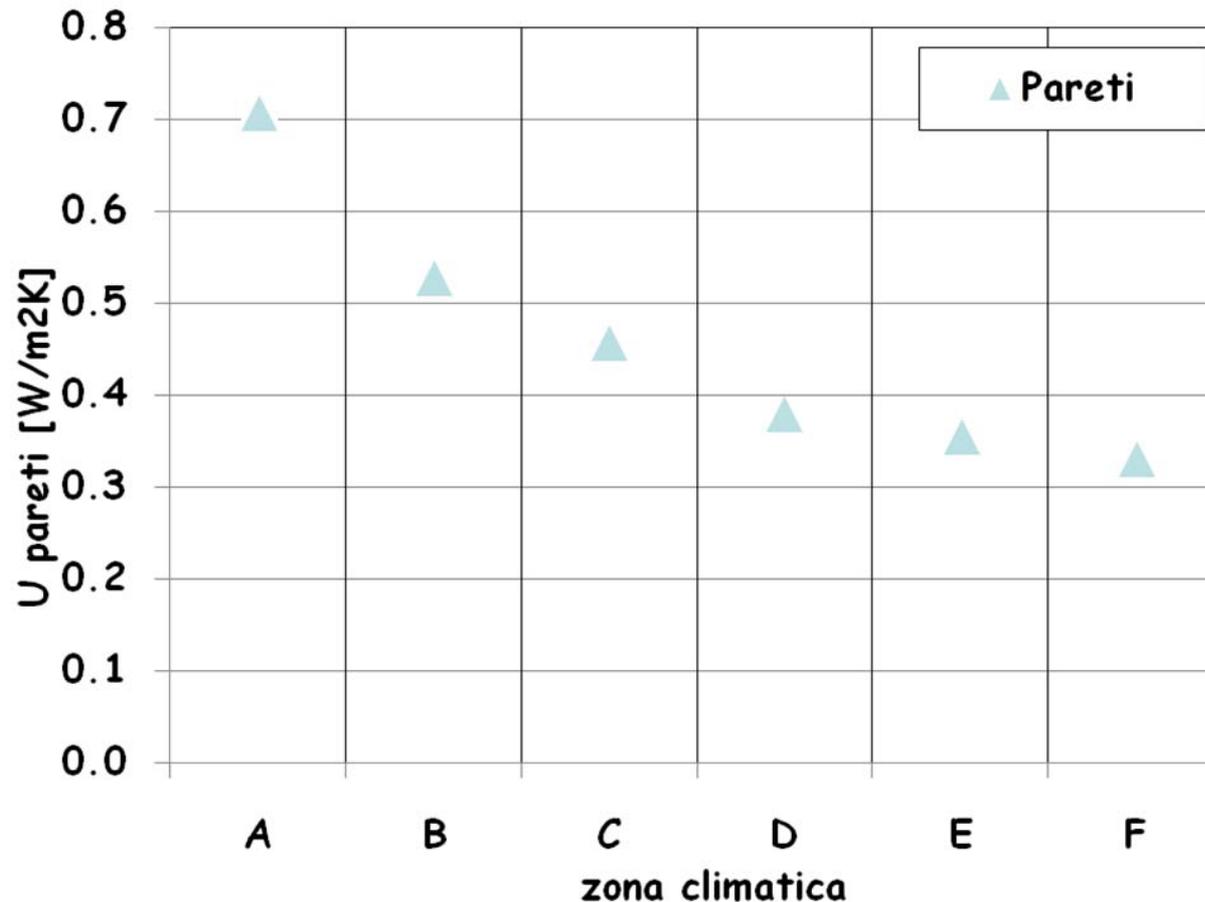
TRASMITTANZA TERMICA SECONDO DLgs 192/05- 311/06

Trasmittanza U [W/m^2K] anno 2009

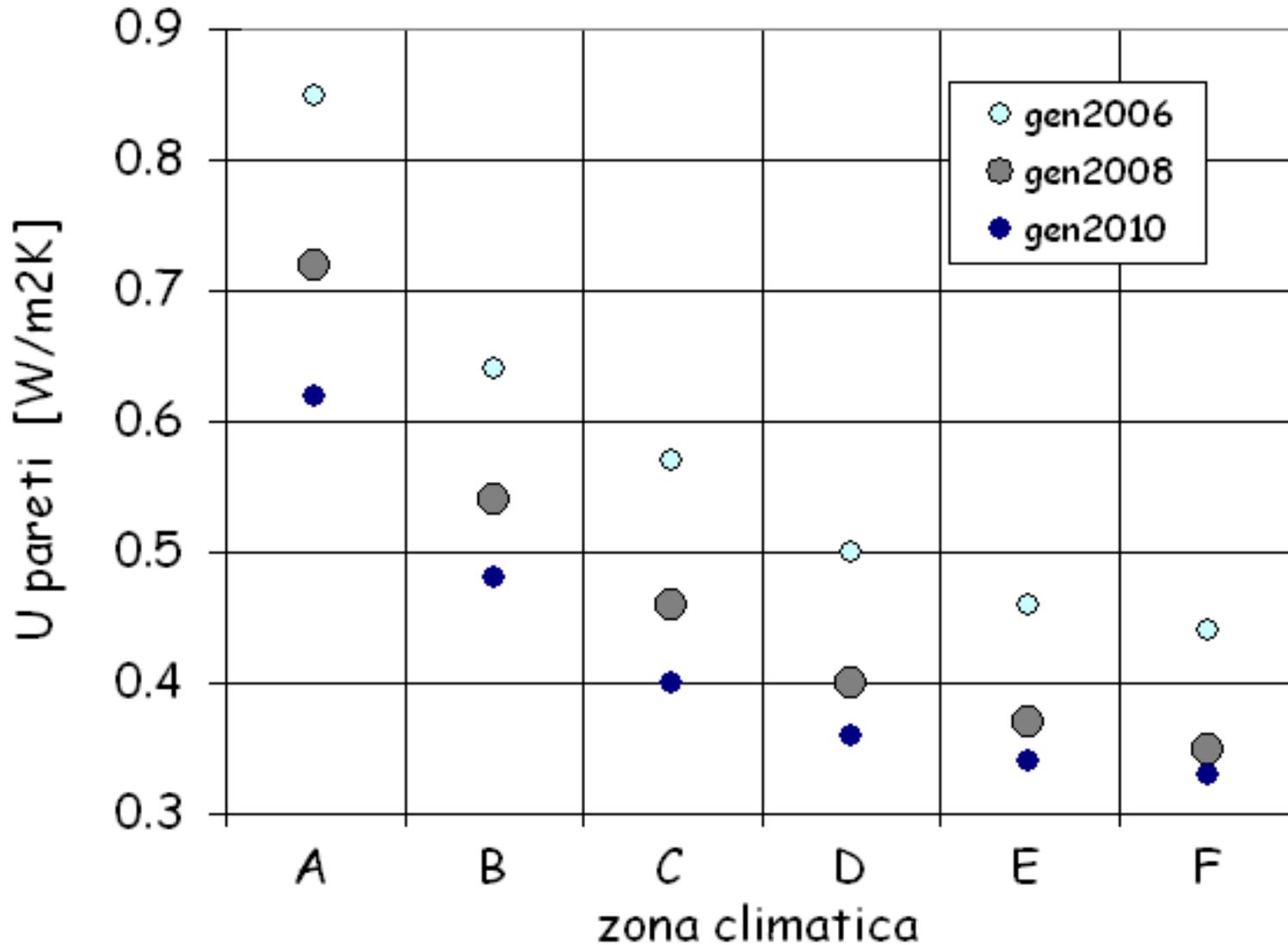


TRASMITTANZA TERMICA SECONDO DLgs 192/05- 311/06

Trasmittanza U [W/m²K] anno 2009



TRASMITTANZA TERMICA SECONDO DLgs 192/05- 311/06



COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno UNI EN ISO 13789:2008

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum I_k \Psi_k + \sum \chi_j \quad [\text{W/K}]$$

A_i = area dell'elemento di edificio i , [m^2]

U_i = trasmittanza termica dell'elemento i [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

I_k = lunghezza di ogni giunto [m];

Ψ_k = trasmittanza lineica [W/mK];

χ_j = trasmittanza termica di punto - ponte termico di punto [W/K];

COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno UNI EN ISO 13789:2008

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j \quad [\text{W/K}]$$

A_i = area dell'elemento di edificio i , [m^2]

U_i = trasmittanza termica dell'elemento i [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

l_k = lunghezza di ogni giunto [m];

Ψ_k = trasmittanza lineica [W/mK];

χ_j = trasmittanza termica di punto - ponte termico di
punto [W/K];

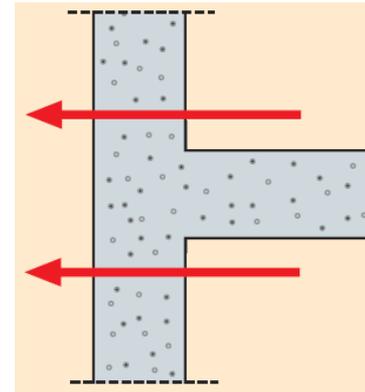
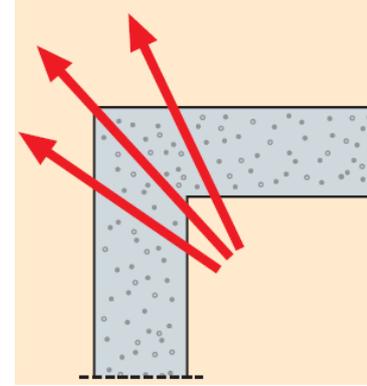
Calcolo di Ψ_k e χ_j

UNI EN ISO 14683:2008

Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento

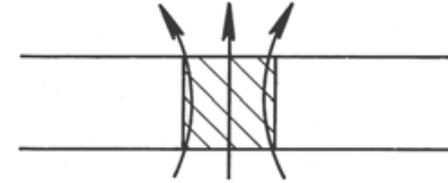
La norma specifica metodi semplificati per la determinazione del flusso di calore attraverso i ponti termici lineari che si manifestano alle giunzioni degli elementi dell'edificio.

La norma specifica i requisiti relativi ai cataloghi dei ponti termici e ai metodi di calcolo manuali. L'appendice A (informativa) riporta valori di riferimento della trasmittanza termica lineica.

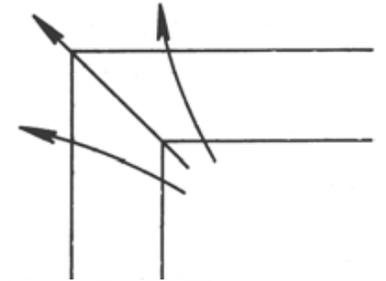


Conduzione bi-tri-dimensionale in regime permanente

Quando il contorno di un sistema non è regolare
Quando la temperatura lungo il contorno non è uniforme



Es: flusso termico in prossimità di uno spigolo
Conduzione attraverso un cilindro cavo corto
Dispersione del calore da una tubazione interrata



Risoluzione del problema:

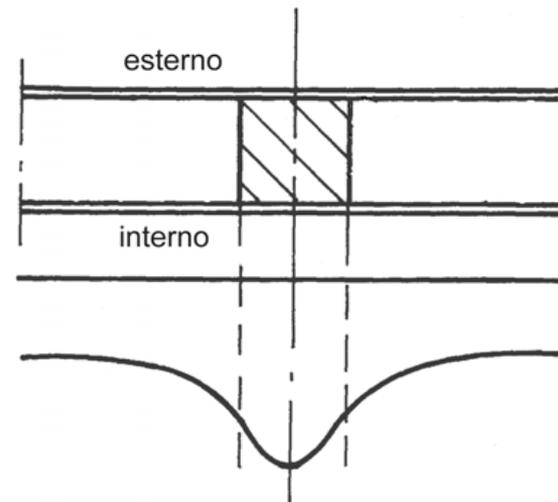
Metodi

Analitici

Grafici

Analogici

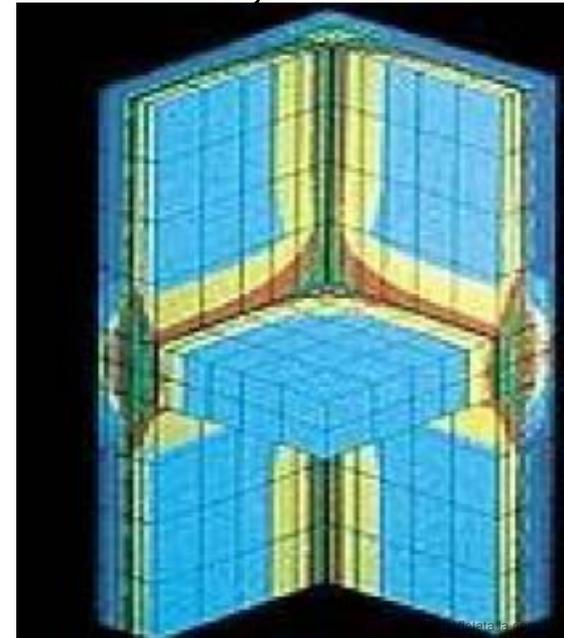
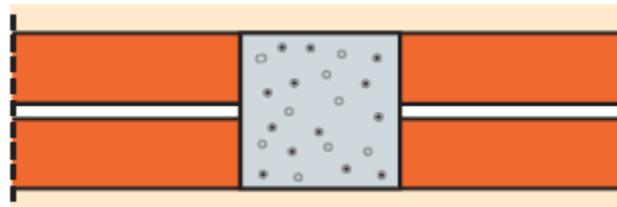
Numerici



UNI EN ISO 14683:2008

Nell'involucro edilizio si possono realizzare situazioni di ponte termico:

- > Alla giunzione tra elementi esterni (angoli tra pareti, pareti e soffitto, pareti e pavimento);
- > Alla giunzione tra pareti interne e muri esterni o tetti;
- > Alla giunzione tra solai intermedi e pareti esterne;
- > In corrispondenza ai pilastri nelle murature esterne;
- > Sul perimetro di porte e finestre.

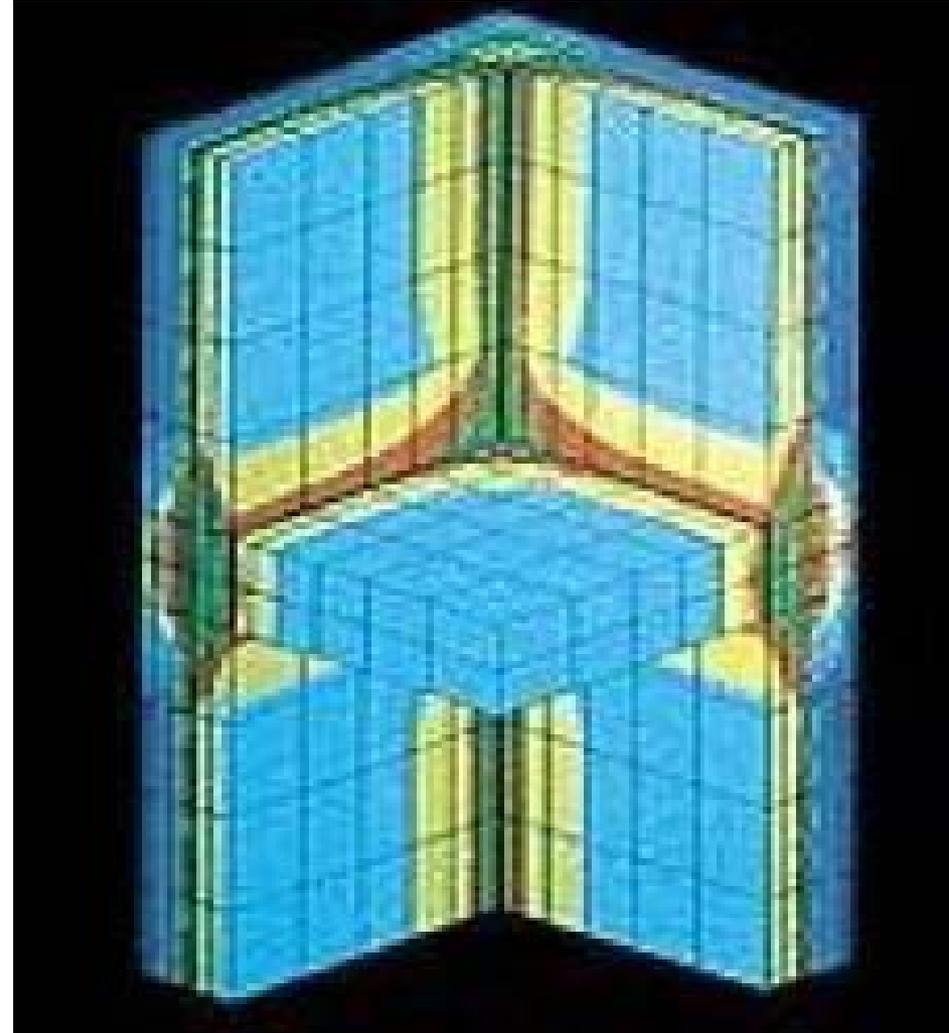


PONTI TERMICI

I ponti termici sono causa di due effetti importanti:

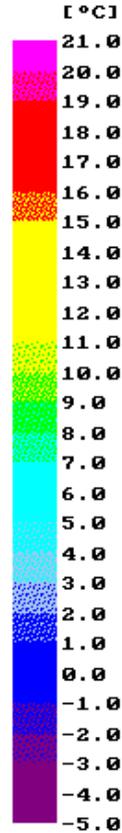
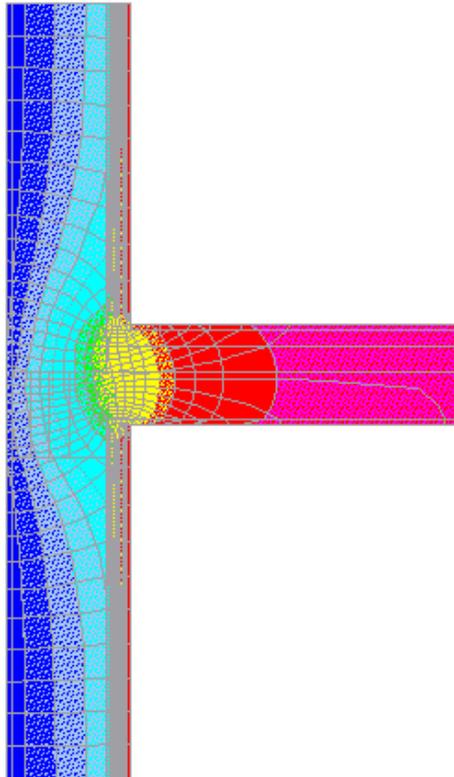
diminuzione della temperatura superficiale interna in corrispondenza della discontinuità;

aumento del flusso termico.

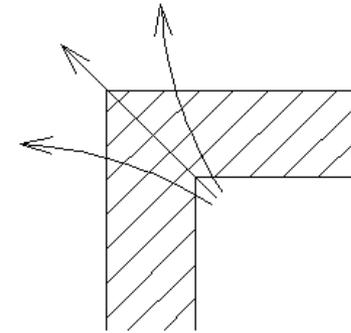


PONTI TERMICI

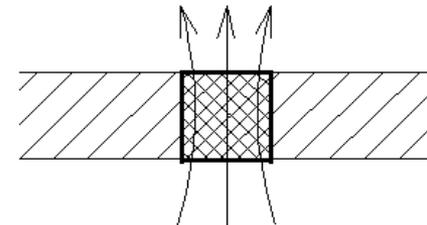
Ponte termico soletta – parete esterna



PONTE TERMICO DI FORMA

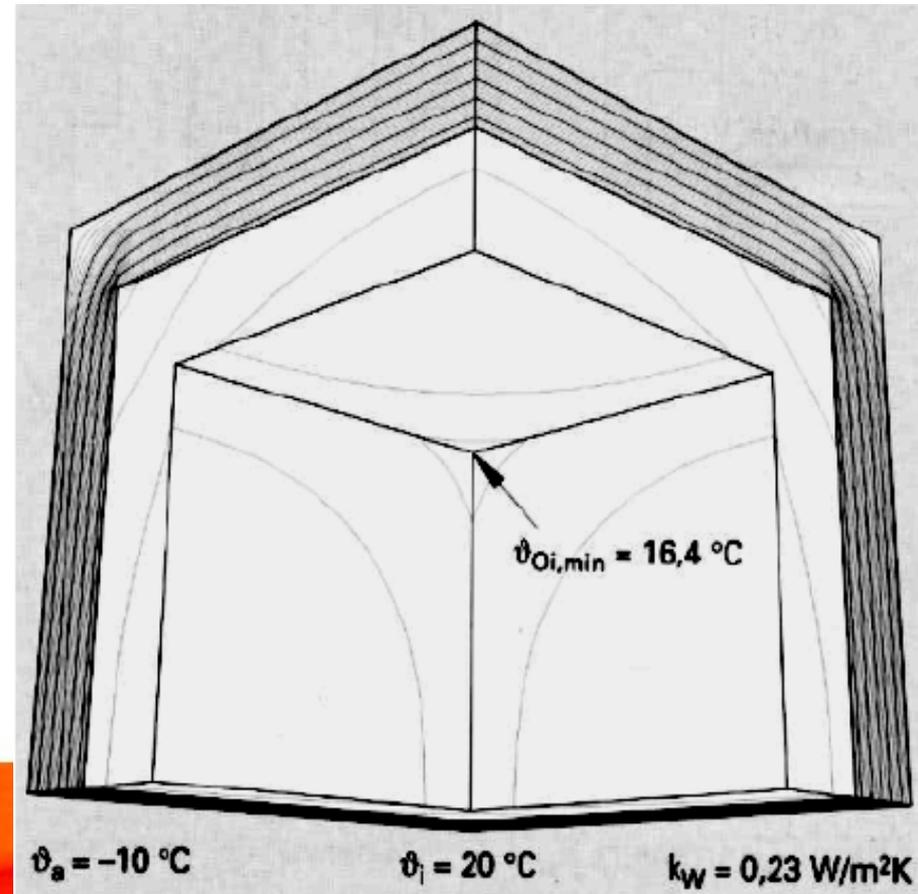
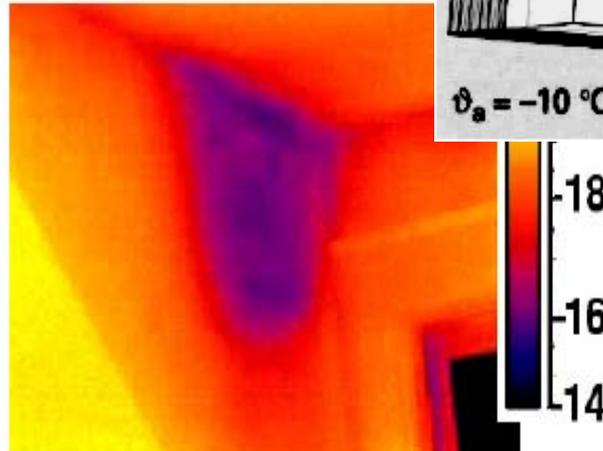


PONTE TERMICO DI STRUTTURA



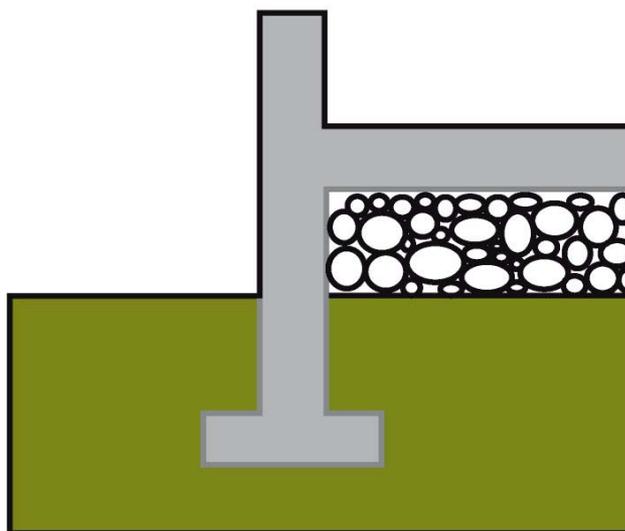
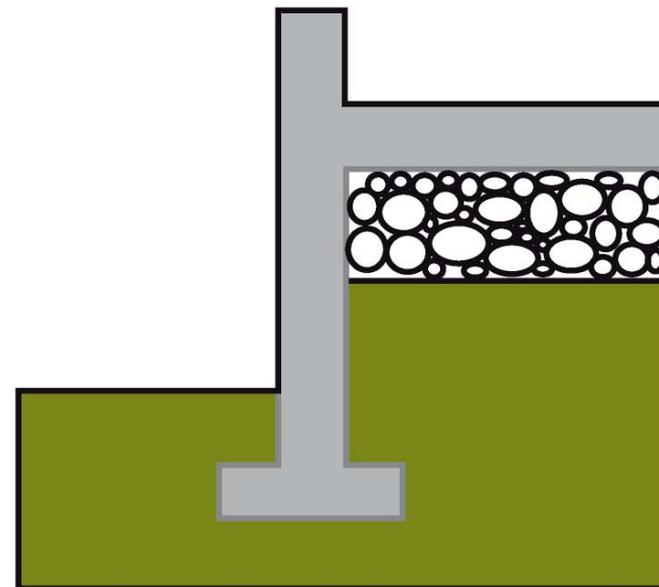
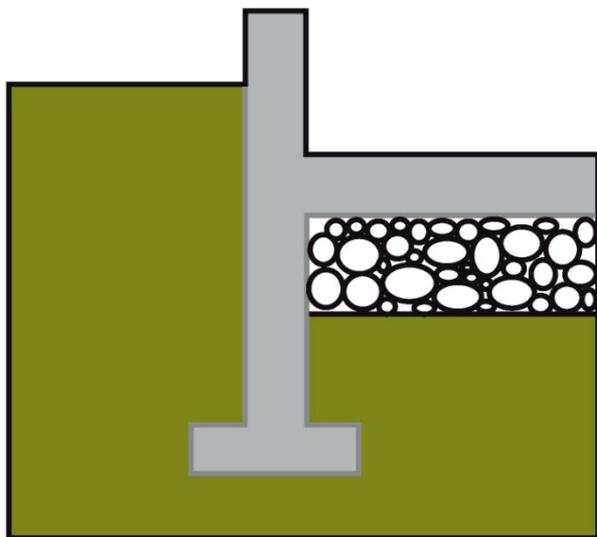
PONTI TERMICI

Ponte termico zona ad angolo



PONTI TERMICI

Pareti contro terra



UNI EN ISO 14683:2008

Influenza dei ponti termici sullo scambio termico complessivo

Coefficiente globale di scambio termico

Flusso termico complessivo attraverso l'involucro edilizio

$$\varphi = H_T (\theta_i - \theta_e)$$

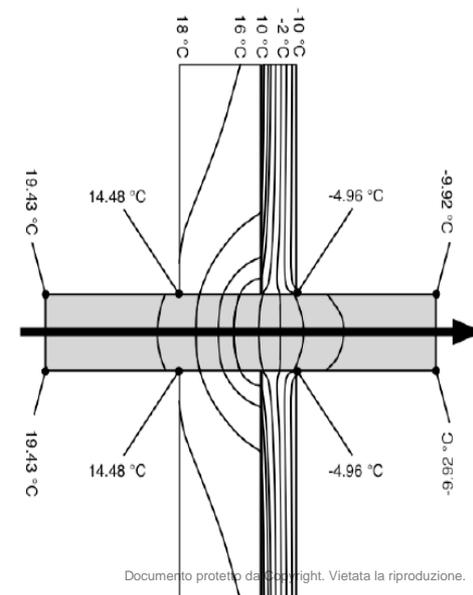
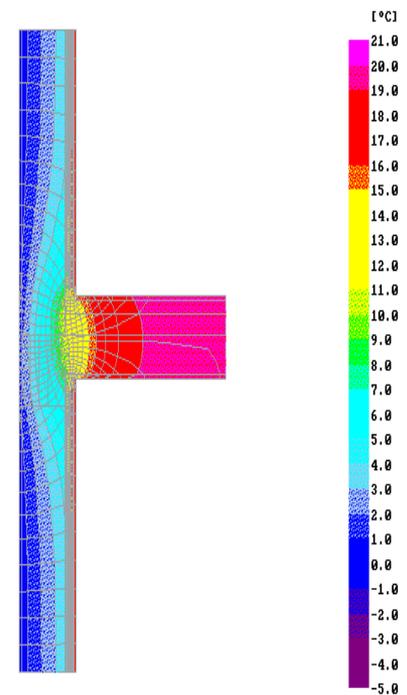
Il coefficiente di scambio termico è espresso da tre termini:

$$H_T = H_D + H_g + H_U$$

H_D coefficiente di scambio termico diretto attraverso l'involucro edilizio

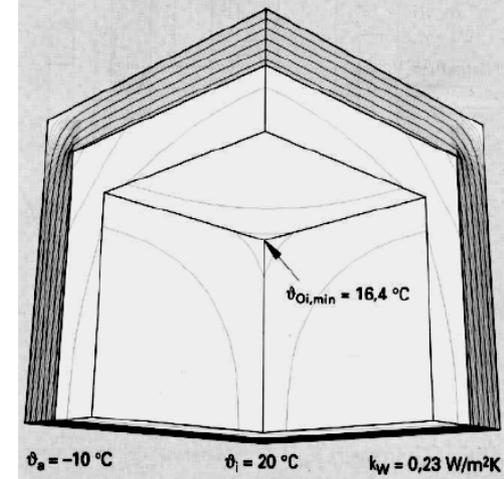
H_g coefficiente di scambio termico attraverso il terreno in accordo con ISO 13370;

H_U coefficiente di scambio termico attraverso spazi non controllati secondo ISO 13789.



UNI EN ISO 14683:2008

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum l_k \Psi_K + \sum \chi_j$$



A_i = area dell'elemento di edificio i , [m^2]

U_i = trasmittanza termica dell'elemento i [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

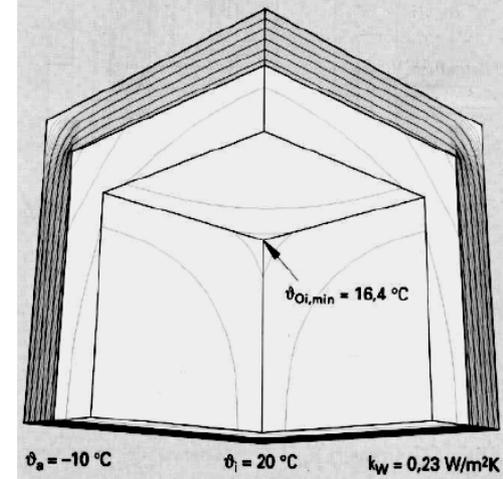
l_k = lunghezza di ogni giunto [m];

Ψ_K = trasmittanza lineica [$\text{W}/\text{m K}$];

χ_j = trasmittanza termica di punto - ponte termico di punto [W/K] (ponti termici tridimensionali);

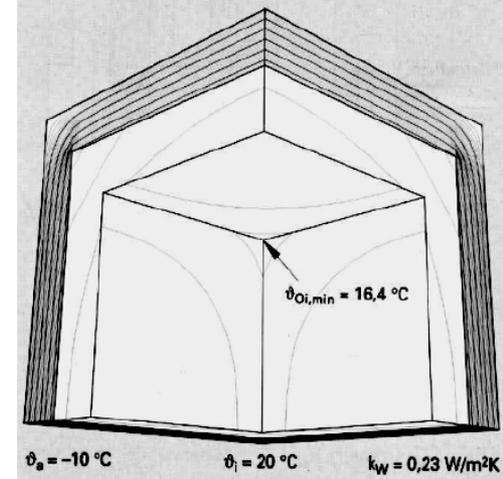
UNI EN ISO 14683:2008

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



UNI EN ISO 14683:2008

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum I_k \Psi_K + \sum \chi_j$$



**PONTI
TERMICI
bidimensionali**

$$\varphi_p = \sum (U \cdot A) \Delta t + \sum (\psi_i \cdot L_i) \Delta t$$

**Pareti opache e
trasparenti**

**Calcolo dell'influenza del ponte
termico:**

Ψ_i trasmittanza lineica (W/m K)

L_i lunghezza di ogni giunto

**PONTI TERMICI
tridimensionali**

$$\varphi_p = \sum (U \cdot A) \Delta t + \sum (\psi_i \cdot L_i) \Delta t + \sum (\chi_j)$$

METODI PER LA DETERMINAZIONE DI Ψ

Ψ_i basato sulle misure interne;

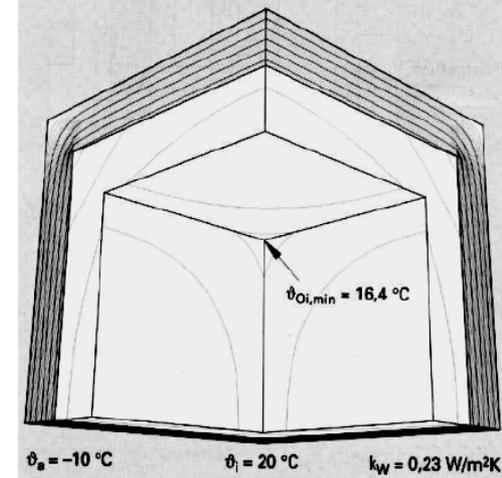
Ψ_{oi} basato sulle misure interne globali

Ψ_e basato sulle misure esterne.

dimensioni interne, misurate tra le superfici interne finite di ogni ambiente in un edificio (escluso quindi lo spessore delle partizioni interne);

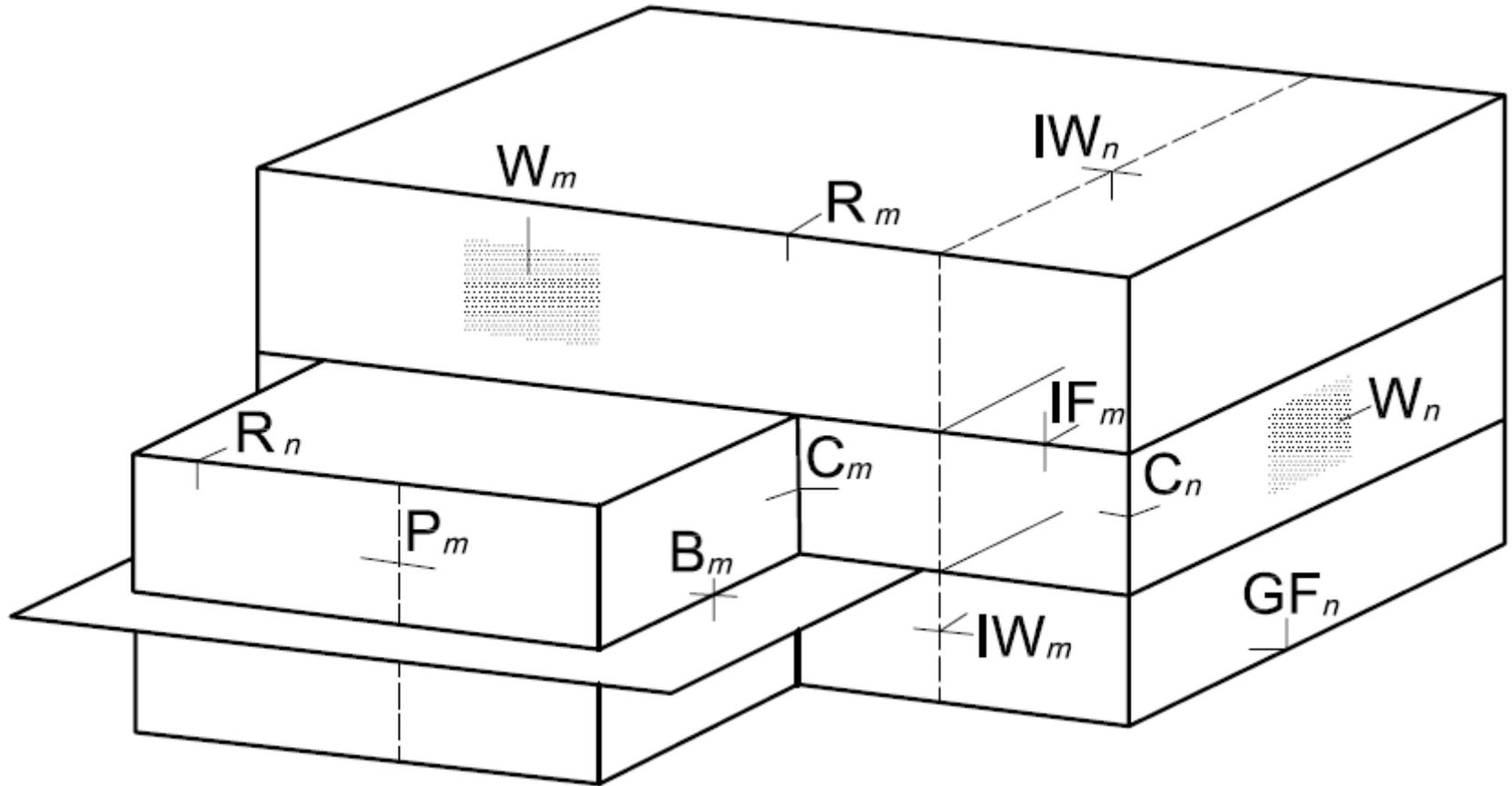
dimensioni interne totali, misurate tra le superfici interne finite degli elementi dell'involucro edilizio (incluso quindi lo spessore delle partizioni interne);

dimensioni esterne, misurate tra le superfici esterne (finite) degli elementi dell'involucro edilizio



Metodi	Incertezza prevista su Ψ
Calcolo numerico	$\pm 5\%$
Catalogo dei ponti termici	$\pm 20\%$
Calcoli manuali	$\pm 20\%$
Valori di progetto	Da 0% a 50%

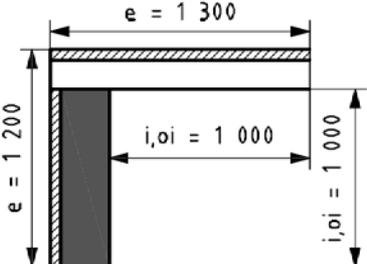
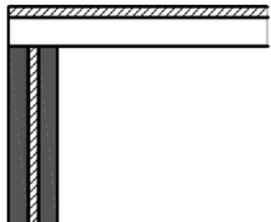
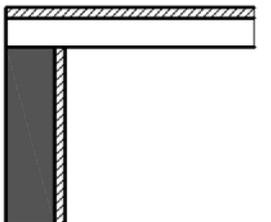
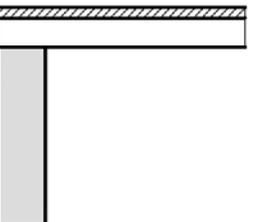
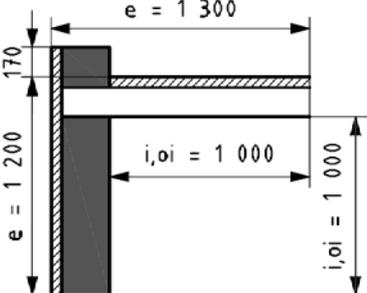
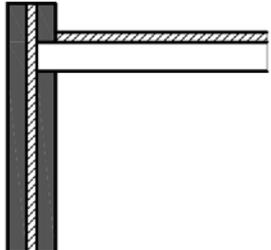
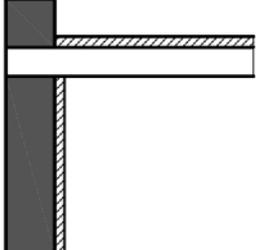
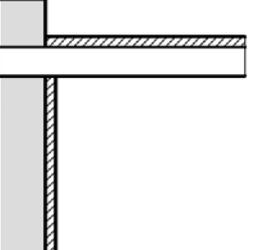
VALORI DA CATALOGO DI Ψ



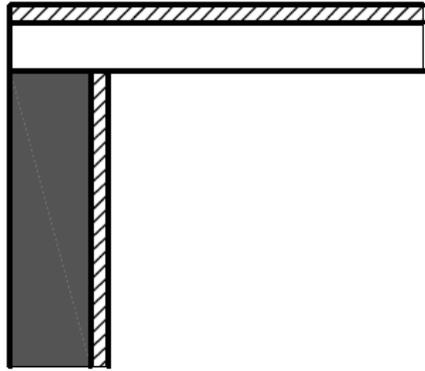
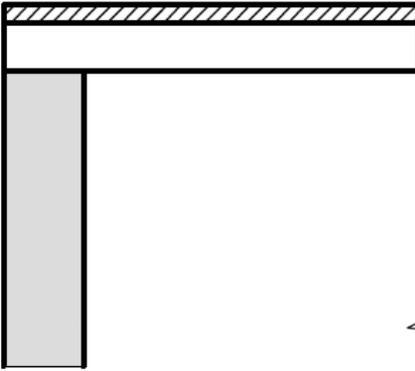
Tetto

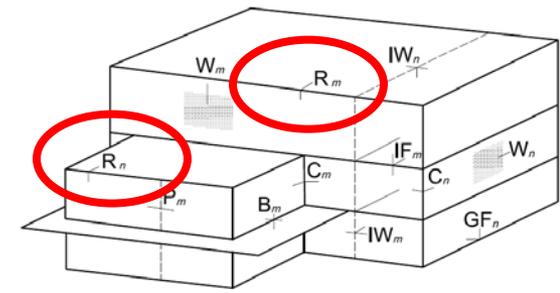
Dimensions in mm; linear thermal transmittance in W/(m·K)

 Wall	 Lightweight wall (including lightweight masonry and timber frame walls)	 Insulating layer	 Slab/pillar	 Window frame
---	--	--	---	--

Roofs				
 <p>$e = 1\,300$ $e = 1\,200$ $i,oi = 1\,000$</p>				
<p>R1</p> <p>$\psi_e = 0,55$ $\psi_{oi} = 0,75$ $\psi_i = 0,75$</p>	<p>R2</p> <p>$\psi_e = 0,50$ $\psi_{oi} = 0,75$ $\psi_i = 0,75$</p>	<p>R3</p> <p>$\psi_e = 0,40$ $\psi_{oi} = 0,75$ $\psi_i = 0,75$</p>	<p>R4</p> <p>$\psi_e = 0,40$ $\psi_{oi} = 0,65$ $\psi_i = 0,65$</p>	
 <p>$e = 1\,300$ 170 $e = 1\,200$ $i,oi = 1\,000$</p>				
<p>R5</p> <p>$\psi_e = 0,60$ $\psi_{oi} = 0,80$ $\psi_i = 0,80$</p>	<p>R6</p> <p>$\psi_e = 0,50$ $\psi_{oi} = 0,70$ $\psi_i = 0,70$</p>	<p>R7</p> <p>$\psi_e = 0,65$ $\psi_{oi} = 0,85$ $\psi_i = 0,85$</p>	<p>R8</p> <p>$\psi_e = 0,45$ $\psi_{oi} = 0,70$ $\psi_i = 0,70$</p>	

VALORI DA CATALOGO DI Ψ - TETTO

	 Insulating layer	 Slab/pillar	 Window frame
<p>R3</p>  <p>$\Psi_e = 0,40$ $\Psi_{oi} = 0,75$ $\Psi_i = 0,75$</p>	<p>R4</p>  <p>$\Psi_e = 0,40$ $\Psi_{oi} = 0,65$ $\Psi_i = 0,65$</p>		

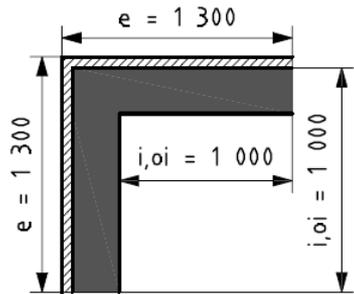


ANGOLO

Dimensions in mm; linear thermal transmittance in W/(m·K)

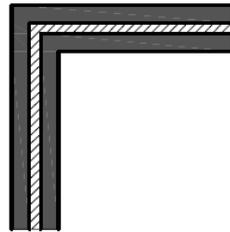
	Wall		Lightweight wall (including lightweight masonry and timber frame walls)		Insulating layer		Slab/pillar		Window frame
---	------	---	--	---	------------------	---	-------------	---	--------------

Corners



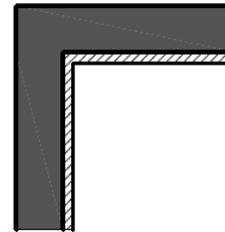
C1

$$\begin{aligned} \psi_e &= -0,05 \\ \psi_{oi} &= 0,15 \\ \psi_i &= 0,15 \end{aligned}$$



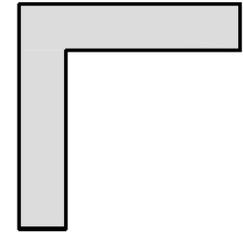
C2

$$\begin{aligned} \psi_e &= -0,10 \\ \psi_{oi} &= 0,10 \\ \psi_i &= 0,10 \end{aligned}$$



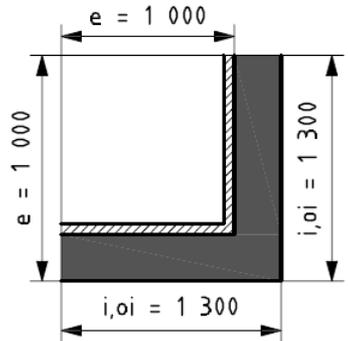
C3

$$\begin{aligned} \psi_e &= -0,20 \\ \psi_{oi} &= 0,05 \\ \psi_i &= 0,05 \end{aligned}$$



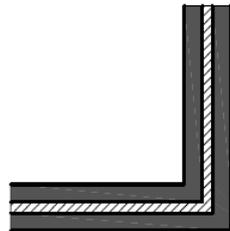
C4

$$\begin{aligned} \psi_e &= -0,15 \\ \psi_{oi} &= 0,10 \\ \psi_i &= 0,10 \end{aligned}$$



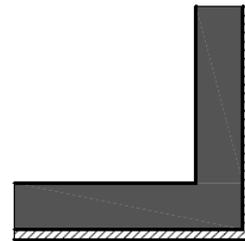
C5

$$\begin{aligned} \psi_e &= 0,05 \\ \psi_{oi} &= -0,15 \\ \psi_i &= -0,15 \end{aligned}$$



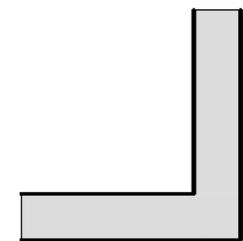
C6

$$\begin{aligned} \psi_e &= 0,15 \\ \psi_{oi} &= -0,10 \\ \psi_i &= -0,10 \end{aligned}$$



C7

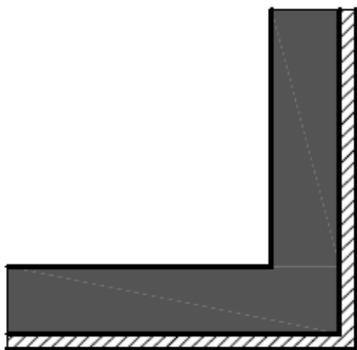
$$\begin{aligned} \psi_e &= 0,15 \\ \psi_{oi} &= -0,05 \\ \psi_i &= -0,05 \end{aligned}$$



C8

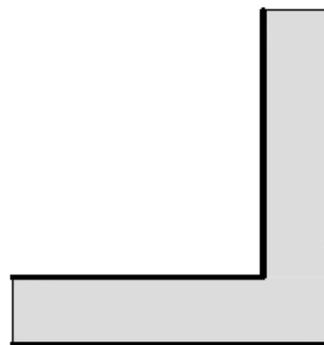
$$\begin{aligned} \psi_e &= 0,10 \\ \psi_{oi} &= -0,10 \\ \psi_i &= -0,10 \end{aligned}$$

VALORI DA CATALOGO DI Ψ - ANGOLO



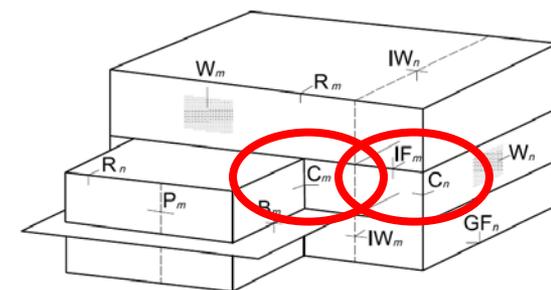
C7

$$\begin{aligned}\Psi_e &= 0,15 \\ \Psi_{oi} &= -0,05 \\ \Psi_i &= -0,05\end{aligned}$$



C8

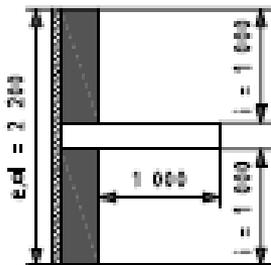
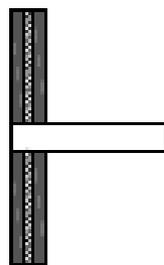
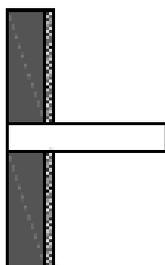
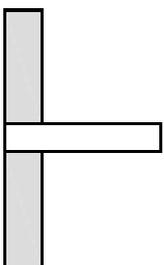
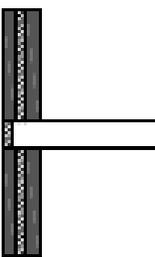
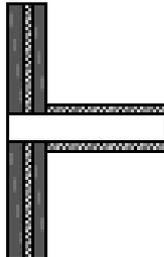
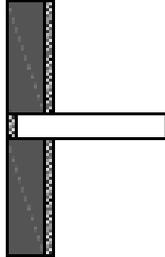
$$\begin{aligned}\Psi_e &= 0,10 \\ \Psi_{oi} &= -0,10 \\ \Psi_i &= -0,10\end{aligned}$$



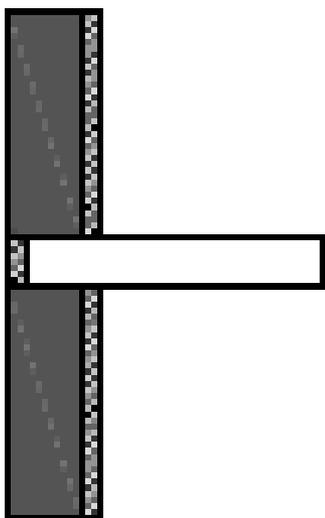
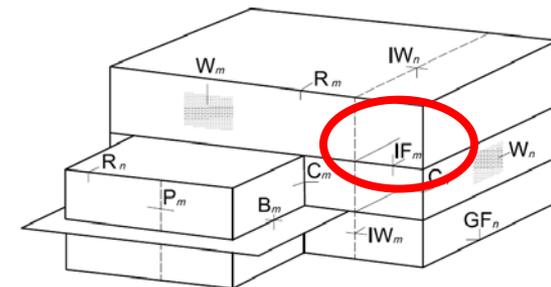
Attacco soletta – parete esterna

Dimensions in mm; linear thermal transmittance in W/(m·K)

	Wall		Lightweight wall (including lightweight masonry and timber frame walls)		Insulating layer		Slab/pillar		Window frame
---	------	---	--	---	------------------	---	-------------	---	--------------

Intermediate floors																																							
																																							
IF1	$F_o = 0,00$	$F_d = 0,00$	$F_i = 0,10$	IF2	$F_o = 0,95$	$F_d = 0,95$	$F_i = 1,05$	IF3	$F_o = 0,80$	$F_d = 0,80$	$F_i = 1,00$	IF4	$F_o = 0,70$	$F_d = 0,70$	$F_i = 0,80$																								
																																							
IF5	$F_o = 0,60$	$F_d = 0,60$	$F_i = 0,65$	IF6	$F_o = 0,90$	$F_d = 0,90$	$F_i = 1,00$	IF7	$F_o = 0,70$	$F_d = 0,70$	$F_i = 0,80$	IF8	$F_o = 0,45$	$F_d = 0,45$	$F_i = 0,60$																								

VALORI DA CATALOGO DI Ψ - soletta - parete esterna

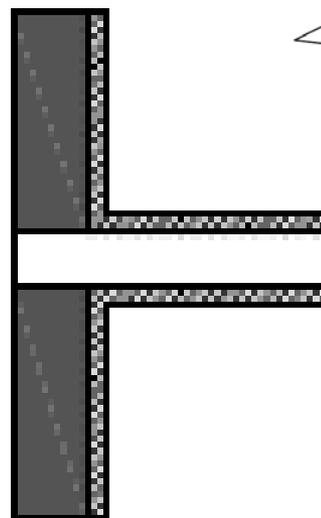


IF7

$$\Psi_0 = 0,70$$

$$\Psi_{ed} = 0,70$$

$$\Psi_1 = 0,80$$



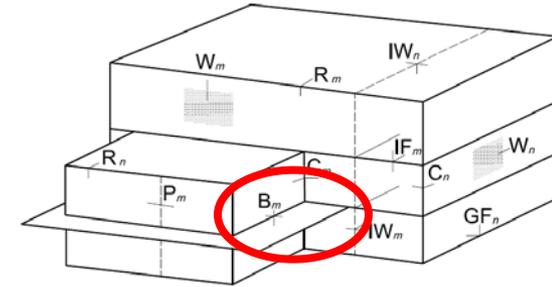
IF8

$$\Psi_0 = 0,45$$

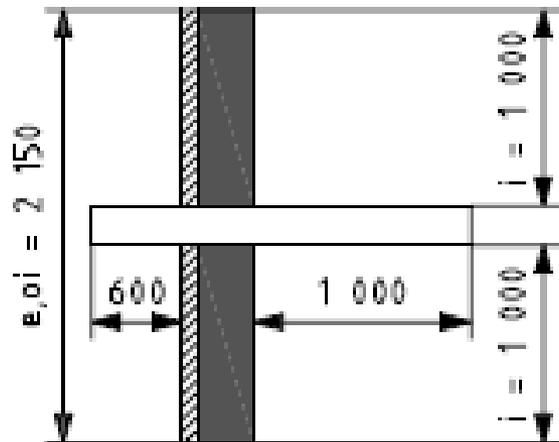
$$\Psi_{ed} = 0,45$$

$$\Psi_1 = 0,60$$

VALORI DA CATALOGO DI Ψ - balconi

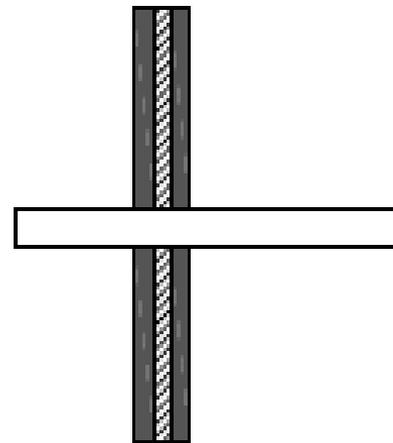


BALCONI



B1

$$\begin{aligned} \gamma_e &= 0,95 \\ \gamma_{ed} &= 0,95 \\ \gamma_i &= 1,05 \end{aligned}$$



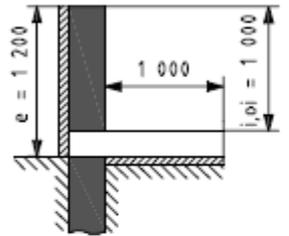
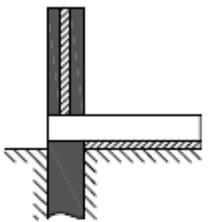
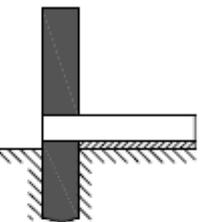
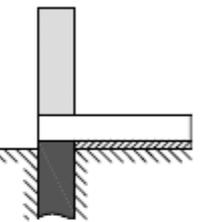
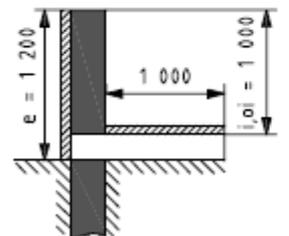
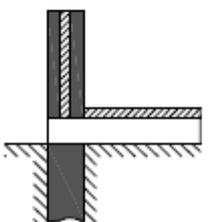
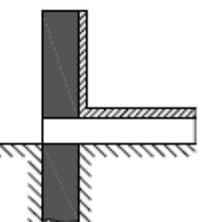
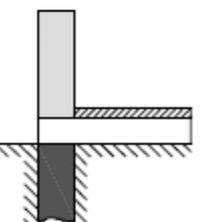
B2

$$\begin{aligned} \gamma_e &= 0,95 \\ \gamma_{ed} &= 0,95 \\ \gamma_i &= 1,05 \end{aligned}$$

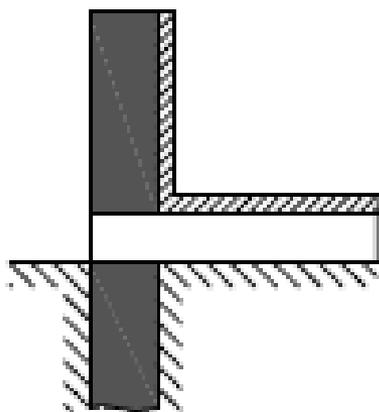
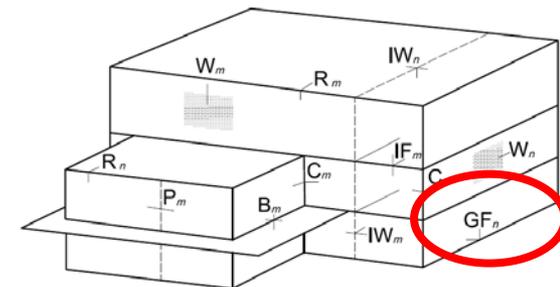
Solaio contro terra

Dimensions in mm; linear thermal transmittance in W/(m·K)

 Wall	 Lightweight wall (including lightweight masonry and timber frame walls)	 Insulating layer	 Slab/pillar	 Window frame
--	--	--	---	--

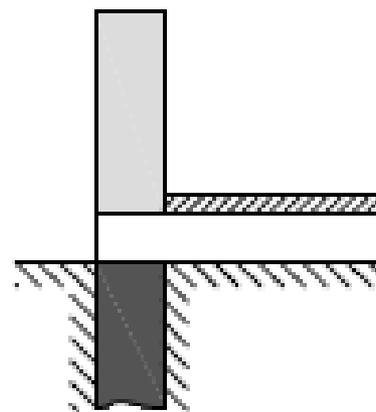
Slab-on-ground floors				
 <p>GF1</p> <p>$\psi_e = 0,65$ $\psi_{\alpha} = 0,80$ $\psi_i = 0,80$</p>	 <p>GF2</p> <p>$\psi_e = 0,60$ $\psi_{\alpha} = 0,75$ $\psi_i = 0,75$</p>	 <p>GF3</p> <p>$\psi_e = 0,55$ $\psi_{\alpha} = 0,70$ $\psi_i = 0,70$</p>	 <p>GF4</p> <p>$\psi_e = 0,50$ $\psi_{\alpha} = 0,65$ $\psi_i = 0,65$</p>	
 <p>GF5</p> <p>$\psi_e = 0,60$ $\psi_{\alpha} = 0,75$ $\psi_i = 0,75$</p>	 <p>GF6</p> <p>$\psi_e = 0,45$ $\psi_{\alpha} = 0,60$ $\psi_i = 0,60$</p>	 <p>GF7</p> <p>$\psi_e = -0,05$ $\psi_{\alpha} = 0,10$ $\psi_i = 0,10$</p>	 <p>GF8</p> <p>$\psi_e = 0,05$ $\psi_{\alpha} = 0,20$ $\psi_i = 0,20$</p>	

VALORI DA CATALOGO DI Ψ – Solaio contro terra



GF7

$$\begin{aligned}\psi_e &= -0,05 \\ \psi_{cl} &= 0,10 \\ \psi_i &= 0,10\end{aligned}$$



GF8

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,05 \\ \psi_{cl} &= 0,20 \\ \psi_i &= 0,20\end{aligned}$$

Determinazione di ψ

Basi di calcolo per i valori di progetto

per tutte le tipologie $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$,

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

per tutte le strutture: $d = 0,3 \text{ m}$

per strutture isolate:

trasmissione termica $U = 0,343 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

resistenza termica dello strato isolante $R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$

per strutture non isolate:

trasmissione termica $U = 0,375 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

per tutte le solette: $d = 0,15 \text{ m}$ $\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m K})$

per i tetti:

trasmissione termica $U = 0,365 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

resistenza termica dello strato isolante $R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$

per i telai delle aperture: $d = 0,1 \text{ m}$

per i pilastri: $d = 0,3 \text{ m}$ $\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m K})$

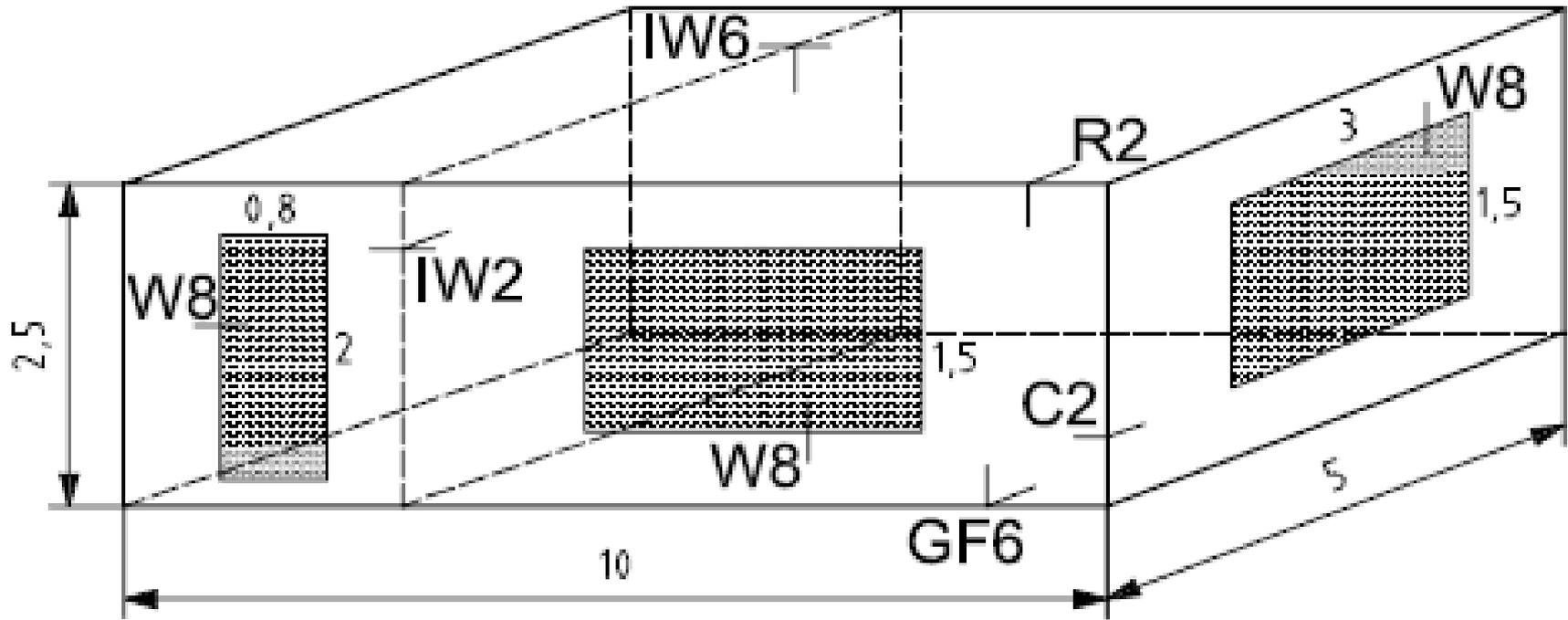
Determinazione di ψ

Basi di calcolo per i valori di progetto

Questi parametri sono stati scelti per ottenere valori di Ψ di riferimento che siano prossimi ai valori massimi che è probabile si realizzino in pratica e rappresentano perciò una **sovrastima cautelativa** degli effettivi ponti termici, cioè non sottostimano la dispersione termica attraverso tali ponti termici.

Ponti termici – Esempio di calcolo (dimensioni globali interne)

Dimensions in metres

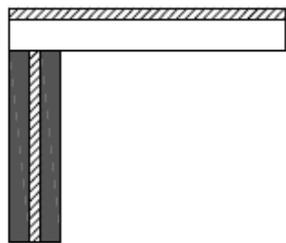
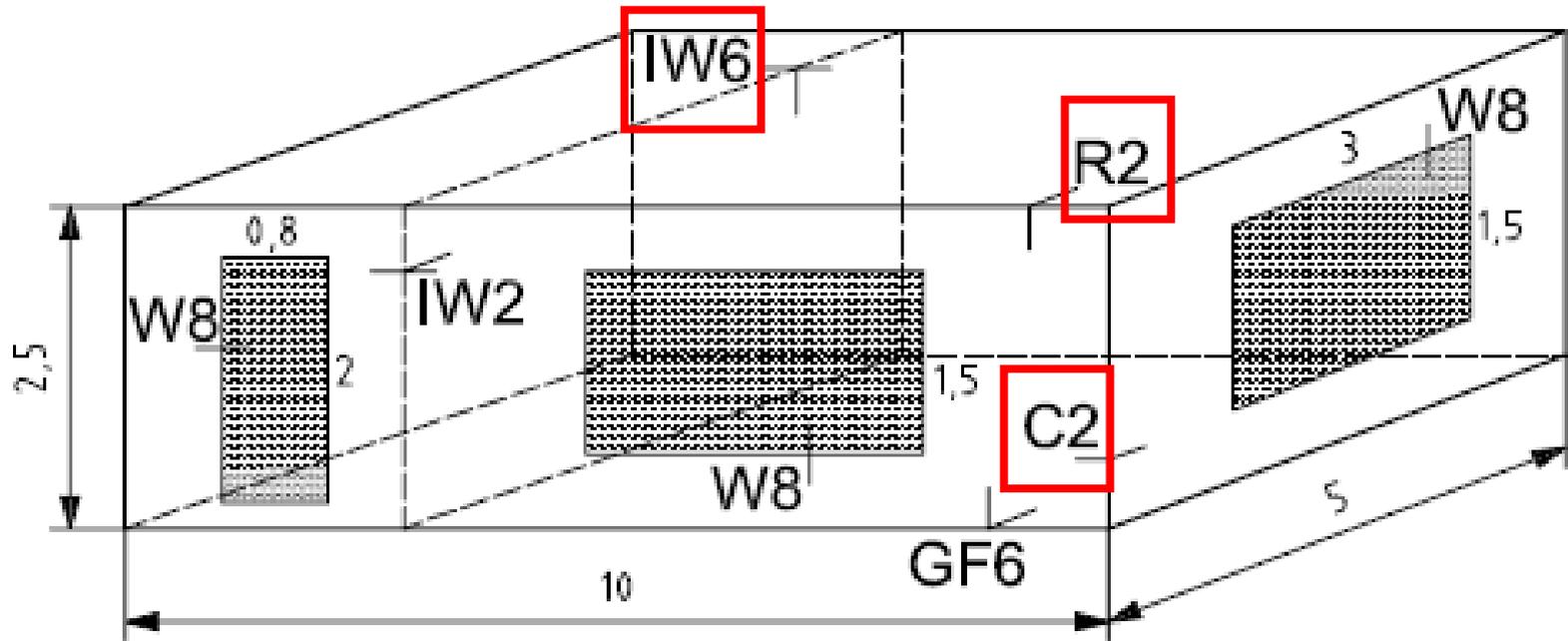


Trascurando i ponti termici di punto:

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

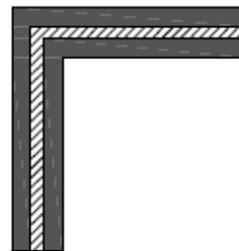
Ponti termici – Esempio di calcolo (dimensioni globali interne)

Dimensions in metres



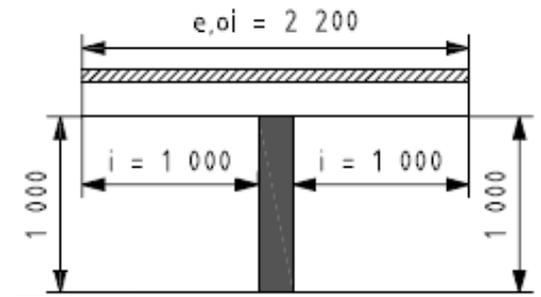
R2

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,50 \\ \psi_{oi} &= 0,75 \\ \psi_i &= 0,75\end{aligned}$$



C2

$$\begin{aligned}\psi_e &= -0,10 \\ \psi_{oi} &= 0,10 \\ \psi_i &= 0,10\end{aligned}$$

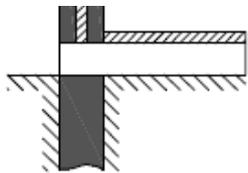
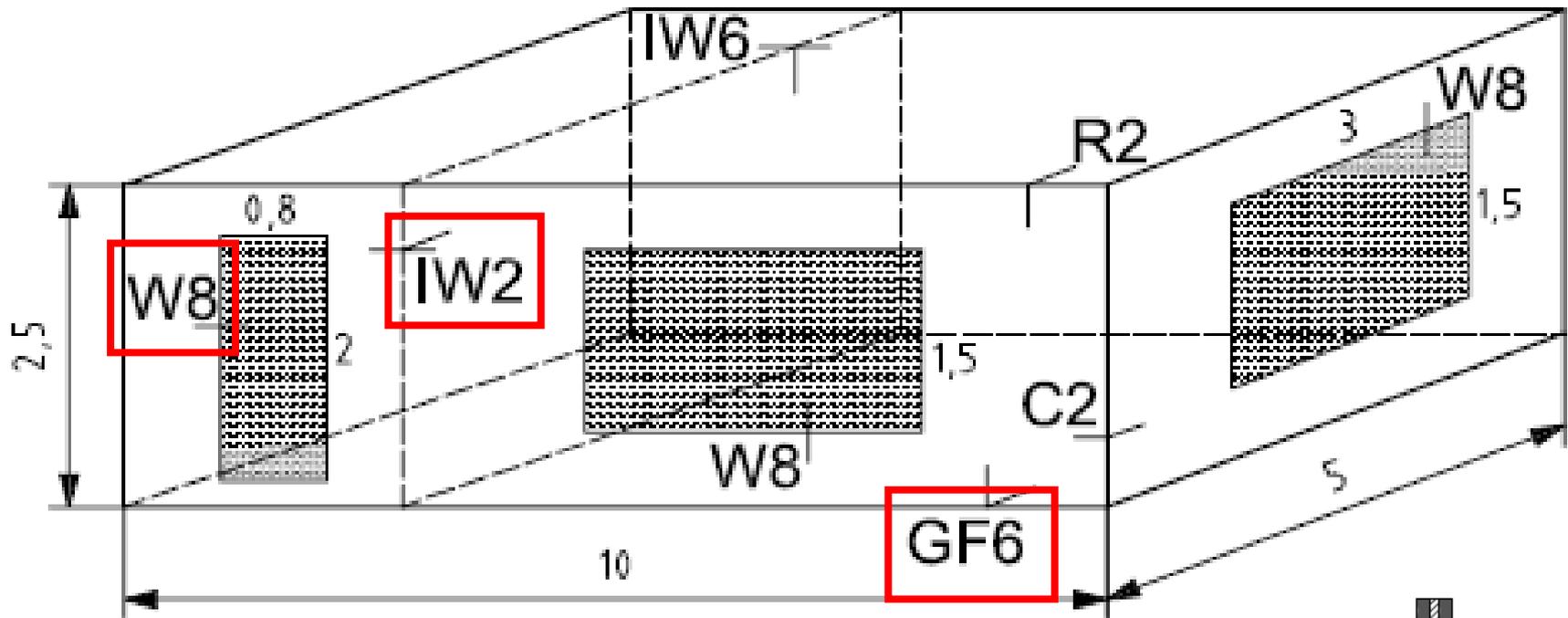


IW6

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,00 \\ \psi_{oi} &= 0,00 \\ \psi_i &= 0,10\end{aligned}$$

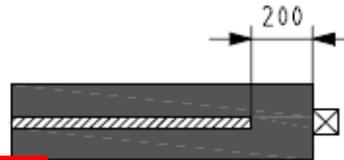
Ponti termici – Esempio di calcolo (dimensioni globali interne)

Dimensions in metres



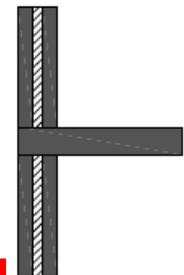
GF6

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,45 \\ \psi_{oi} &= 0,60 \\ \psi_i &= 0,60\end{aligned}$$



W8

$$\begin{aligned}\psi_e &= 1,00 \\ \psi_{oi} &= 1,00 \\ \psi_i &= 1,00\end{aligned}$$



IW2

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,95 \\ \psi_{oi} &= 0,95 \\ \psi_i &= 1,05\end{aligned}$$

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali interne)

Elemento edilizio	U [W/(m²K)]	A_{oi} [m²]	U A_{oi} [W/K]
Pareti	0,40	64,4	25,76
Tetto	0,30	50,0	15,00
Pavimento su terreno	0,35	50,0	17,50
Finestra	3,50	9,0	31,50
Porta	3,00	1,6	4,80
Totale			94,56

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali interne)

Ponte termico	Tipo ponte termico	Ψ_{oi} [W/(m K)]	L_{oi} [m]	$\Psi_{oi} L_{oi}$ [W/K]
Parete/tetto	R2	0,75	30,0	22,50
Parete/parete	C2	0,10	10,0	1,00
Parete/pavimento	GF6	0,60	30,0	18,00
Partizione/parete	IW2	0,95	5,0	4,75
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,0	0,00
Architrave, telaio, stipite	W8	1,00	23,6	23,60
Totale				69,85

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali interne)

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k = 94,56 + 69,85 = 164,41 \text{ W/K}$$

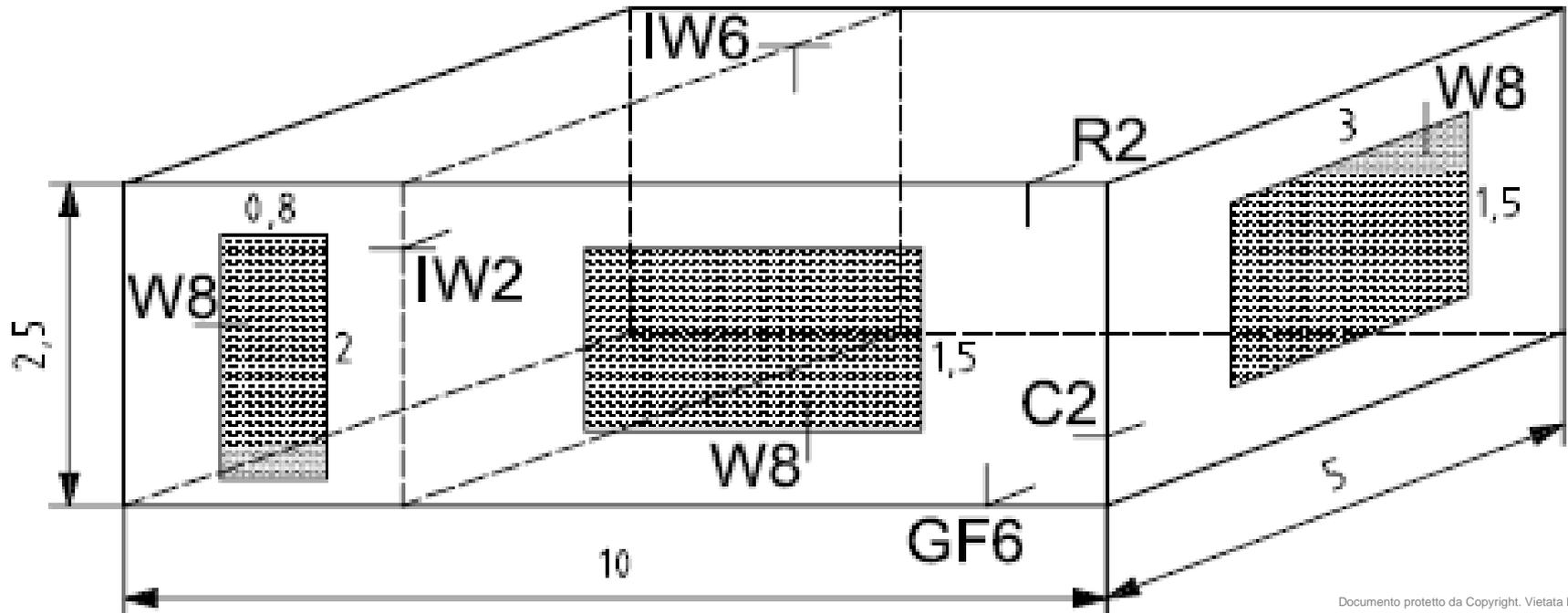
Utilizzando le dimensioni interne totali, il coefficiente di trasmissione del calore attraverso i ponti termici è il 42% del totale.

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali esterne)

Spessori: Pareti perimetrali 30 cm
Tetto 25 cm
Pavimento 25 cm

Dimensioni esterne: 10.6 x 5.6 x 3.0 m

Dimensions in metres



Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali esterne)

Elemento edilizio	U [W/(m²K)]	A_{oe} [m²]	U A_{oe} [W/K]
Pareti	0,40	86,6	34,64
Tetto	0,30	59,36	17,81
Pavimento su terreno	0,35	59,36	20,78
Finestra	3,50	9,0	31,50
Porta	3,00	1,6	4,80
Totale			109,52

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali esterne)

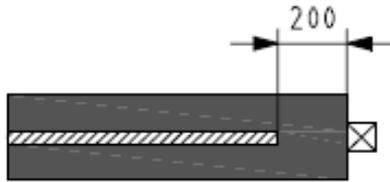
Ponte termico	Tipo ponte termico	Ψ_{oe} [W/(m K)]	L _{oe} [m]	$\Psi_{oe} L_{oe}$ [W/K]
Parete/tetto	R2	0,50	32,4	16,20
Parete/parete	C2	-0,10	12,0	-1,20
Parete/pavimento	GF6	0,45	32,4	14,58
Partizione/parete	IW2	0,95	6,0	5,70
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,6	0,00
Architrave, telaio, stipite	W8	1,00	23,6	23,60
Totale				58,88

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali esterne)

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k = 109,52 + 58,88 = 168,40 \text{ W/K}$$

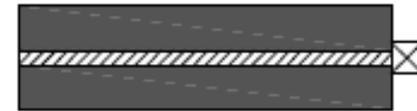
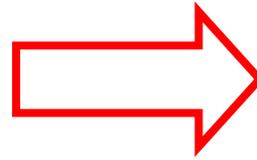
Utilizzando le dimensioni esterne totali, il coefficiente di trasmissione del calore attraverso i ponti termici è il 36% del totale.

Valutazione accurata ponti termici



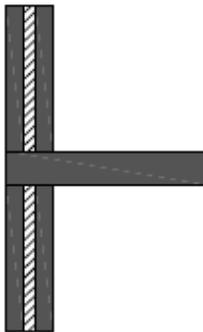
W8

$$\begin{aligned}\psi_e &= 1,00 \\ \psi_{oi} &= 1,00 \\ \psi_i &= 1,00\end{aligned}$$



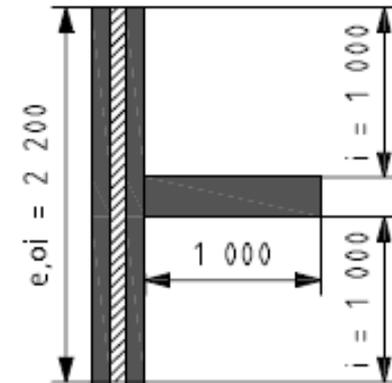
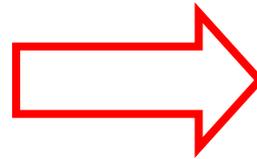
W11

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,00 \\ \psi_{\alpha} &= 0,00 \\ \psi_i &= 0,00\end{aligned}$$



IW2

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,95 \\ \psi_{oi} &= 0,95 \\ \psi_i &= 1,05\end{aligned}$$



IW5

$$\begin{aligned}\psi_e &= 0,00 \\ \psi_{\alpha} &= 0,00 \\ \psi_i &= 0,10\end{aligned}$$

Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali interne con dettaglio più accurato del ponte termico)

Ponte termico	Tipo ponte termico	Ψ_{oi} [W/(m K)]	L_{oi} [m]	$\Psi_{oi} L_{oi}$ [W/K]
Parete/tetto	R2	0,75	30,0	22,50
Parete/parete	C2	0,10	10,0	1,00
Parete/pavimento	GF6	0,60	30,0	18,00
Partizione/parete	IW2	0,95	5,0	4,75
Partizione/parete	IW5	0,00	5,0	0,00
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,0	0,00
Architrave, telaio, stipite	W8	1,00	23,6	23,60
Architrave, telaio, stipite	W11	0,00	23,6	0,00

Totale

41,50

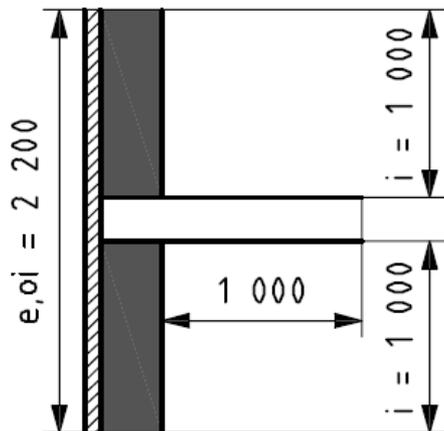
Coefficiente di scambio termico (dimensioni globali interne con dettaglio più accurato del ponte termico)

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k = 94,56 + 41,50 = 136,06 \text{ W/K}$$

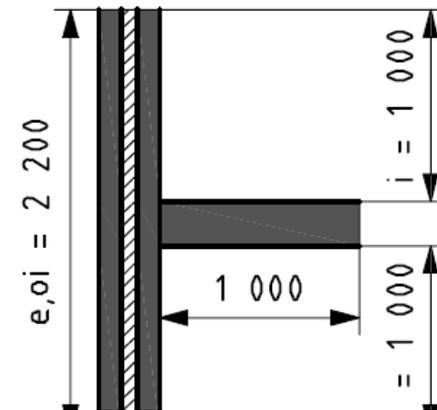
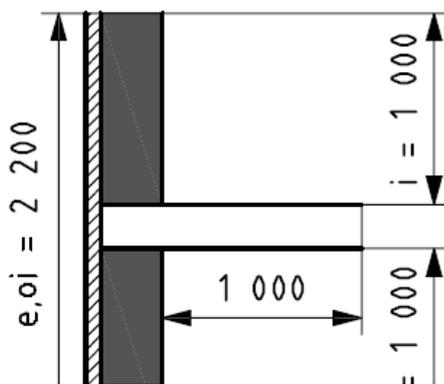
Utilizzando le dimensioni interne totali, definendo meglio il ponte termico, l'influenza dei ponti termici è diminuita del 41% da 69.85 a 41.50 ed ha ridotto il coefficiente globale di trasmissione del calore del 17% da 164.41 a 136.06 W/K

Soluzioni tecnicamente efficaci per l'eliminazione del ponte termico

Intermediate floors

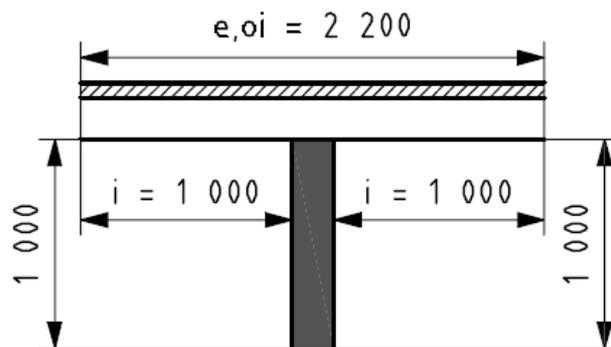


Internal walls



IF1

$$\begin{aligned}\Psi_e &= 0,00 \\ \Psi_{oi} &= 0,00 \\ \Psi_i &= 0,10\end{aligned}$$



IW6

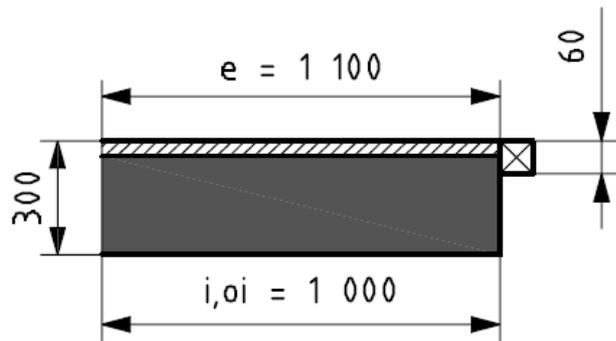
$$\begin{aligned}\Psi_e &= 0,00 \\ \Psi_{oi} &= 0,00 \\ \Psi_i &= 0,10\end{aligned}$$

IW4

$$\begin{aligned}\Psi_e &= 0,00 \\ \Psi_{oi} &= 0,00 \\ \Psi_i &= 0,20\end{aligned}$$

Soluzioni tecnicamente efficaci per l'eliminazione del ponte termico

Window and door openings

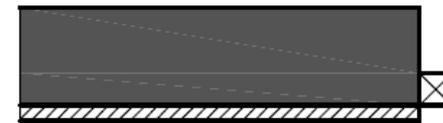


W1

$$\Psi_e = 0,00$$

$$\Psi_{oi} = 0,00$$

$$\Psi_i = 0,00$$

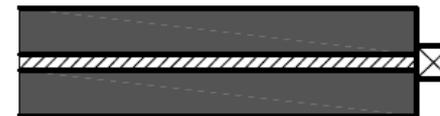


W15

$$\Psi_e = 0,00$$

$$\Psi_{oi} = 0,00$$

$$\Psi_i = 0,00$$



W11

$$\Psi_e = 0,00$$

$$\Psi_{oi} = 0,00$$

$$\Psi_i = 0,00$$

UNI EN ISO 10211-2 Ponti termici in edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Parte 2: Ponti termici lineari

La Parte 1 di questa norma fornisce metodi generali per il calcolo dei flussi termici e delle temperature superficiali su ponti termici di forma qualsiasi e con un numero arbitrario di condizioni al contorno.

Questa parte tratta di ponti termici lineari limitati da due differenti ambienti termici.

Poiché il modello bidimensionale è una semplificazione della costruzione reale, i risultati di calcolo sono un'approssimazione dei risultati calcolati secondo un modello tridimensionale in accordo con EN ISO 10211-1

Determinazione della trasmittanza termica lineica

La trasmittanza termica lineica è fornita da:

$$\Psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j l_j$$

dove:

L^{2D} è il coefficiente di accoppiamento termico lineico ottenuto dal calcolo 2-D del componente esaminato di separazione tra i due ambienti. Ψ è la trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare che separa i due ambienti considerati;

La somma dei due termini può dare valore negativo in quanto il peso del ponte termico può non essere rilevante in relazione al termine correttivo valutato in base alla trasmittanza della parete corrente U

Determinazione della trasmittanza termica lineica

La trasmittanza termica lineica è fornita da:

$$\Psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j l_j$$

dove:

L^{2D} è il coefficiente di accoppiamento termico lineico ottenuto dal calcolo 2-D del componente esaminato di separazione tra i due ambienti. Ψ è la trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare che separa i due ambienti considerati;

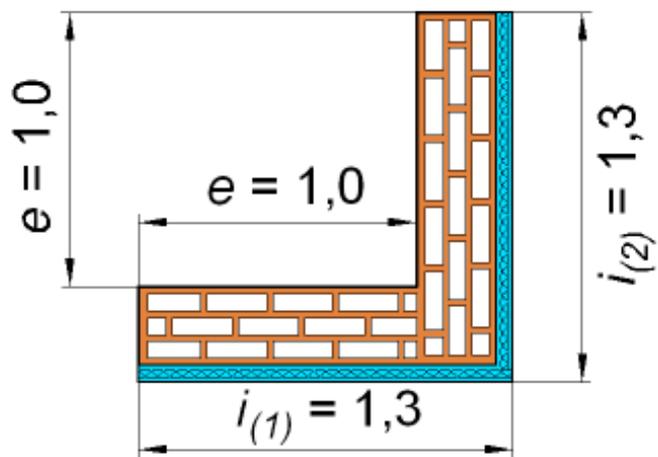
U_j è la trasmittanza termica del j-esimo componente monodimensionale di separazione tra i due ambienti considerati;

l_j è la lunghezza sulla quale si applica il valore U_j nel modello geometrico 2-D;

N è il numero dei componenti 1-D.

Valori di L^{2D}

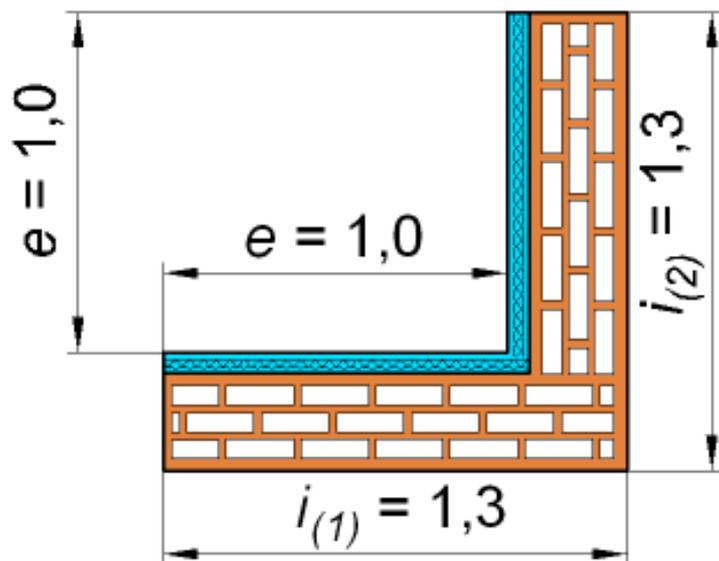
Angoli



C7

$L^{2D} = 0,83$

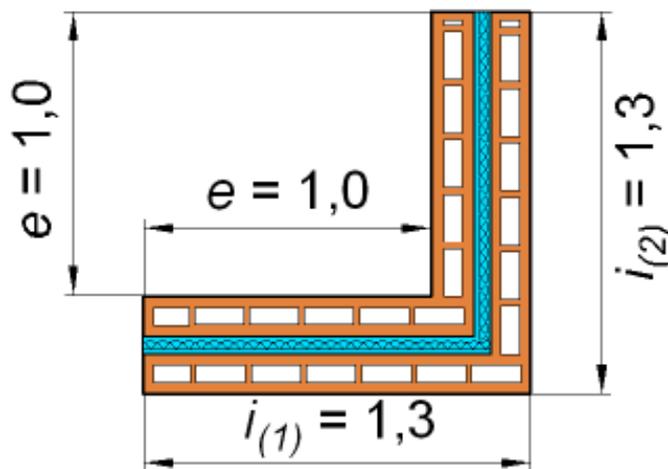
Angoli



C5

$L^{2D} = 0,71$

Angoli

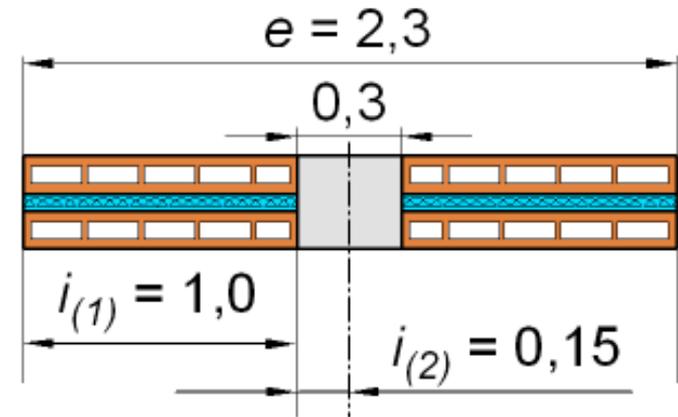


C6

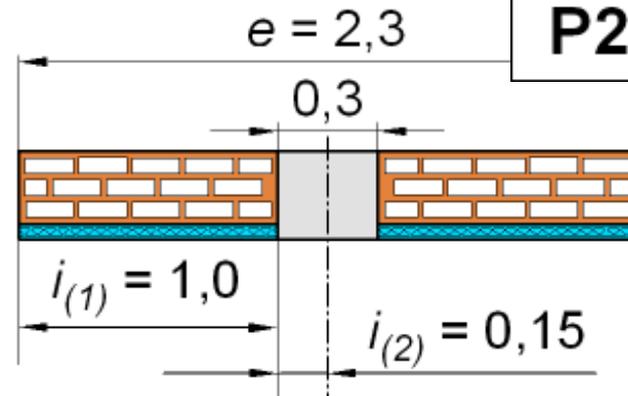
$L^{2D} = 0,77$

Valori di L^{2D}

Pilastrini



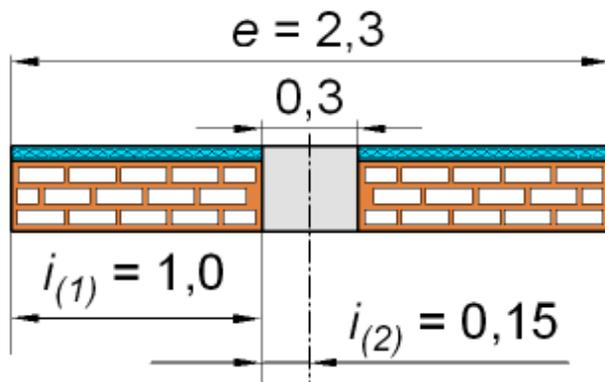
Pilastrini



P2

$$L^{2D} = 2,01$$

Pilastrini



P1

$$L^{2D} = 2,09$$

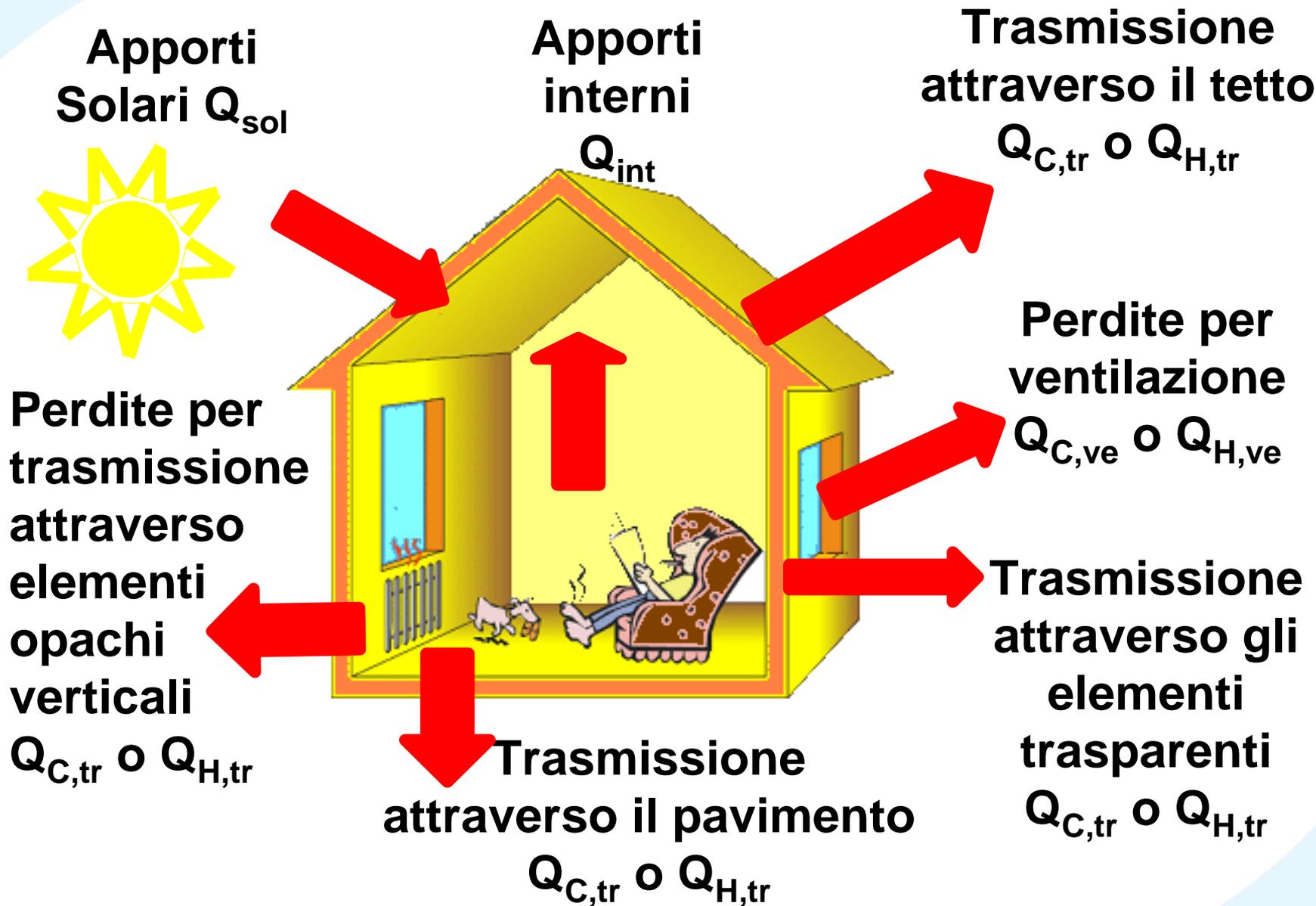
P3

$$L^{2D} = 1,83$$

Le basi del bilancio energetico del sistema edificio-impianto termico

Prof. Paola Ricciardi

DISPERSIONI TERMICHE



EVOLUZIONE DELLA METODOLOGIA DI CALCOLO NELLE NORME DI RIFERIMENTO



Norma UNI EN ISO 832:2001

calcolo dei fabbisogni invernali solo per il settore residenziale



RITIRATA

UNI EN ISO 13790:2008 calcolo dei fabbisogni invernali ed estivi per il settore residenziale e terziario

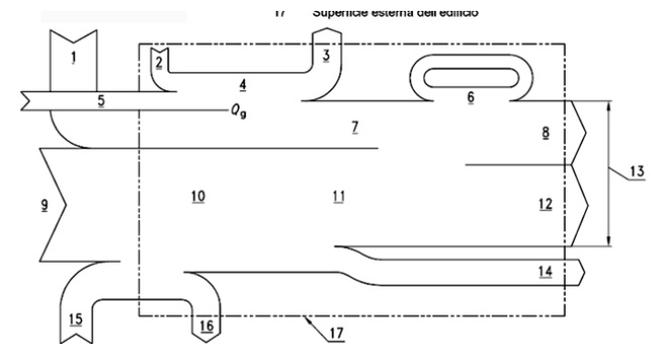
NOTA: Le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790 sono fornite dalla norma tecnica **UNI/TS 11300** parte prima e seconda

UNI EN ISO 832:2001 calcolo dei fabbisogni invernali solo per il settore residenziale



RITIRATA

- 1 Apporti solari Q_s
- 2 Apporti dovuti al metabolismo
- 3 Apporti non utilizzati
- 4 Apporti interni Q_i
- 5 Energia da altre apparecchiature
- 6 Calore recuperato
- 7 Apporti utili ηQ_g
- 8 Perdite per ventilazione Q_r
- 9 Energia primaria per riscaldamento Q
- 10 Energia termica utile dal generatore Q_o
- 11 Energia termica utile per lo spazio riscaldato Q_h
- 12 Perdite per trasmissione Q_T
- 13 Dispersione termica Q_l
- 14 Calore per acqua calda sanitaria Q_w
- 15 Energia recuperata Q_r
- 16 Perdite tecniche Q_t
- 17 Superficie esterna dell'edificio



UNI EN ISO 13790:2008

metodi di calcolo

del fabbisogno di energia

per il riscaldamento

ed il raffrescamento di un edificio

dell'influenza delle perdite degli impianti di

riscaldamento e raffrescamento,

del recupero termico e dell'utilizzo delle fonti di

energia rinnovabile



UNI EN ISO 13790:2008

Calcolo,
per ogni mese e
per ogni zona dell'edificio,
dei fabbisogni netti di energia
per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$)
e raffrescamento ($Q_{C,nd}$).

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ls} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} =$$
$$(Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol})$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ls} =$$
$$(Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$



UNI EN ISO 13790:2008 – Calcolo dei fabbisogni netti di energia per il riscaldamento $Q_{H,nd}$

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ls} \cdot \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) \cdot \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol})$$

fattore di utilizzazione degli apporti termici

[MJ]	scambi termici
$Q_{H,ls}$	totale
Q_{gn}	apporti termici totali
$Q_{H,tr}$	per trasmissione
$Q_{H,ve}$	per ventilazione
Q_{int}	apporti termici interni
Q_{sol}	apporti termici solari



UNI EN ISO 13790:2008 – Calcolo dei fabbisogni netti di energia per il raffrescamento $Q_{C,nd}$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ls} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

fattore di utilizzazione degli apporti termici

[MJ]	scambi termici
Q_{gn}	apporti termici totali
$Q_{C,ls}$	totale
$Q_{C,tr}$	per trasmissione
$Q_{C,ve}$	per ventilazione
Q_{int}	apporti termici interni
Q_{sol}	apporti termici solari



UNI EN ISO 13790:2008 – Calcolo dei fabbisogni netti di energia per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$).

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ls} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol})$$

$Q_{H,ls}$ = scambio termico totale nel caso di riscaldamento [MJ]

$Q_{H,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento [MJ]

$Q_{H,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento [MJ]

Q_{gn} = apporti termici totali [MJ]

Q_{int} = apporti termici interni [MJ]

Q_{sol} = apporti termici solari [MJ]

$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti termici

UNI EN ISO 13790: 2008 – Calcolo dei fabbisogni netti di energia per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$).

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ls} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

$Q_{C,ls}$ = scambio termico totale nel caso di raffrescamento [MJ]

$Q_{C,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso di raffrescamento [MJ]

$Q_{C,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso di raffrescamento [MJ]

Q_{gn} = apporti termici totali [MJ]

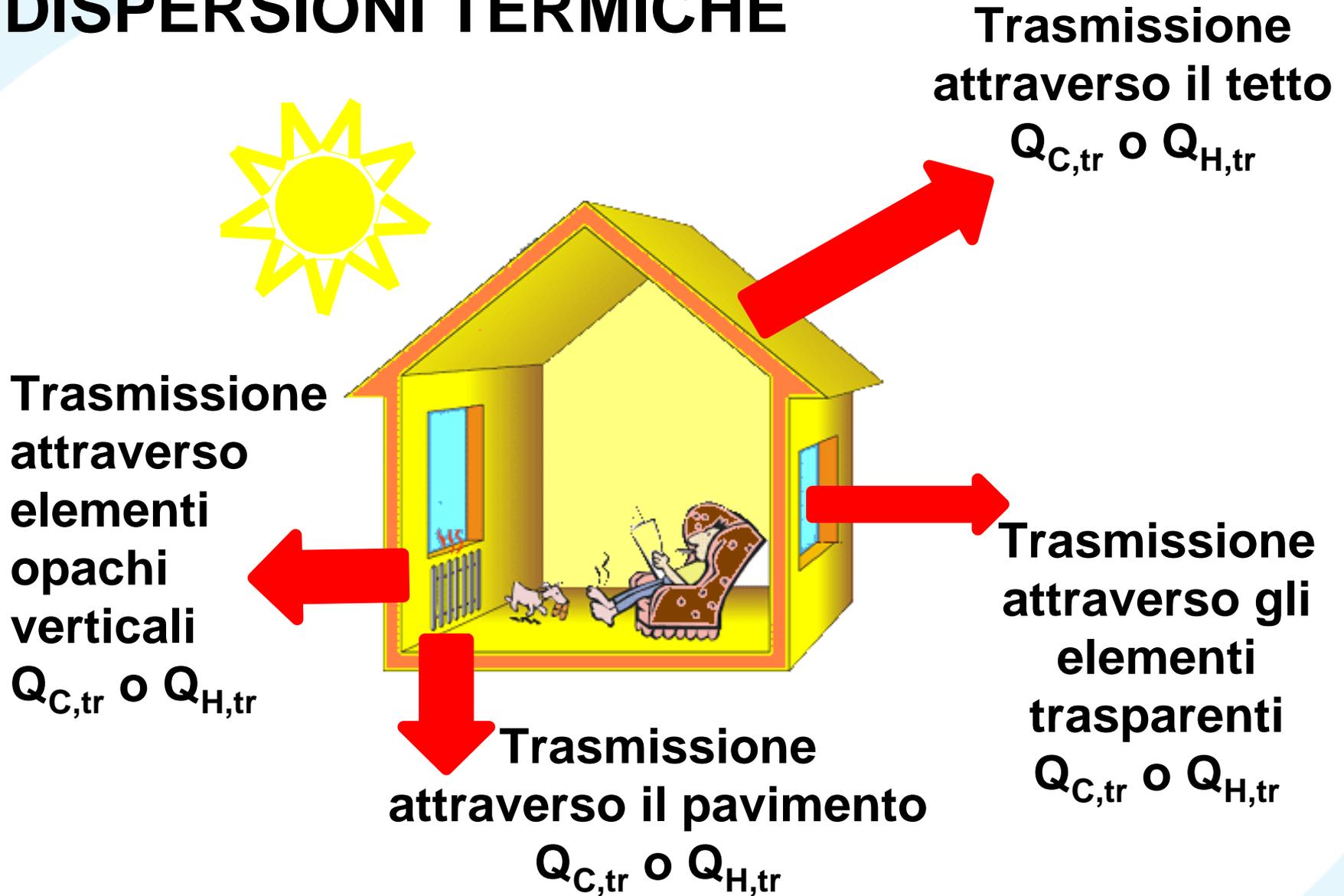
Q_{int} = apporti termici interni [MJ]

Q_{sol} = apporti termici solari [MJ]

$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti termici;

$\eta_{C,ls}$ = fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

DISPERSIONI TERMICHE



UNI EN ISO 13790: 2008

Calcolo degli scambi termici



Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

- per trasmissione e ventilazione nel caso di **RISCALDAMENTO**

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t$$
$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad [MJ]$$

$H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno - esterno [W/K]

$H_{ve,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto [W/K]

UNI EN ISO 13790: 2008

Calcolo degli scambi termici



Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

- per trasmissione e ventilazione nel caso di **RISCALDAMENTO**

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t \text{ [MJ]}$$

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t$$

$\theta_{int,set,H}$ è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona [°C]

θ_e è la temperatura media mensile dell'ambiente esterno [°C]

EN ISO 13790:2008

Calcolo degli scambi termici



Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

- per trasmissione e ventilazione nel caso di **RISCALDAMENTO**

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t$$
$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad [MJ]$$

$F_{r,k}$ è il fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste

$\Phi_{r,mn,k}$ è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo [W]

t è la durata del mese considerato [Ms]

UNI EN ISO 13790: 2008

Calcolo degli scambi termici



Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

- per trasmissione e ventilazione nel caso di **RAFFRESCAMENTO**

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t$$
$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t \quad [MJ]$$

$H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno [W/K]

$H_{ve,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto [W/K]

UNI EN ISO 13790: 2008

Calcolo degli scambi termici



Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

- per trasmissione e ventilazione nel caso di **RAFFRESCAMENTO**

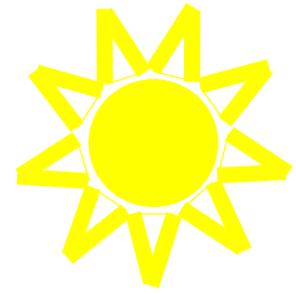
$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t$$
$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t \quad [MJ]$$

$\theta_{int,set,C}$ è la temperatura interna di regolazione per il raffrescamento della zona [°C]

θ_e è la temperatura media mensile dell'ambiente esterno [°C]

EN ISO 13790:2008

Calcolo degli scambi termici



Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

- per trasmissione e ventilazione nel caso di **RAFFRESCAMENTO**

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \{ \sum F_{r,k} \Phi_{r,mnk} \} \cdot t$$
$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad [MJ]$$

$F_{r,k}$ è il fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste

$\Phi_{r,mn,k}$ è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo [W]

t è la durata del mese considerato [Ms]

UNI EN ISO 13789:2008

Coefficienti globali di scambio termico

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A$$

H_D = coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno [W/K]

H_g = coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno [W/K]

H_U = coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati, [W/K]

H_A = coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone (interne o meno all'edificio) climatizzate a temperatura diversa, [W/K]

DISPERSIONI TERMICHE



**Perdite per
ventilazione**

$Q_{C,ve}$ o $Q_{H,ve}$

UNI EN ISO 13790:2008

Coefficienti globali di scambio termico

$$H_{ve,adj} = \rho_a \cdot c_a \cdot \left\{ \sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \right\}$$

$\rho_a c_a$ = capacità termica volumica dell'aria, pari a 1200 J/(m³K);

$q_{ve,k,mn}$ = portata mediata sul tempo del flusso d'aria k-esimo [m³/s];

$b_{ve,k}$ = fattore di correzione della temperatura per il flusso d'aria k-esimo

UNI EN ISO 13790:2008

Coefficienti globali di scambio termico

$$H_{ve,adj} = \rho_a \cdot c_a \cdot \left\{ \sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \right\}$$

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \cdot q_{ve,k}$$

$q_{ve,k, mn}$ = portata mediata sul tempo del flusso d'aria k-esimo, espressa in m³/s;

$f_{ve,t,k}$ = frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria k-esimo

UNI EN ISO 13790: 2008

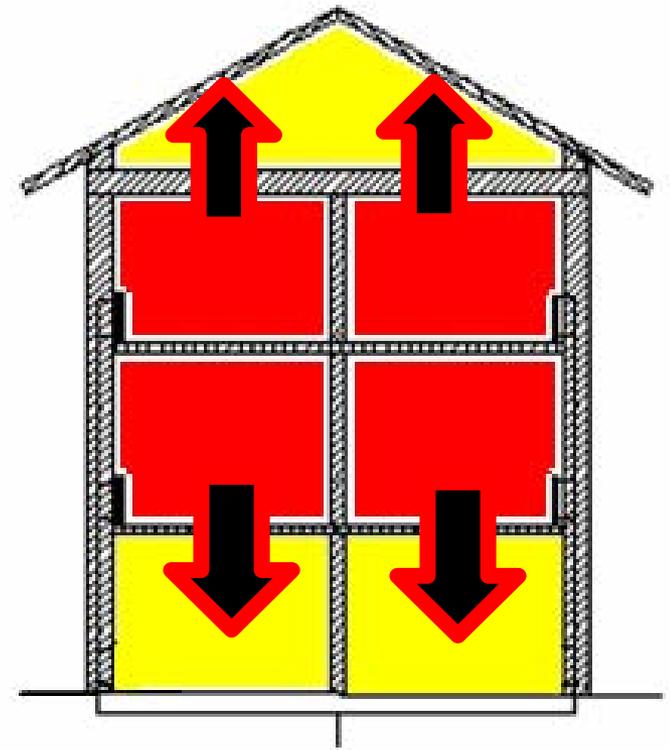
Scambio termico verso ambienti non riscaldati

$$H_U = H_{iu} \cdot b_{tr,x}$$

H_U = coefficiente globale di scambio termico per trasmissione, tra il volume climatizzato e gli ambienti esterni attraverso gli ambienti non climatizzati [W/K]

H_{iu} = coefficiente globale di scambio termico tra l'ambiente climatizzato e l'ambiente non climatizzato [W/K]

$b_{tr,x}$ = fattore di correzione dello scambio termico tra ambienti climatizzato e non climatizzato



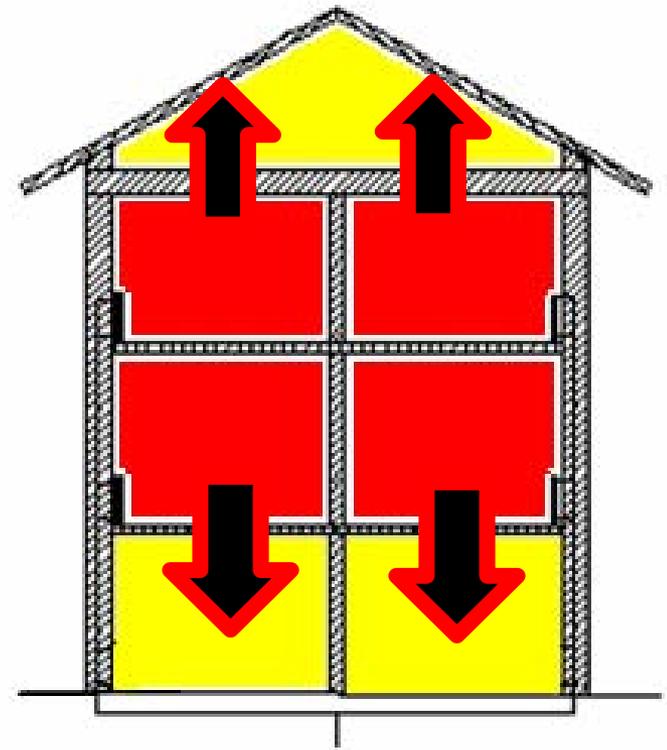
UNI EN ISO 13789:2008

Scambio termico verso ambienti non riscaldati

$$H_U = H_{iu} \cdot b_{tr,x}$$

Fattore di correzione $b_{tr,x}$

Ambiente confinante	$b_{tr,x}$
Sottotetto aerato	1
Sottotetto ben sigillato	0,80
Appartamenti non climatizzati	0,50
Corpi scale piano terra	0,70
Corpi scala altri piani	0,50
Cantina con serramenti chiusi	0,60
Cantina con serramenti aperti	0,90



UNI EN ISO 13790: 2008

Scambio termico verso il terreno

$$H_G = A \cdot U_f \cdot b_{tr,g}$$

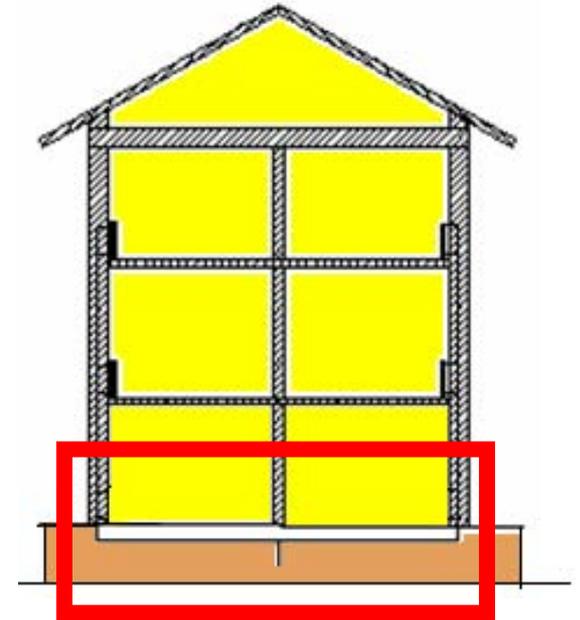
In assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise,

il coefficiente di accoppiamento termico in regime stazionario tra gli ambienti interno ed esterno è dato da:

U_f = trasmittanza termica della parte sospesa del pavimento (tra l'ambiente interno e lo spazio sottopavimento), [W/m²K]

$b_{tr,g}$ = fattore di correzione

A = area di scambio [m²]

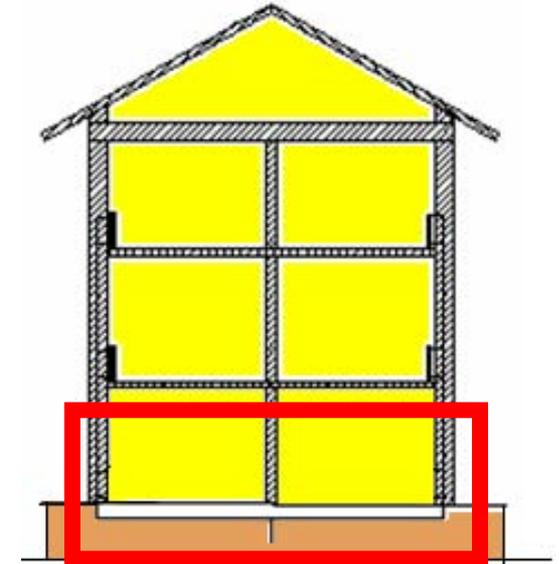


UNI EN ISO 13789:2008 – Scambio termico verso il terreno

$$H_G = A \cdot U_f \cdot b_{tr,g}$$

Fattore di correzione $b_{tr,g}$

Ambiente confinante	$b_{tr,g}$
Pavimento controterra	0,45
Parete controterra	0,45
Pavimento su vespaio aerato	0,85
Piano interrato climatizzato	0,45
Piano interrato non climatizzato o parzialmente climatizzato	0,45



UNI EN ISO 13790:2008

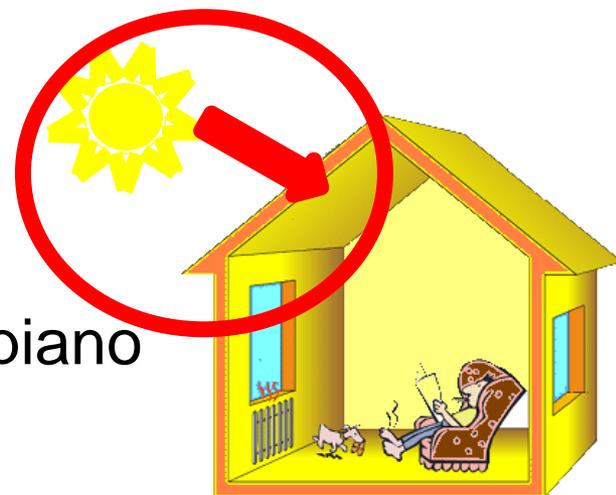
Calcolo flusso termico solare

$$\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k}$$

$F_{sh,ob,k}$ = fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima;

$A_{sol,k}$ = area di captazione solare effettiva della superficie k-esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, [m²];

$I_{sol,k}$ = irradianza solare media mensile, sulla superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, [W/m²]



UNI EN ISO 13790:2008

Calcolo flusso termico solare

area di captazione del componente vetrato

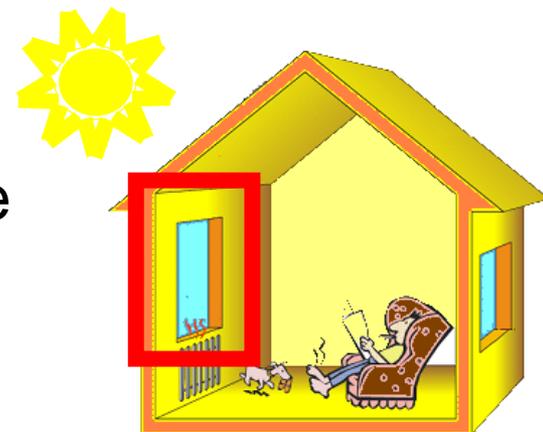
$$A_{\text{sol}} = F_{\text{sh,gl}} g_{\text{gl}} (1 - F_{\text{F}}) A_{\text{w,p}}$$

$F_{\text{sh,gl}}$ = fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili;

g_{gl} = trasmittanza di energia solare della parte trasparente del componente;

F_{F} = frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;

$A_{\text{w,p}}$ = area proiettata totale del componente vetrato (l'area del vano finestra), espressa in m².



UNI EN ISO 13790:2008

Calcolo flusso termico solare

area di captazione della parete opaca

$$A_{sol} = \alpha_{S,c} R_{se} U_c A_c$$

A_{sol} = area di captazione solare effettiva di una parte opaca dell'involucro edilizio, [m²]

$\alpha_{sol,c}$ = fattore di assorbimento solare della parte opaca;

R_{se} = resistenza termica superficiale esterna della parte opaca, determinato secondo la norma EN ISO 6946, [m²K/W]

U_c = trasmittanza termica della parte opaca, [W/(m² K)]

A_c = area proiettata della parte opaca, [m²]



UNI EN ISO 13790:2008

Apporti solari termici - tende

* Fattore di riduzione di alcuni tipi di tenda

Tipo di tenda	Proprietà ottiche della tenda		Fattori di riduzione con	
	assorbimento	trasmissione	tenda interna	tenda esterna
Veneziane bianche	0,1	0,05	0,25	0,10
		0,1	0,30	0,15
		0,3	0,45	0,35
Tende bianche	0,1	0,5	0,65	0,55
		0,7	0,80	0,75
		0,9	0,95	0,95
Tessuti colorati	0,3	0,1	0,42	0,17
		0,3	0,57	0,37
		0,5	0,77	0,57
Tessuti rivestiti di alluminio	0,2	0,05	0,20	0,08

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti solari termici sui **componenti opachi**

In assenza di dati di progetto attendibili

il fattore di assorbimento solare può essere assunto pari a
0,3 per colore chiaro della superficie esterna

0,6 per colore medio

0,9 per colore scuro

sui **componenti trasparenti**

* Tipi di vetro	g_n
Vetro singolo	0.85
Doppio vetro normale	0.75
Doppio vetro con rivestimento basso emissivo	0.67
Triplo vetro normale	0.70
Triplo vetro con doppio rivestimento basso emissivo	0.50
Doppia finestra	0.75

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti solari termici - Ombreggiatura

$$F_{sh,ob} = F_{hor} \cdot F_{ov} \cdot F_{fin}$$

$F_{sh,ob}$ = fattore di riduzione per ombreggiatura

F_{hor} = fattore di ombreggiatura per ostruzioni esterne

F_{ov} = fattore di ombreggiatura per aggetti orizzontali

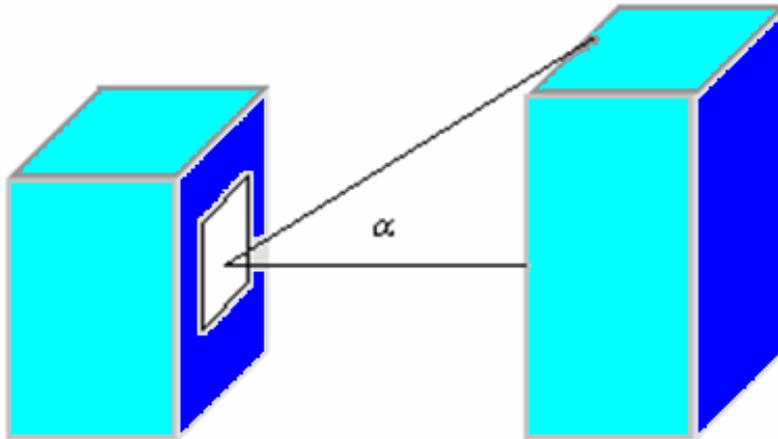
F_{fin} = fattore di ombreggiatura per verticali

UNI EN ISO 13790:2008

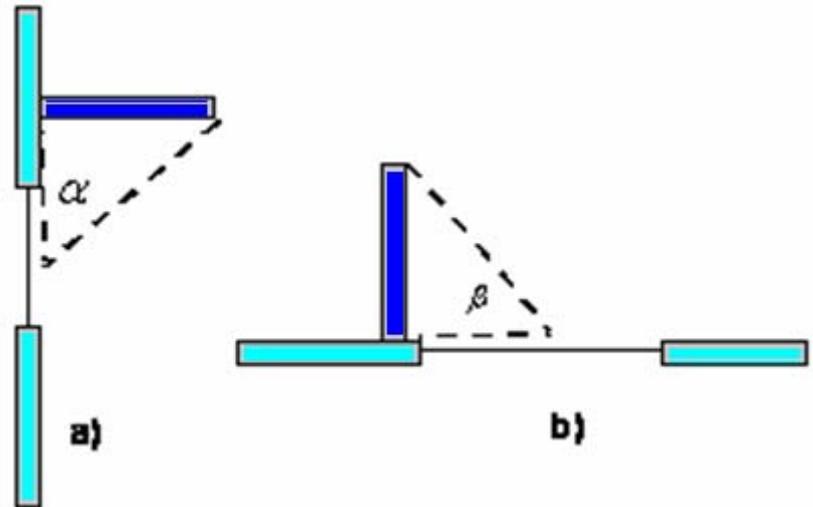
Apporti solari termici - Ombreggiatura

$$F_{sh,ob} = F_{hor} \cdot F_{ov} \cdot F_{fin}$$

Angolo dell'orizzonte
ombreggiato da
un'ostruzione esterna



a) Sezione verticale
b) Sezione orizzontale



UNI EN ISO 13790:2008

Apporti solari termici - Ombreggiatura

fattore di ombreggiatura F_{hor} per ostruzioni esterne

Angolo sull'orizzonte	35 ° N latitudine			45 ° N latitudine			55 ° N latitudine		
	S	E/O	N	S	E/O	N	S	E/O	N
0 °	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10 °	1,00	0,98	1,00	0,97	0,95	1,00	0,94	0,92	0,99
20 °	1,00	0,89	1,00	0,85	0,82	0,98	0,68	0,75	0,95
30 °	0,75	0,78	0,96	0,62	0,70	0,94	0,49	0,62	0,92
40 °	0,52	0,66	0,91	0,46	0,61	0,90	0,40	0,56	0,89

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti solari termici - Ombreggiatura

fattore di ombreggiatura F_{ov} per oggetti orizzontali

Angolo	35 ° N latitudine			45 ° N latitudine			55 ° N latitudine		
	S	E/O	N	S	E/O	N	S	E/O	N
0 °	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30 °	0,87	0,87	0,91	0,80	0,89	0,91	0,93	0,91	0,91
45 °	0,68	0,73	0,80	0,74	0,76	0,80	0,80	0,79	0,80
60 °	0,40	0,55	0,67	0,50	0,58	0,66	0,60	0,61	0,65

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti solari termici - Ombreggiatura

fattore di ombreggiatura F_{fin} per oggetti verticali

Angolo	35 ° N latitudine			45 ° N latitudine			55 ° N latitudine		
	S	E/O	N	S	E/O	N	S	E/O	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30 °	0,94	0,93	1,00	0,94	0,92	1,00	0,94	0,91	0,99
45 °	0,82	0,85	1,00	0,84	0,84	1,00	0,86	0,83	0,99
60 °	0,70	0,75	1,00	0,72	0,75	1,00	0,74	0,75	0,99

UNI EN ISO 13790:2008

Calcolo degli apporti termici

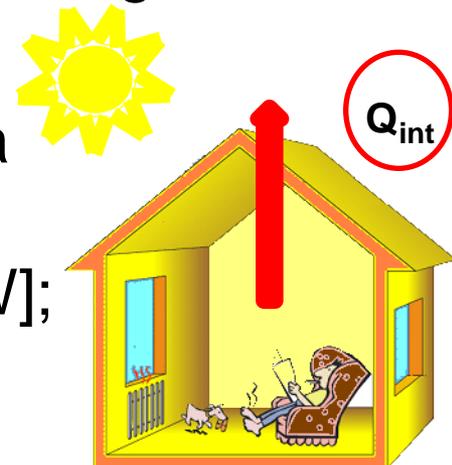
$$Q_{int} = \{ \sum \Phi_{int,mn,k} \} \cdot t + \{ \sum (1 - b_{tr,l}) \Phi_{int,mn,ul} \} t$$

$$Q_{est} = \{ \sum \Phi_{sol,mn,k} \} \cdot t + \{ \sum (1 - b_{tr,l}) \Phi_{sol,mn,ul} \} t$$

$b_{tr,l}$ = fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna I;

$\Phi_{int,mn,k}$ = flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo [W]

$\Phi_{int,mn,ul}$ = flusso termico prodotto dalla l-esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente u, mediato sul tempo [W];



UNI EN ISO 13790:2008

Apporti interni

* Valori apporti medi globali

Utilizzazione	Apporti globali	Unità di misura
Appartamenti di superficie A_r fino a 170 m ²	6,22 - 0,021· A_r	W/m ²
Appartamenti di superficie A_r maggiore di 170 m ²	450	W
Edifici adibiti ad uffici	6	W/m ²
Edifici adibiti ad attività commerciali	8	W/m ²
A_r è la superficie netta di pavimento, in m ² .		

* UNI/TS 11300 – parte 1

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti interni

Valori apporti termici occupanti ed apparecchiature

Giorni	Ore	Soggiorno e cucina $(\Phi_{Int,Occ} + \Phi_{Int,A}) / A_r$ W/m^2	Altre aree climatizzate (es. stanza da letto) $(\Phi_{Int,Occ} + \Phi_{Int,A}) / A_r$ W/m^2
Lunedì – Venerdì	07.00 – 17.00	8,0	1,0
	17.00 – 23.00	20,0	1,0
	23.00 – 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	2,67
Sabato – Domenica	07.00 – 17.00	8,0	2,0
	17.00 – 23.00	20,0	4,0
	23.00 – 07.00	2,0	6,0
	Media	9,0	3,83
Media		9,0	3,0

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti interni

Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (uffici)

Giorni	Ore	Ambienti ufficio (60 % della superficie utile di pavimento)	Altre stanze, atri, corridoi (40 % della superficie utile di pavimento)
		$(\dot{Q}_{Int,Occ} + \dot{Q}_{Int,APP}) / A_r$ W/m ²	$(\dot{Q}_{Int,Occ} + \dot{Q}_{Int,APP}) / A_r$ W/m ²
Lunedì – Venerdì	07.00 – 17.00	20,0	8,0
	17.00 – 23.00	2,0	1,0
	23.00 – 07.00	2,0	1,0
	Media	9,50	3,92
Sabato – Domenica	07.00 – 17.00	2,0	1,0
	17.00 – 23.00	2,0	1,0
	23.00 – 07.00	2,0	1,0
	Media	2,0	1,0
Media		7,4	3,1

$(\dot{Q}_{Int,Occ} + \dot{Q}_{Int,A})$ è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;
 A_r è la superficie utile di pavimento, in m².

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti interni

Apporti termici dagli occupanti (valori globali in funzione della densità di occupazione (edifici non residenziali))

Classe di densità di occupazione	m ² di superficie utile di pavimento per persona	Fattore di simultaneità	$\dot{Q}_{Int,Oc} / A_r$ W/m ²
I	1,0	0,15	15
II	2,5	0,25	10
III	5,5	0,27	5
IV	14	0,42	3
V	20	0,40	2

$\dot{Q}_{Int,Oc}$ è il flusso termico dalle persone, in W;
 A_r è la superficie utile di pavimento, in m².

UNI EN ISO 13790:2008

Apporti interni

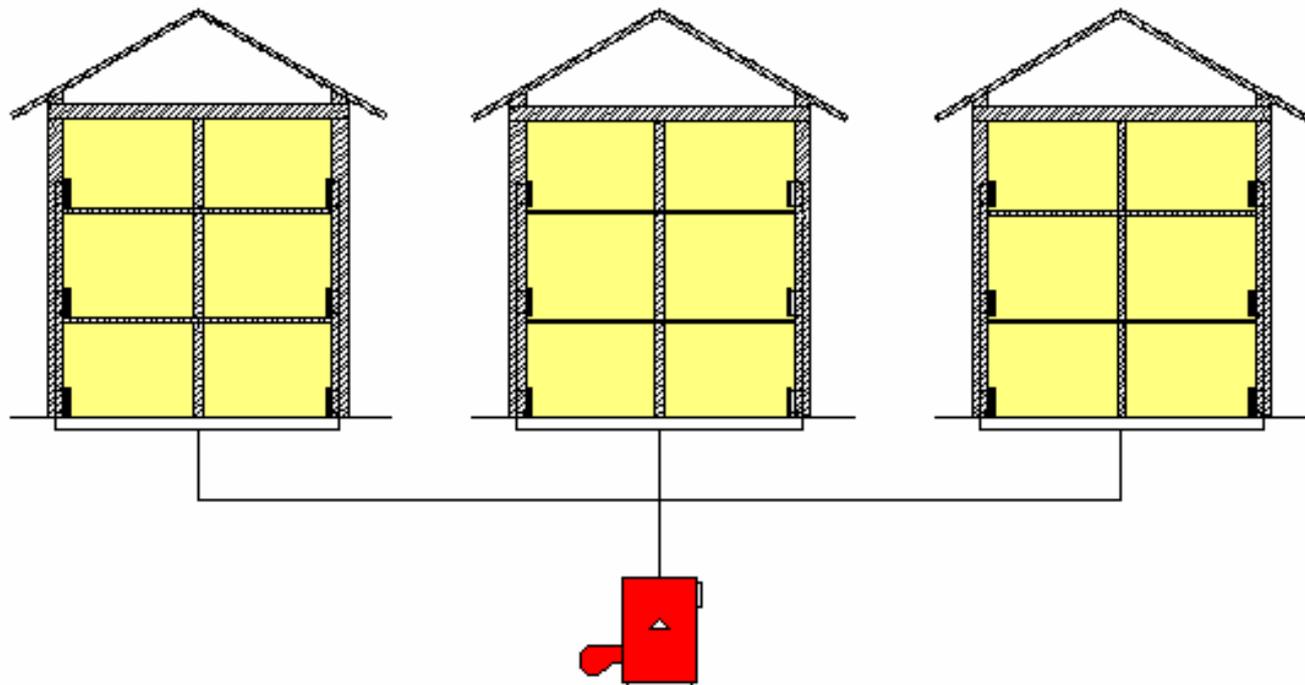
Apporti termici dalle apparecchiature (edifici non residenziali)

Categoria di edificio	Apporto termico delle apparecchiature durante il periodo di funzionamento $\Phi_{\text{int,A}} / A_r$ W/m ²	Simultaneità f_{app}	Apporto termico medio dalle apparecchiature $\Phi_{\text{int,APP}} / A_r$ W/m ²
Uffici	15	0,20	3
Attività scolastiche	5	0,15	1
Cura della salute, attività clinica	8	0,50	4
Cura della salute, attività non clinica	15	0,20	3
Servizi di approvvigionamento	10	0,25	3
Esercizi commerciali	10	0,25	3
Luoghi di riunione	5	0,20	1
Alberghi e pensioni	4	0,50	2
Penitenziari	4	0,50	2
Attività sportive	4	0,25	1

$\Phi_{\text{int,A}}$ è il flusso termico dalle apparecchiature, in W;
 A_r è la superficie utile di pavimento, in m².

UNI EN ISO 13790:2008

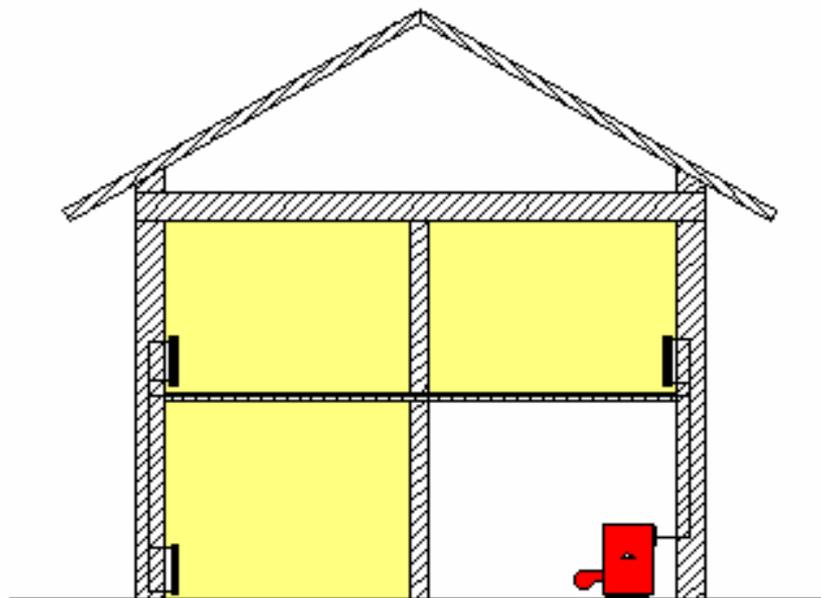
Sistema edificio- impianto



Sistema edificio-impianto costituito da più edifici serviti da un'unica centrale termica

UNI EN ISO 13790:2008

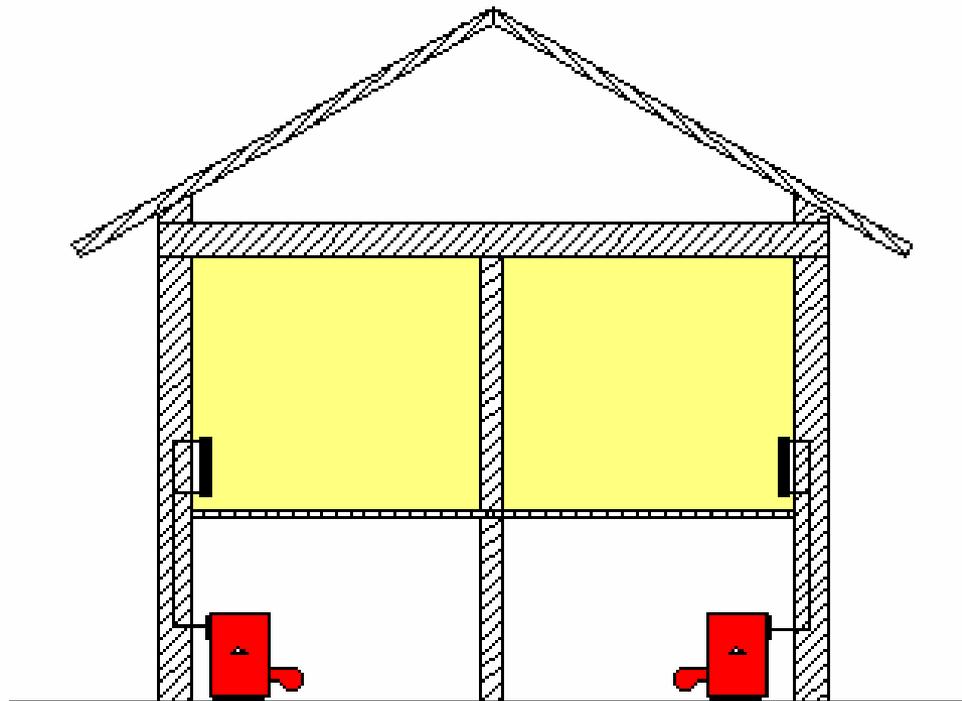
Sistema edificio- impianto



**Sistema edificio-impianto
costituito da un unico edificio**

UNI EN ISO 13790:2008

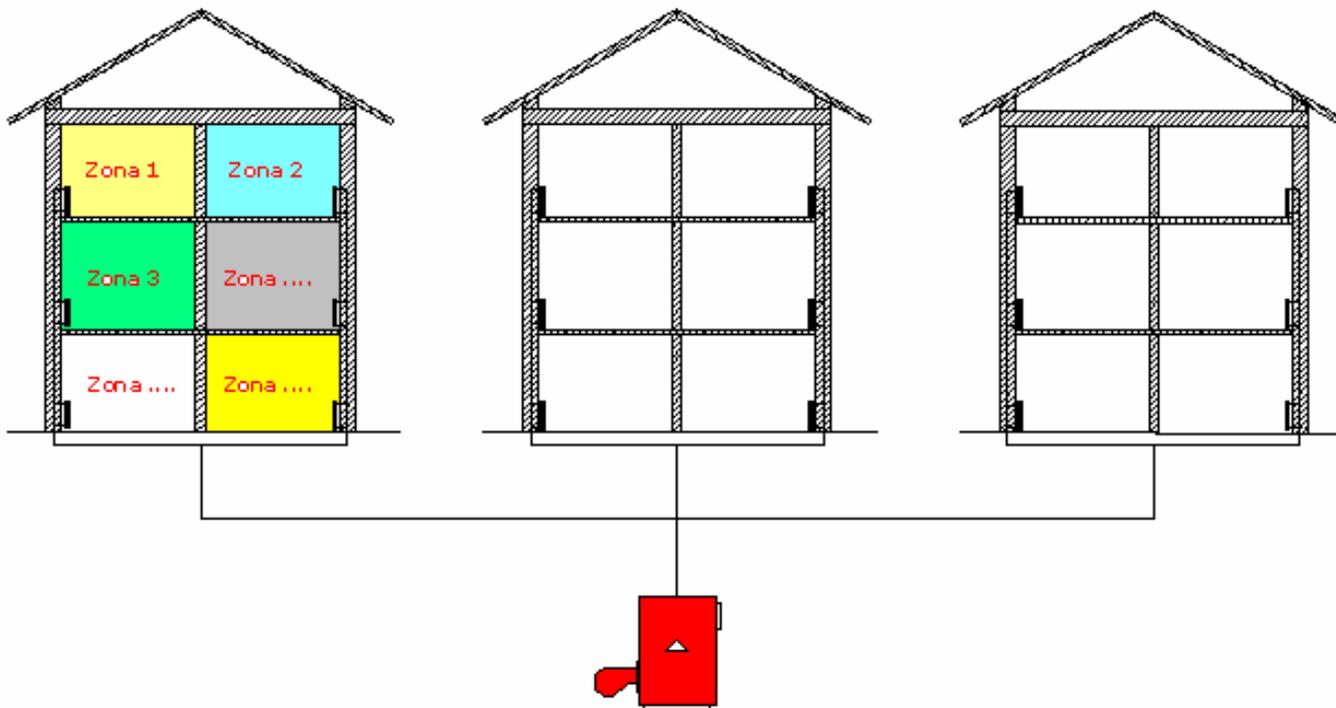
Sistema edificio- impianto



Sistema edificio-impianto costituito da una porzione di edificio servita da un impianto termico autonomo.

UNI EN ISO 13790:2008

Sistema edificio- impianto

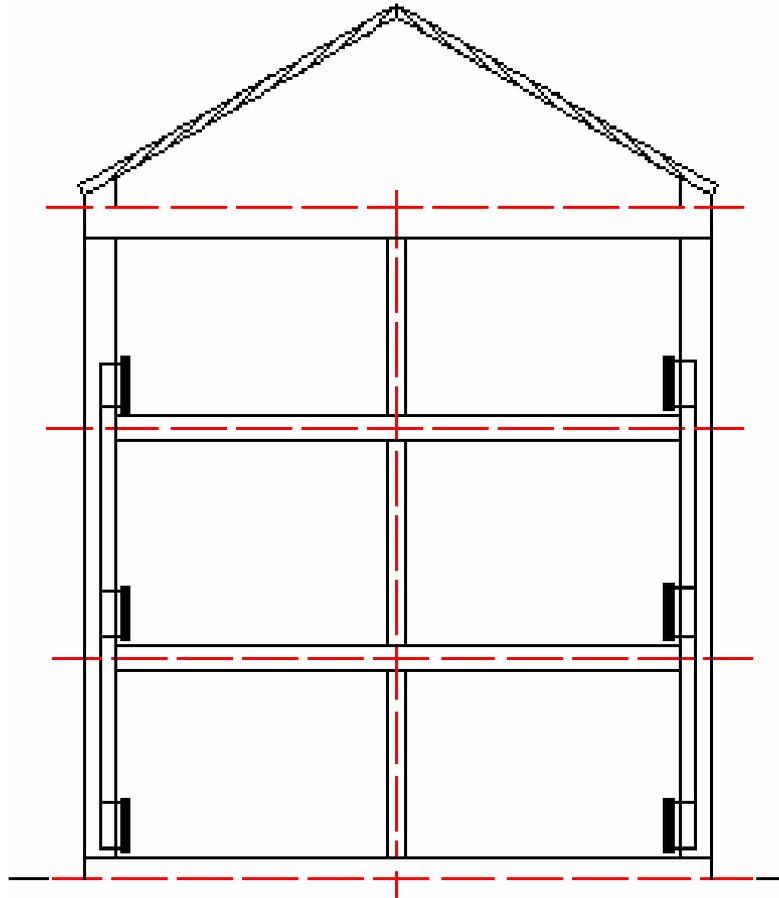


Zone termiche aventi proprie caratteristiche di dispersione ed esposizione

UNI EN ISO 13790:2008

Sistema edificio- impianto

**Regole di
suddivisione
dei volumi**



UNI EN ISO 13790:2008

Ponti termici

Descrizione della struttura	Maggiorazione ⁵
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto senza aggetti/balconi)	0
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto con aggetti/balconi)	5
Parete omogenea in mattoni pieni o in pietra (senza isolante)	5
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)	10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)	10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)	20
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno	30

Maggiorazioni percentuali relative alla presenza dei ponti termici [%]

UNI EN ISO 13790:2008

* Capacità termica

Caratteristiche costruttive dei componenti edilizi				Numero di piani		
Intonaci	Isolamento	Pareti esterne	Pavimenti	1	2	≥3
				Capacità termica areica [kJ/(m ² ·K)]		
gesso	interno	qualsiasi	tessile	75	75	85
	interno	qualsiasi	legno	85	95	105
	interno	qualsiasi	piastrelle	95	105	115
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	95	95	95
	assente/esterno	medie/pesanti	tessile	105	95	95
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	115	115	115
	assente/esterno	medie/pesanti	legno	115	125	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	115	125	135
malta	assente/esterno	medie/pesanti	piastrelle	125	135	135
	interno	qualsiasi	tessile	105	105	105
	interno	qualsiasi	legno	115	125	135
	interno	qualsiasi	piastrelle	125	135	135
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	125	125	115
	assente/esterno	medie	tessile	135	135	125
	assente/esterno	pesanti	tessile	145	135	125
	assente/esterno	pesanti	tessile	145	135	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	145	145	145
	assente/esterno	medie	legno	155	155	155
	assente/esterno	pesanti	legno	165	165	165
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	145	155	155
assente/esterno	medie	piastrelle	155	165	165	
assente/esterno	pesanti	piastrelle	165	165	165	

* UNI/TS 11300 – parte 1

UNI EN ISO 13790:2008

Trasmittanza termica semplificata

Spessore [m]	Muratura di pietrame intonacata	Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce	Pannello prefabbricato in cls	Parete a cassa vuota ⁹ con mattoni forati	Struttura isolata ¹⁰
0,15	-	2,31	4,03	-	0,59
0,20	-	1,84	3,84	-	0,57
0,25	3,55	1,54	3,36	1,20	0,54
0,30	3,19	1,33	3,15	1,15	0,52
0,35	2,92	1,18	2,98	1,11	0,50
0,40	2,70	1,06	2,84	1,11	0,48
0,45	2,52	0,97	2,73	1,11	0,46
0,50	2,37	0,89	2,63	1,11	0,44
0,55	2,24	0,82	2,54	1,11	0,42
0,60	2,13	0,77	2,46	1,11	0,40

UNI EN ISO 13790:2008

Trasmittanza termica semplificata

**Pareti
interne
verticali
[W/m²K]**

Spessore [m]	Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce	Muratura di mattoni forati intonacati sulle due facce	Parete in cls intonacata	Parete a cassa vuota con mattoni forati	Struttura isolata
0,15	1,91	1,38	2,96	1,16	0,56
0,20	1,67	1,11	2,79	1,12	0,54
0,25	1,43	0,93	2,62	1,08	0,52
0,30	1,19	0,80	2,46	1,04	0,50

**Coperture
piane e a
falde
[W/m²K]**

Spessore [m]	Soletta piana non coibentata in laterocemento	Soletta piana coibentata	Tetto a falda in laterizio non coibentato	Tetto a falda in laterizio coibentato	Tetto in legno poco isolato	Tetto in legno mediamente isolato
0,15	2,00	0,77	2,77	0,87	1,31	0,72
0,20	1,76	0,72	2,39	0,81		
0,25	1,53	0,67	2,02	0,75		
0,30	1,30	0,61	1,65	0,68		
0,35	1,06	0,56	1,28	0,62		

UNI EN ISO 13790:2008

Trasmittanza termica semplificata

Solai sotto ambienti non climatiz. [W/m²K]

Spessore [m]	Soletta in laterocemento	Soletta in laterocemento confinante con sottotetto	Solaio prefabbricato in cls tipo Predalle	Soletta generica coibentata
0,20	1,59	1,68	2,16	0,68
0,25	1,39	1,47	2,01	0,63
0,30	1,19	1,25	1,87	0,58
0,35	1,00	1,03	1,73	0,53

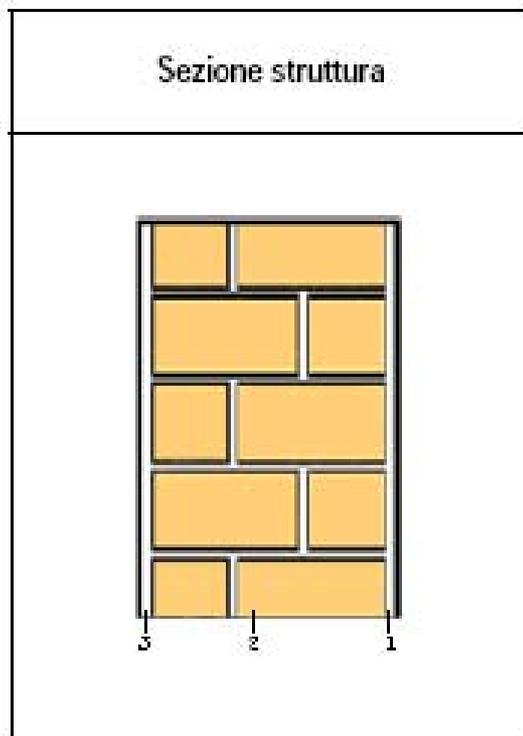
Solai a terra, su spazi aperti o su ambienti non climatiz. [W/m²K]

Spessore [m]	Soletta in laterocemento su cantina	Soletta in laterocemento su vespaio o pilotis	Basamento in laterocemento su terreno	Basamento in cls su terreno	Soletta generica coibentata su cantina-vespaio-pilotis
0,20	1,54	1,76	1,37	1,35	0,71
0,25	1,35	1,53	1,24	1,31	0,66
0,30	1,16	1,30	1,11	1,27	0,61
0,35	0,97	1,06	0,98	1,23	0,55

UNI EN ISO 13790:2008

Abaco delle murature utilizzate in Italia

Muratura in mattoni pieni



Rif.	Materiali	Massa vol. [kg/m ³]	Conduktiv. [W/(m·K)]	χ [kJ/(m ² ·K)]
1	Intonaco interno (calce e gesso)	1400	0,70	149
2	Muro in mattoni pieni	1800	0,72	
3	Intonaco esterno	1800	0,90	
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

UNI EN ISO 13790:2008

Trasmittanza termica componenti trasparenti

Vetrata				Tipo di gas nell'intercapedine (concentrazione del gas $\geq 90\%$)				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni mm	Aria	Argon	Krypton	SF ₆	Xenon
Vetrata doppia	Vetro normale	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
	Una lastra con trattamento superficiale	$\leq 0,20$	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
			4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
			4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
			4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	Una lastra con trattamento superficiale	$\leq 0,15$	4-6-4	2,6	2,3	1,8	2,2	1,5
			4-8-4	2,3	2,0	1,6	2,3	1,4
			4-12-4	1,9	1,6	1,5	2,3	1,5
			4-16-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
			4-20-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
	Una lastra con trattamento superficiale	$\leq 0,10$	4-6-4	2,6	2,2	1,7	2,1	1,4
			4-8-4	2,2	1,9	1,4	2,2	1,3
			4-12-4	1,8	1,5	1,3	2,3	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3	2,3	1,4
			4-20-4	1,6	1,4	1,4	2,3	1,4
Una lastra con trattamento superficiale	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2	
		4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1	
		4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2	
		4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2	
		4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2	

UNI EN ISO 13790:2008

Trasmittanza termica componenti trasparenti

Vetrata				Tipo di gas nell'intercapedine (concentrazione del gas $\geq 90\%$)				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni mm	Aria	Argon	Krypton	SF ₆	Xenon
Vetrata tripla	Due lastre con trattamento superficiale	0,89	4-8-4-8-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,20$	4-8-4-8-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,15$	4-8-4-8-4	1,7	1,4	1,1	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,2	0,9	1,2	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,7	1,3	0,7
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,10$	4-8-4-8-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
	Due lastre con trattamento superficiale	$\leq 0,05$	4-8-4-8-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

Problematiche termoigrometriche dell'elemento di involucro edilizio opaco

Prof. Paola Ricciardi

PSICROMETRIA

ARIA + VAPOR D'ACQUA = ARIA UMIDA

aria secca

($O_2 \cong 23\%$ e $N_2 \cong 76\%$ in massa)

componente unico

vapor d'acqua

($\cong 1\%$ in massa)

**composizione costante
durante le trasformazioni**

**acqua in fase liquida
e in fase vapore**

Umidità assoluta o grado igrometrico

$$**x** = m_v / m_a \quad [kgv / kga]$$

GRANDEZZE IGROMETRICHE

**Pressione di saturazione
corrisponde alla
massima quantità
di vapore che può
essere contenuta
nella miscela
gassosa**

$$p_{\text{sat}} = 610,5 e^{\frac{17,269 \theta}{237,3 + \theta}}$$

per $\theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$p_{\text{sat}} = 610,5 e^{\frac{21,875 \theta}{265,5 + \theta}}$$

per $\theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

eccesso di vapore



liquido

GRANDEZZE IGROMETRICHE

eccesso di vapore



liquido

Umidità relativa

Massa del vapore d'acqua alla temperatura t

Massa del vapor saturo alla stessa temperatura

$$i = P_v / P_s$$

i nell'intervallo $(0 \div 1)$ ($0\% \div 100\%$)

P_v nell'intervallo $(0 \div P_s)$

DIAGRAMMA DI MOLLIER

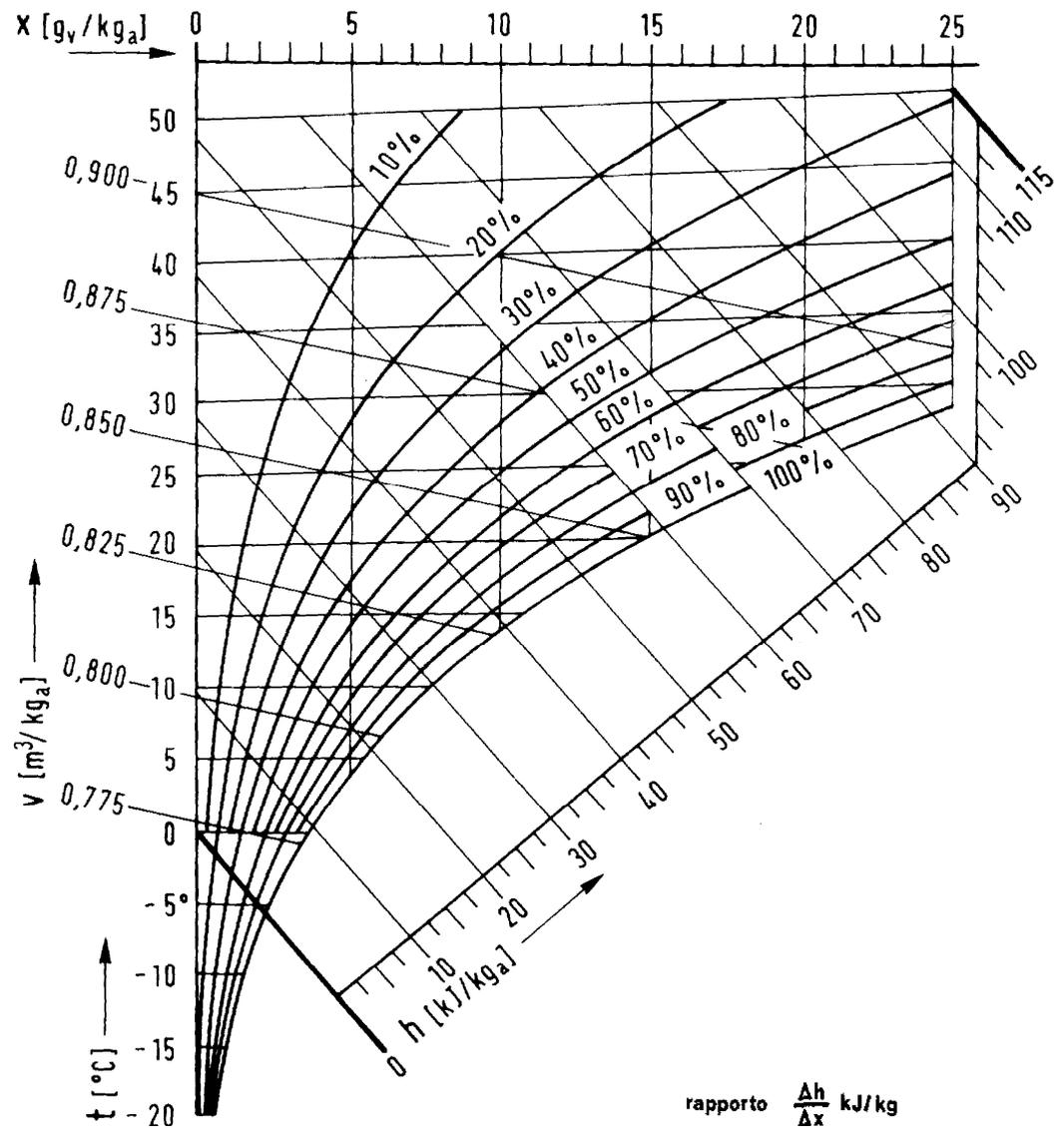


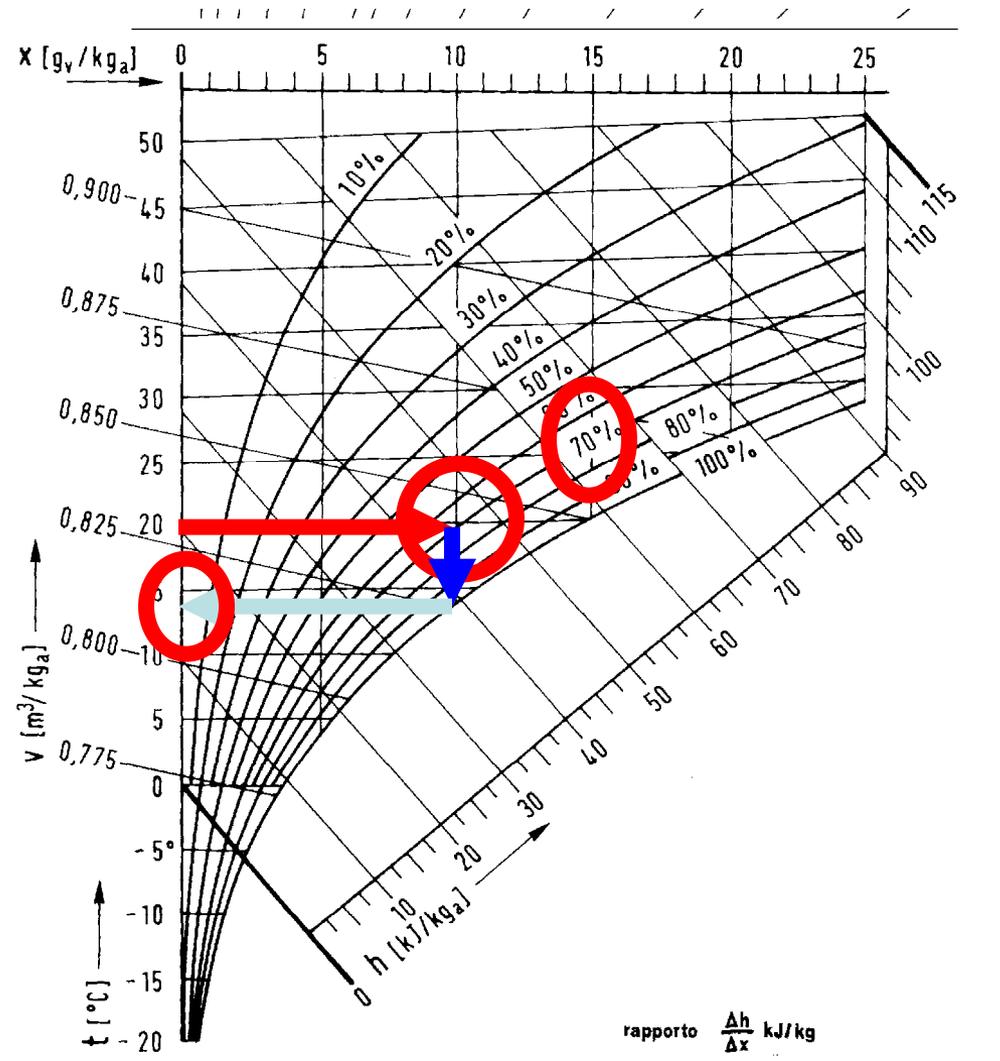
DIAGRAMMA DI MOLLIER

- $t_i = 20^\circ\text{C}$
- $i_i = 70\%$
- $t_e = -8^\circ\text{C}$

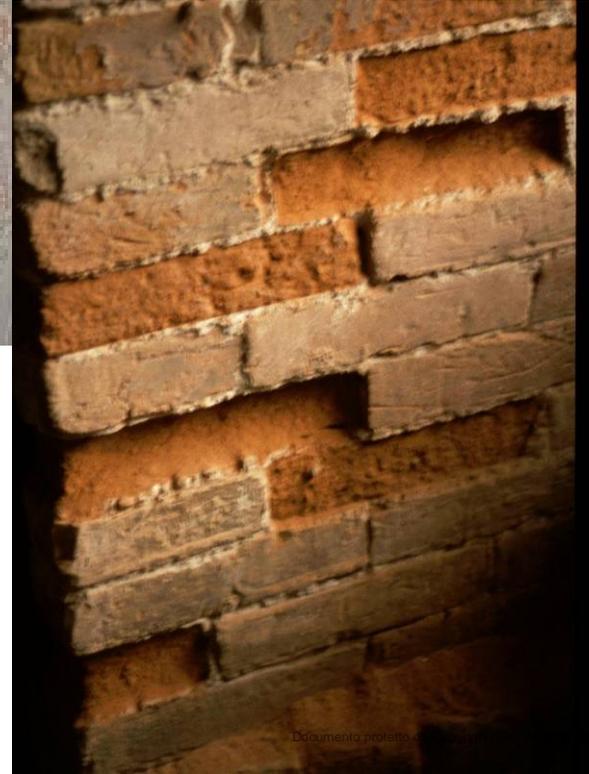
Temperatura di rugiada:

$t_r = 14^\circ\text{C}$

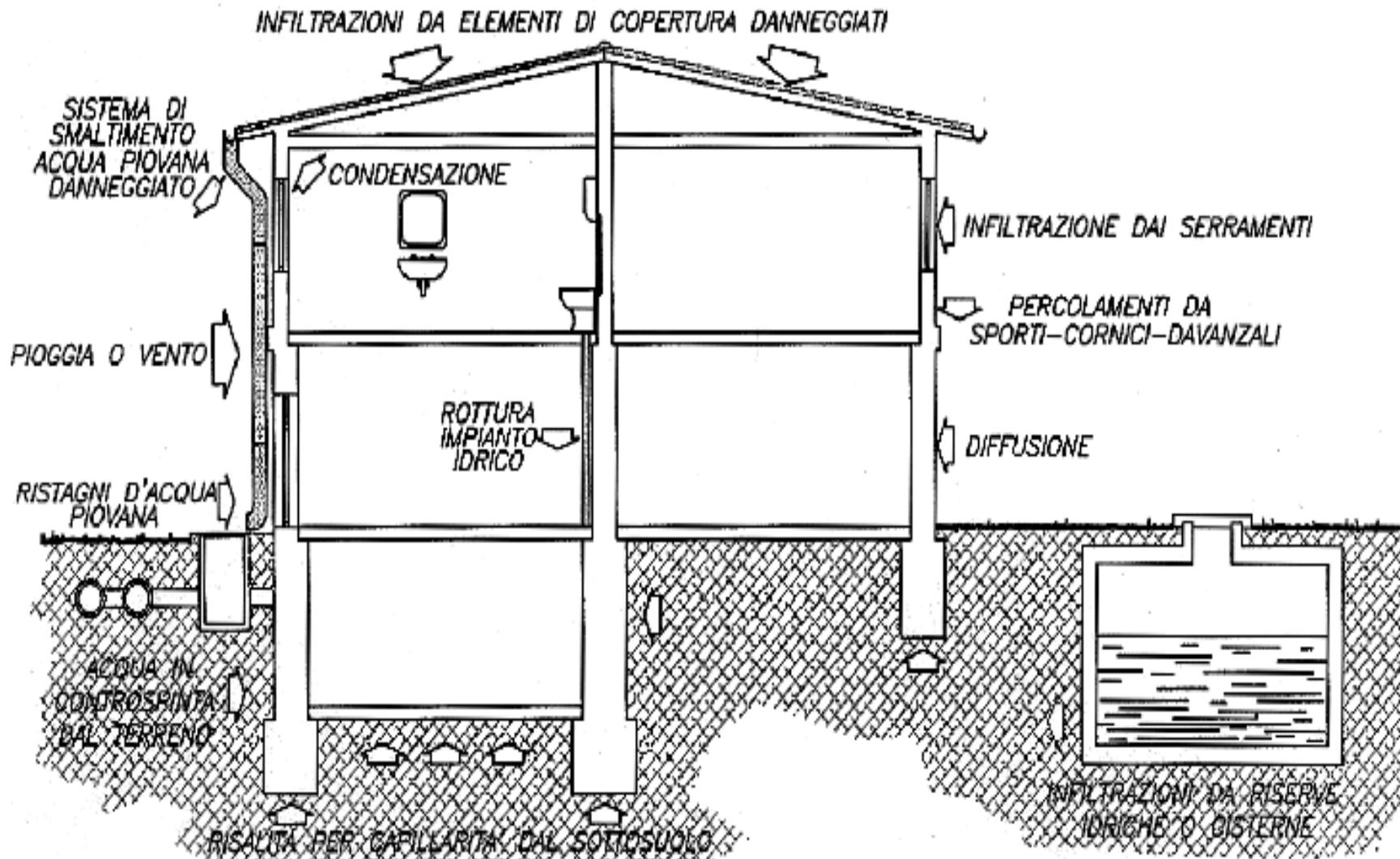
Temperatura limite superficiale







Alcuni problemi comuni

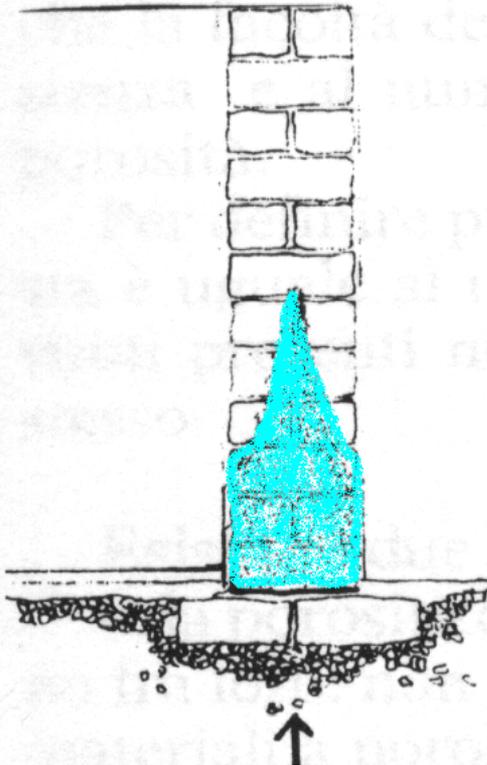




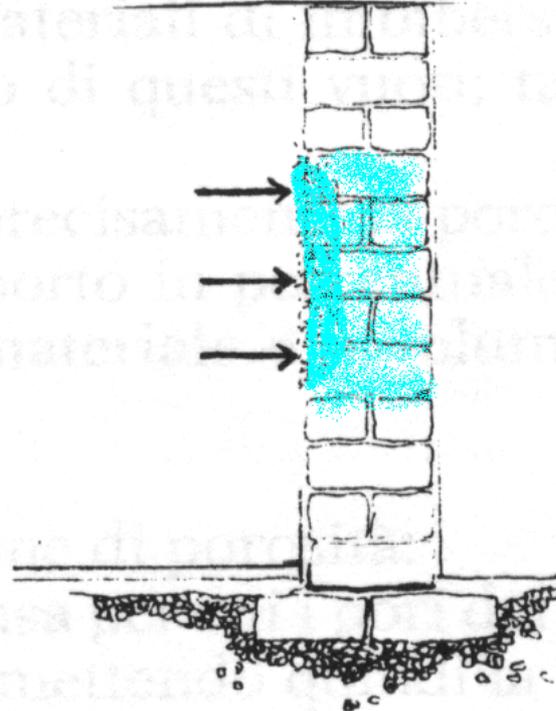


Distribuzione dell'acqua in funzione del tipo di problema

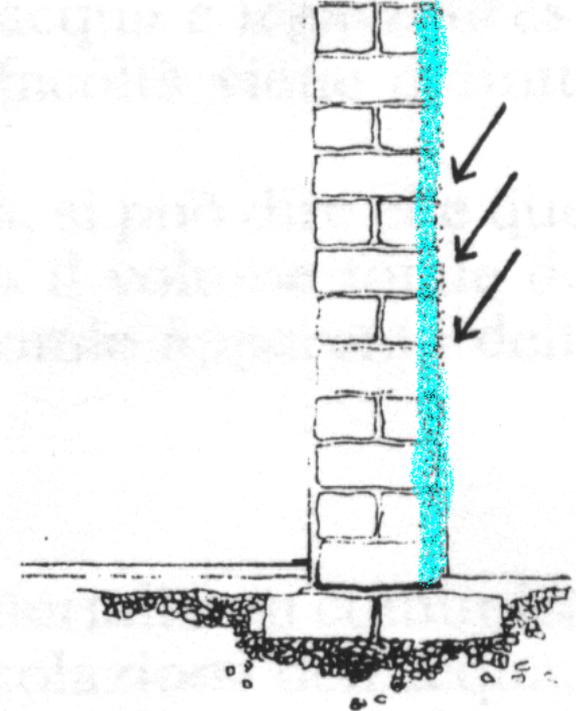
umidita di risalita



umidità da condensa



umidità da acqua meteorica



Problemi igrometrici degli edifici

Effetti:

**degrado di intonaci;
imputridimento delle
strutture lignee;
formazione di muffe
sulla superficie interna;
migrazione di sali,
formazione di efflorescenze;
presenza di acqua condensata sulla superficie ed
all'interno delle pareti;
riduzione del grado di isolamento termico
dell'involucro aumento della conduttività termica;
variazione dimensionale e danneggiamento di
manufatti (fessurazioni e deformazioni).**

Problemi igrometrici degli edifici

FENOMENI IGROMETRICI DI SUPERFICIE

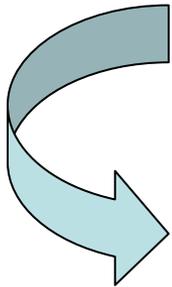
**raggiungimento di elevati valori di umidità relativa
o condensazione del vapore sul lato interno
dell'involucro edilizio (fenomeni di superficie);**

**CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE all'interno
delle strutture perimetrali**

Problemi igrometrici degli edifici

fenomeni con uno sviluppo in più lento nel tempo, rispetto a quelli termici

partecipazione delle strutture

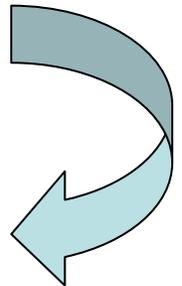


**trasmissione
del calore**

**costanti di tempo
dell'ordine di
ore-giorni**

**trasmissione
del vapore**

**tempi più lunghi, dell'ordine
di settimane, mesi con
effetti anche nel ciclo
stagionale e annuale**

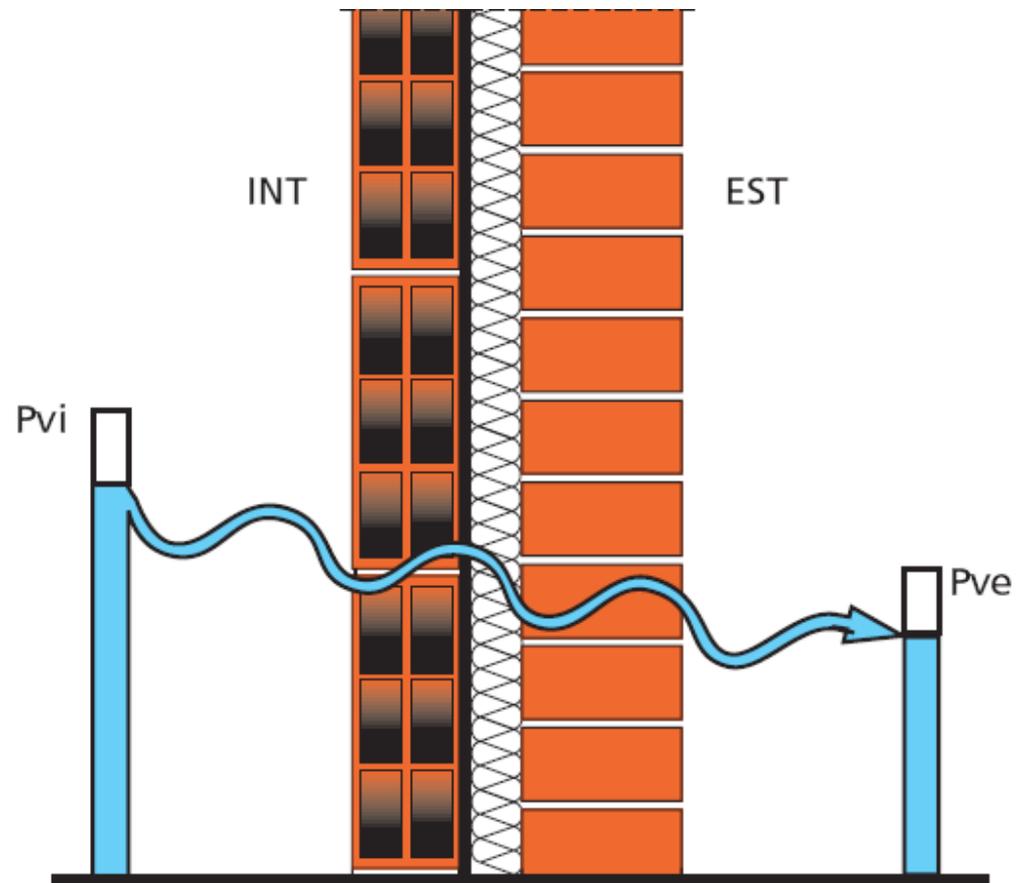


Problemi igrometrici degli edifici

Criteri di progettazione per prevenire fenomeni di degrado

il trasporto di vapore è determinato da
differenze di temperatura
differenze di pressione
del vapore

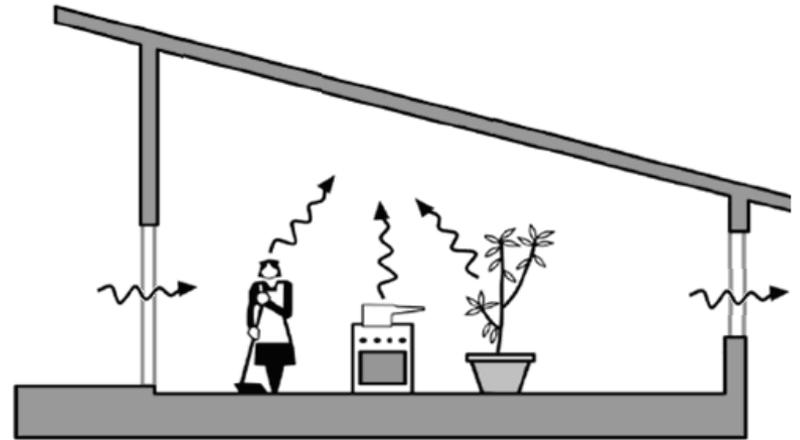
Non si prendono in considerazione:
risalita capillare
accumuli di condensa
all'interno di
componenti edilizi
tenuta all'acqua
meteorica, etc.



Bilancio igrometrico di un ambiente

$$\Delta P_v = [G / (n V)] R_v T$$

$(P_{vi} - P_{ve})$
direttamente proporzionale a
produzione di vapore per
unità di volume G/V
inversamente proporzionale
al rinnovo di aria n .



Bilancio igrometrico di un ambiente

$$\Delta P_v = [G / (n V)] R_v T$$

**inverno: se n molto ridotto
(serramenti a tenuta)**

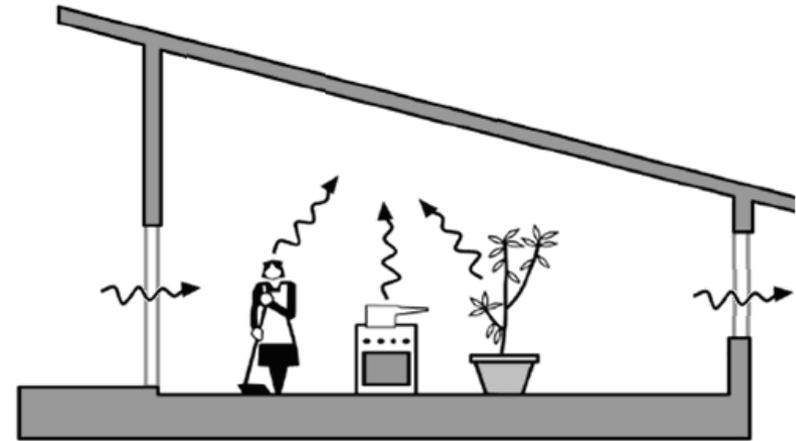
per ambienti piccoli + molte persone

P_{vi} elevate

**estate: frequente apertura di finestre,
elevato rinnovo d'aria**

maggiore P_{vi}

$$P_{vi} \cong P_{ve}$$



Pressione del vapore

$$\Delta P_v = [G / (n V)] R_v T$$

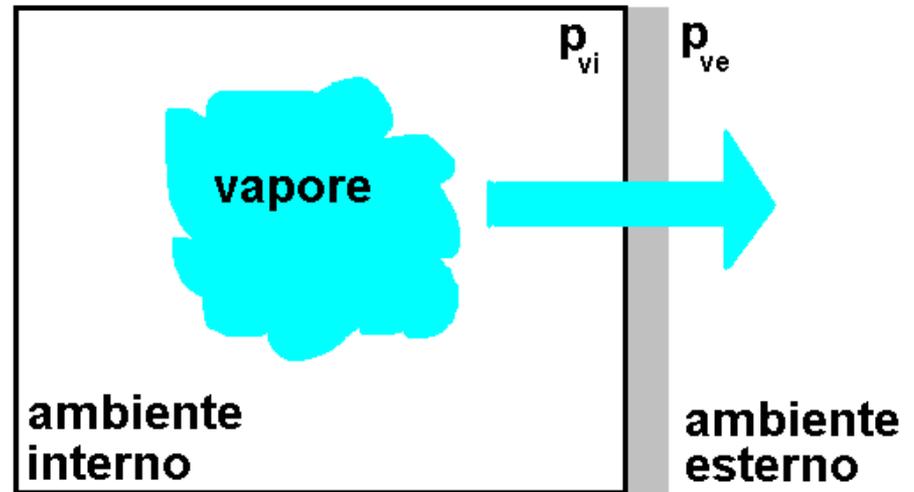
$$(P_{vi} - P_{ve})$$



**inversamente proporzionale a n,
rinnovo di aria**

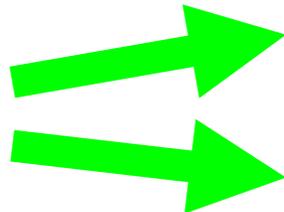


**direttamente
proporzionale a G/V,
produzione di vapore
per unità di volume**



$$(P_{vi} - P_{ve})$$

elevata



maggiore portata di vapore

**maggiore probabilità di
condensazione**

Fenomeni di superficie

$$U.R. = P_v/P_s$$

U.R. dipende dalla temperatura e quindi da:
riscaldamento intermittente,
attenuazione notturna,
cambiamenti climatici,
effetti connessi con l'inerzia termica

valore di
riferimento limite:
U.R. = 80 %
su superfici
interne delle pareti
(normativa)

Specie	UR _{min} necessaria per la crescita
Alternaria alternata	85 %
Aspergillus versicolor	75 %
Penicillium chrysogenum	79 %
Stachybotrys atra	94 %
Mucor plumbeus	93 %

Fenomeni di superficie

Fattore di temperatura

$$f_{Rsi} = \frac{t_{pi} - t_e}{t_i - t_e}$$

$$\Delta P'_v = R_v T (G / V) / n$$

$$\Delta P_v = 1.10 \Delta' P_v$$

$$\Delta P_v = P_{vi} - P_{ve}$$

$$P_s = 610.5 e^{\frac{17.269t}{237.3+t}} \quad P_s = P_{vi} / 0.8$$

$$P_{ve} = f \text{ (mese)}$$

$$t_{pi} = f^{-1} (P_s)$$

$$f_{Rsi}^{max}$$

Il più alto valore di f_{Rsi} , valutato nella stagione invernale (Ottobre-Aprile), è il fattore di temperatura minimo ammissibile

Fenomeni di superficie - Trasmittanza U

Valore di progetto per strutture perimetrali

flusso termico (parete perimetrale):

$$\varphi = U A (t_i - t_e)$$

in funzione di t_{pi}

$$\varphi = h_i A (t_i - t_{pi})$$

$$f_{Rsi} = \frac{t_{pi} - t_e}{t_i - t_e}$$

quindi:

$$U = h_i (1 - f_{Rsi})$$

$$f_{Rsi} > f_{Rsi}^{\max} \quad \longrightarrow \quad 1 - f_{Rsi} < 1 - f_{Rsi}^{\max}$$

$$U = h_i (1 - f_{Rsi}) < h_i (1 - f_{Rsi}^{\max})$$

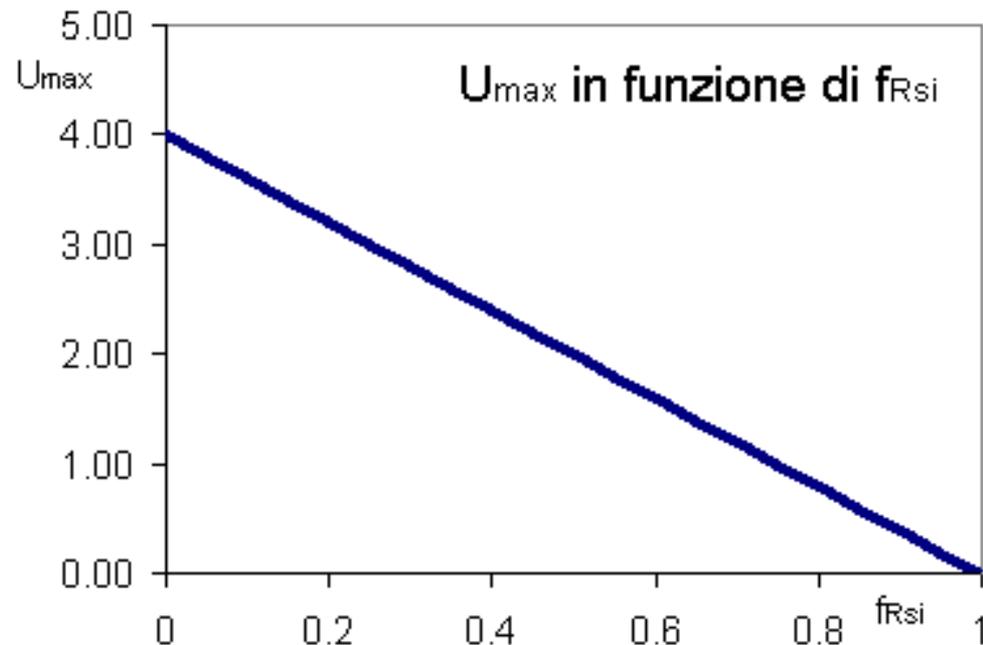
Fenomeni di superficie - Trasmissione U

Valore di progetto per strutture perimetrali

parete piana senza
schermi:

$$h_i = 4 \text{ W / (m}^2\text{K)}$$

$$U = h_i (1 - f_{Rsi}) < h_i (1 - f_{Rsi}^{\max})$$



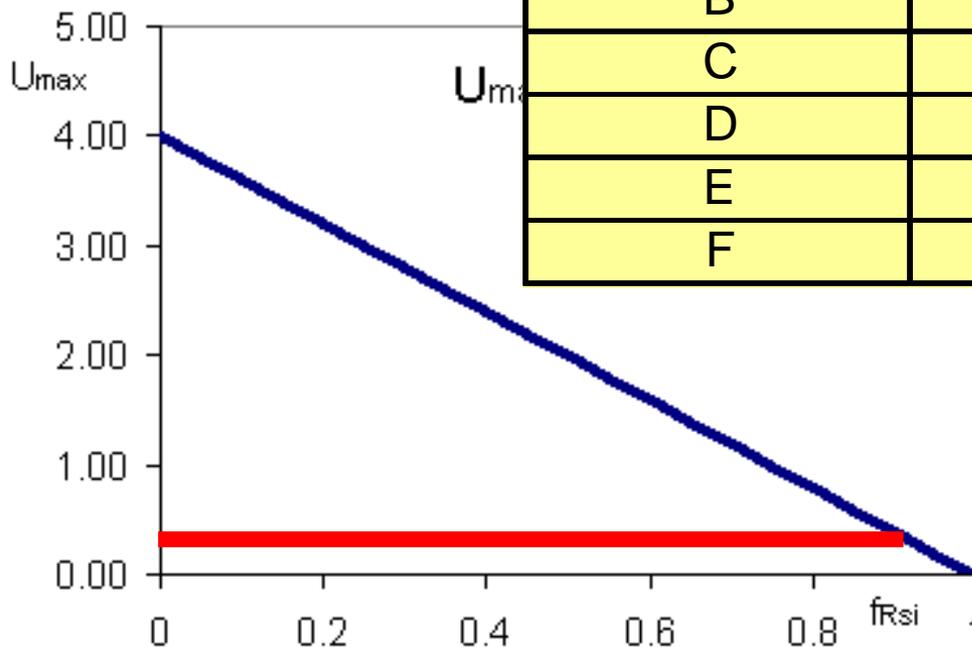
Fenomeni di superficie - Trasmittanza U

Valore di progetto per strutture perimetrali

$$U = h_i (1 - f_{Rsi}) < h_i (1 - f_{Rsi}^{max})$$

tabella 2.1 valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache verticali in W/m²K

zona climatica	gen2006	gen2008	gen2010
A	0.85	0.72	0.62
B	0.64	0.54	0.48
C	0.57	0.46	0.4
D	0.5	0.4	0.36
E	0.46	0.37	0.34
F	0.44	0.35	0.33

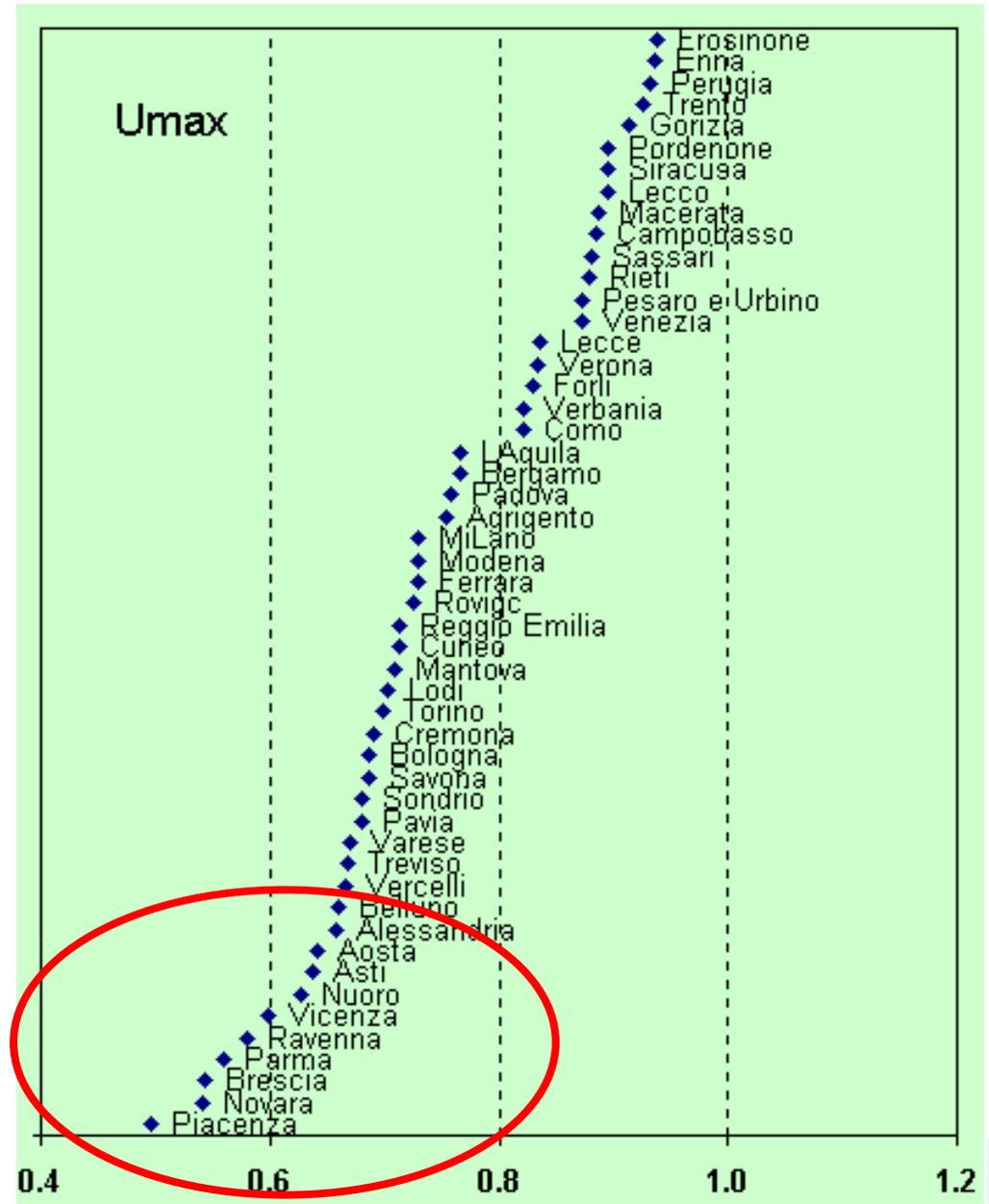


Fenomeni di superficie

Trasmittanza massima

in riferimento ai valori massimi ammissibili dell'umidità relativa sulle superfici delle pareti

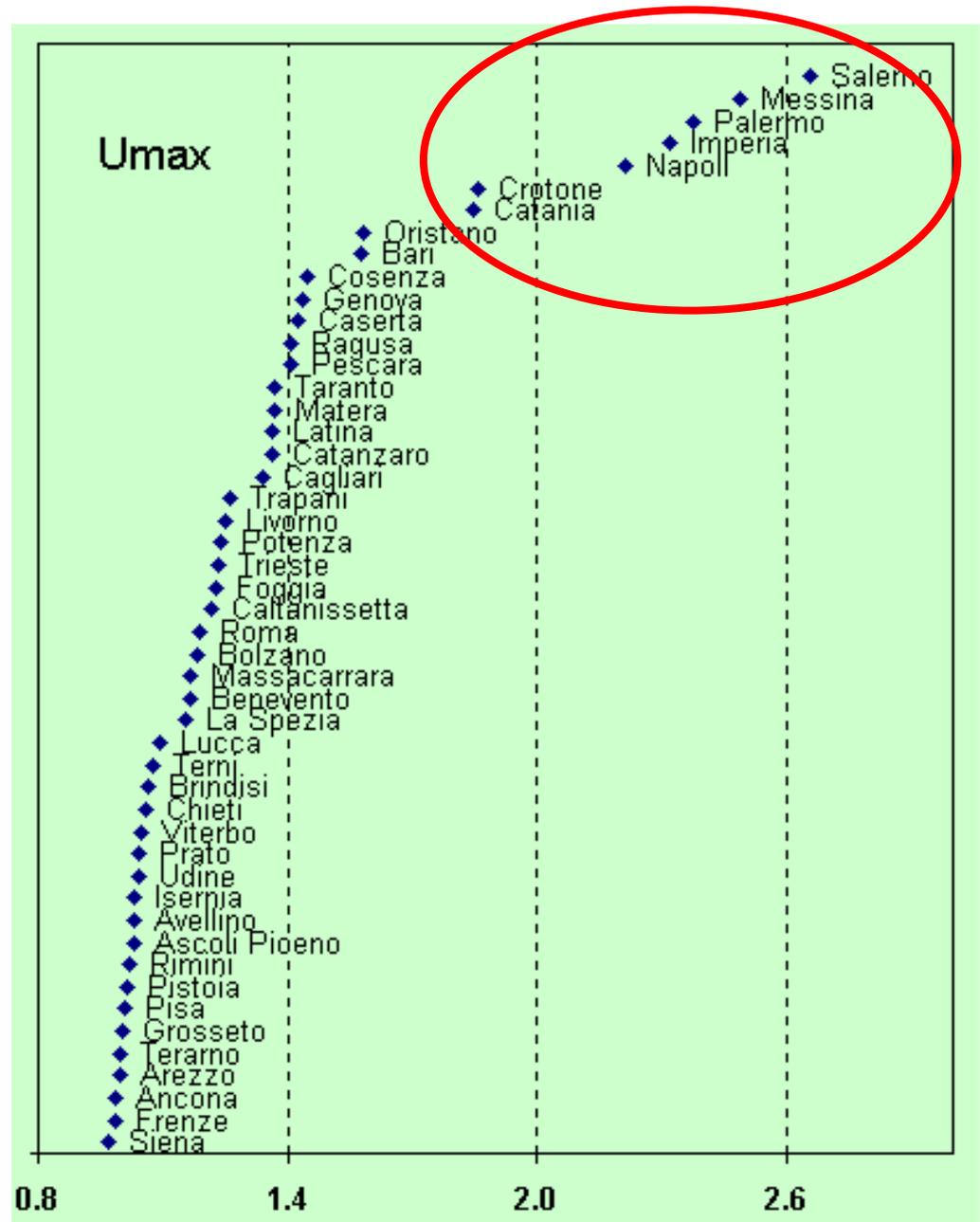
(classe di vapore media: uffici)



Fenomeni di superficie

Trasmittanza massima

in riferimento ai valori massimi ammissibili dell'umidità relativa sulle superfici delle pareti



UNI EN ISO 13788:2003

Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia

Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale

Metodo di calcolo

La norma definisce un metodo di riferimento per determinare la temperatura superficiale interna minima dei componenti edilizi tale da evitare crescita di muffe, in corrispondenza a valori prefissati di temperatura e umidità relativa interna; il metodo può essere anche utilizzato per la previsione del rischio di altri problemi di condensazione superficiale.

UNI EN ISO 13788:2003

Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia

Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale

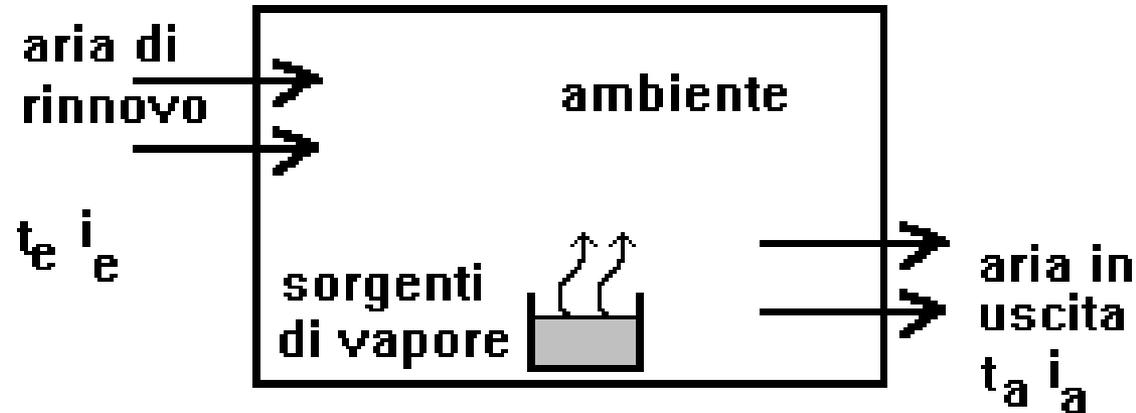
Metodo di calcolo

Inoltre viene indicato il metodo per la valutazione del rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo e le relative condizioni al contorno da utilizzare nei calcoli. Il metodo usato assume che l'umidità da costruzione si sia asciugata e non tiene conto di altri fenomeni fisici (risalita capillare, variazione con l'umidità dei parametri, termofisica, ecc.).

BILANCIO IGROMETRICO DI UN AMBIENTE

**Ambiente
riscaldato:**

- volume V
- temperatura $t_a > t_e$
- rinnovo d'aria per infiltrazioni n
- produzione di vapore G
(persone, cottura, asciugatura panni, etc.)

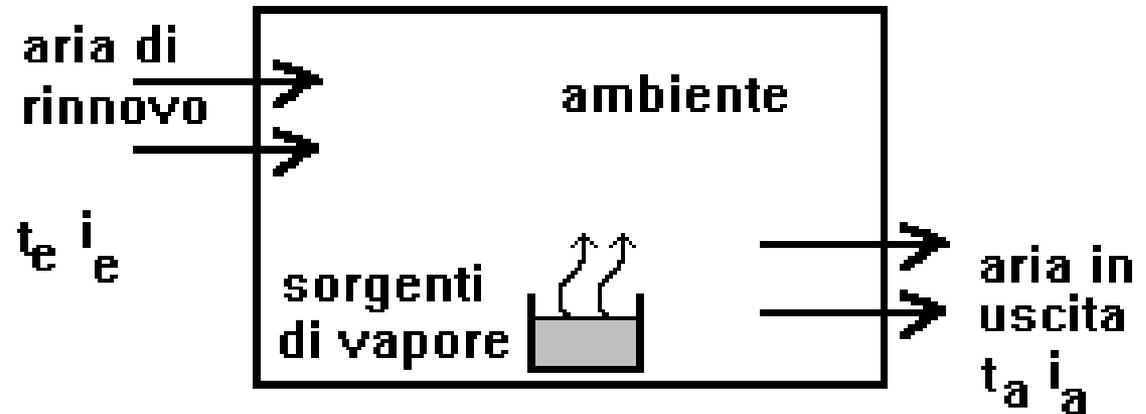


Ipotesi:

Regime stazionario

No condensazione superficiale

BILANCIO IGROMETRICO DI UN AMBIENTE



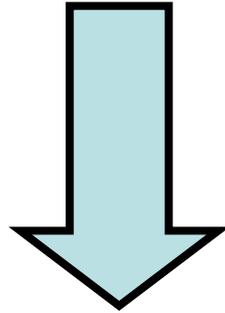
bilancio di massa:

portata di vapore uscente =
= portata di vapore entrante +
+ produzione interna di vapore

$$n V \rho_{vi} = n V \rho_{ve} + G$$

BILANCIO IGROMETRICO DI UN AMBIENTE

$$n V \rho_{vi} = n V \rho_{ve} + G$$



$$P_{vi} = P_{ve} + R_v (t_i + 273) G / n V$$

$$\Delta P_v = \Delta \rho_v R_v T = [G / (n V)] R_v T$$

Produzione di vapore in un ambiente

Numero abitanti	Produzione media oraria di vapore G [kg/h]
1	0.25
2	0.33
3	0.42
4	0.50
5	0.57
6	0.63

	4/5 persone a riposo (7/8 ore)	1,3 - 1,6 litri
	2 persone attive (16 ore)	1,5 - 1,7 litri
	preparazione alimenti	2,3 - 2,8 litri
	lavaggio piatti, pentole, ecc.	0,8 - 1,0 litri
	lavaggio abiti	4,0 - 4,5 litri
	asciugatura abiti	4,5 - 5,0 litri
	igiene personale	0,5 - 0,6 litri
totale (litri / giorno)		14,4 - 17,2

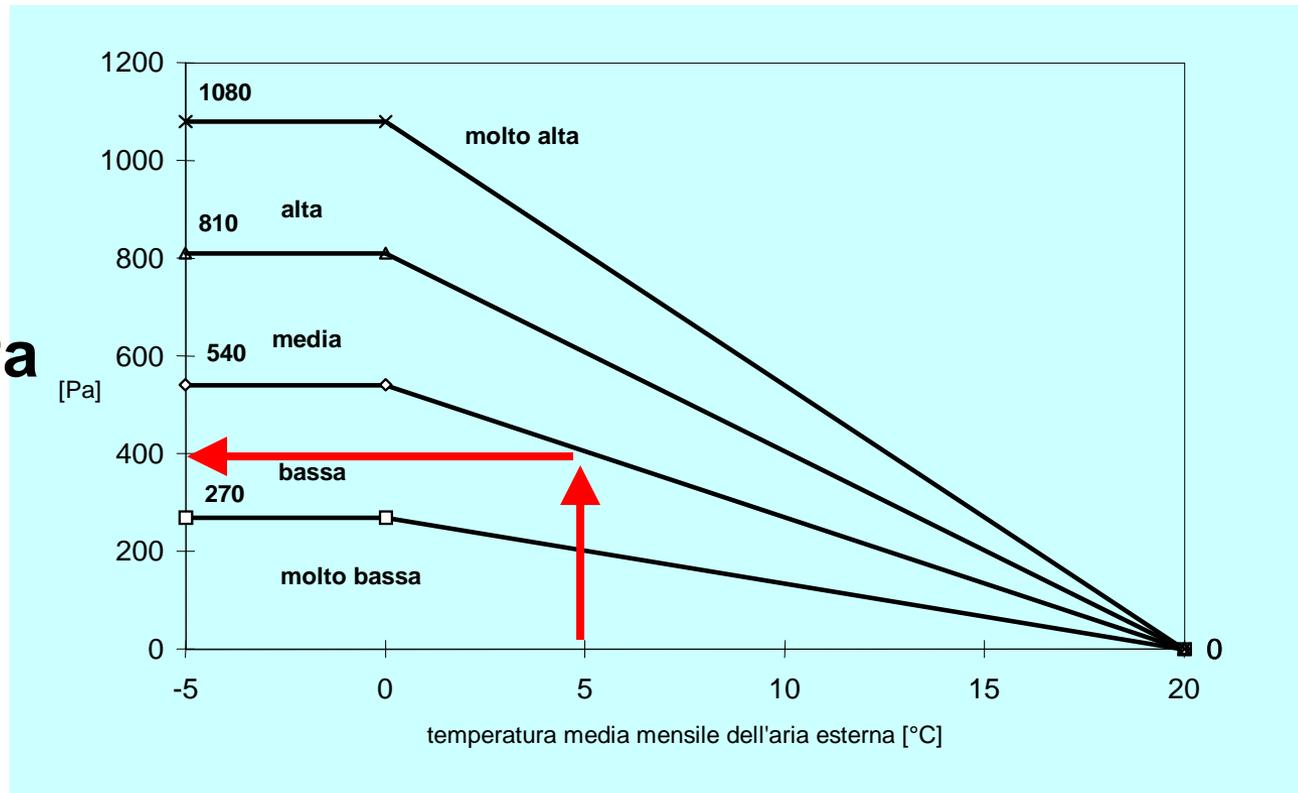
$$\Delta P_v = [G / (n V)] R_v T$$

Produzione di vapore in un ambiente

$$\Delta P_v = [G / (n V)] R_v T$$

UNI EN ISO 13788

$$\Delta P_v = 400 \text{ Pa}$$



$(P_{vi} - P_{ve})$ in funzione della temperatura esterna e della produzione di vapore (classi)

Classi di concentrazione del vapore in un ambiente

Classe	Uso dell'edificio
Molto bassa	Magazzini
Bassa	Uffici
Media	Alloggi con basso indice di affollamento
Alta	Alloggi con alto indice di affollamento
Molto alta	Edifici speciali (es. lavanderie, distillerie, piscine)

Fenomeni di condensazione interstiziale

nei mesi invernali (valori medi mensili)

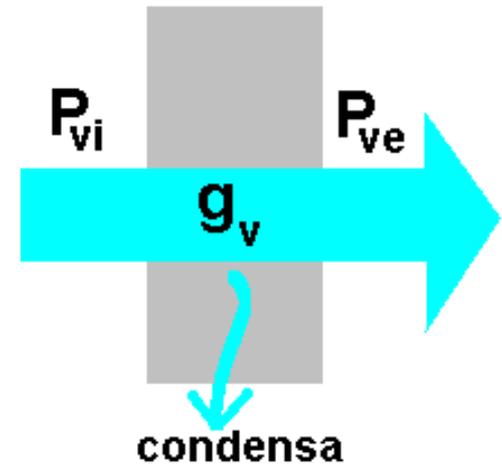
$$P_{vi} > P_{ve} \text{ e } t_i > t_e$$

LEGGE DI FICK:

in assenza di condensazione

$$g'_v = \text{costante}$$

$$g'_v = (P_{vi} - P_{ve}) / z'_{vt} \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$



Fenomeni di condensazione interstiziale

resistenza alla trasmissione del vapore

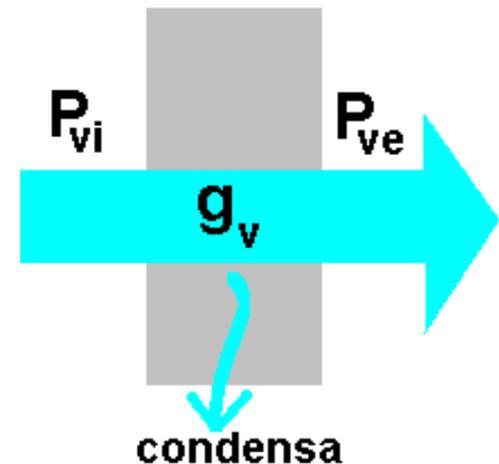
$$z'_{vt} = (1 / \beta_i + \Sigma d / \delta + 1 / \beta_e) \quad [\text{Pa} / \text{kg m}^2\text{s}]$$

$1 / \beta_i$ e $1 / \beta_e$ = resistenze di trasporto di massa convettivo (trascurabili)

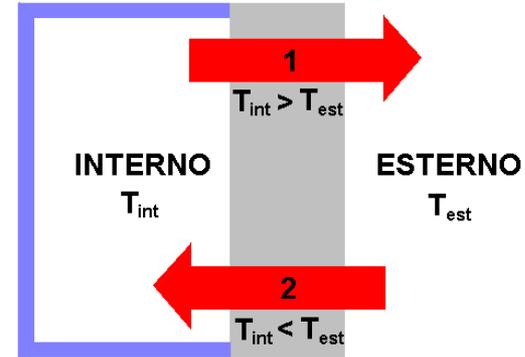
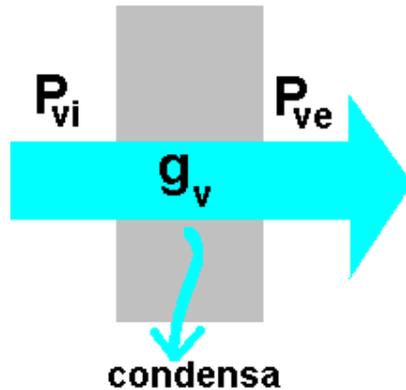
$z_p = d / \delta$ = resistenza strato di materiale

δ = permeabilità al vapore [kg/m s Pa]

$$z'_{vt} = \Sigma_i d_i / \delta_i$$



Fenomeni di condensazione interstiziale



Trasmissione del vapore	Trasmissione del calore
$P_{vi} > P_{ve}$	$t_i > t_e$
$g'_v = (P_{vi} - P_{ve}) / z'_{vt}$ <p>[kg/m²s]</p>	$\varphi' = (t_i - t_e) / R'_t$ <p>[W/m²]</p>

UNI EN ISO 13788

Alcune espressioni

$$p_{\text{sat}} = 610,5 e^{\frac{17,269 \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{per } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{sat}} = 610,5 e^{\frac{21,875 \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{per } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$g = \boxed{\delta_p} \frac{\Delta p}{d} = \boxed{\frac{\Delta p}{Z_p}}$$

δ_p permeabilità al vapore
[kg / m s Pa]

$$g = \frac{\delta_0 \Delta p}{\boxed{\mu} d} = \delta_0 \frac{\Delta p}{\boxed{s_d}}$$

δ_0 permeabilità al vapore
dell'aria

$$\delta_0 = 193 \cdot 10^{-12} \text{ [kg / m s Pa]}$$

μ fattore di resistenza
igroscopica = δ_0 / δ

s_d (= $\mu d = \delta_0 d / \delta$) spessore
equivalente di aria per la
diffusione del vapore [m]

Dati sulla permeabilità dei materiali

UNI 10351:1994 Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore

Fornisce i valori di conduttività termica e di permeabilità dei materiali da costruzione.

Deve essere impiegata quando non esistano norme specifiche per il materiale considerato

Dati sulla permeabilità dei materiali

UNI 10351:1994

Materiale	ρ (kg/m ³)	$\delta_a 10^{12}$ (kg/msPa)	$\delta_u 10^{12}$ (kg/msPa)	λ_m (W/mK)	m %	λ (W/mK)
Aria in quiete						
aria a 293 K	1,3	193	193			0,026
Calcestruzzo a struttura chiusa						
calcestruzzo confezionato con aggregati naturali (valori di calcolo per pareti esterne e interne protette)	2.000	1,3-2,6	1,8-2,4	1,01	15	1,16
	2.200	1,3-2,6	1,8-2,4	1,29	15	1,48
	2.400	1,3-2,6	1,8-2,4	1,66	15	1,91
calcestruzzo di argille espanse (conduttività di riferimento relativa a materiale secco)	1.000	1,3-2,6	1,8-2,4	0,25	20	0,31
	1.100	1,3-2,6	1,8-2,4	0,29	20	0,35
	1.200	1,3-2,6	1,8-2,4	0,33	20	0,39
	1.300	1,3-2,6	1,8-2,4	0,37	20	0,44
	1.400	1,3-2,6	1,8-2,4	0,42	20	0,50
	1.500	1,3-2,6	1,8-2,4	0,47	20	0,57
	1.600	1,3-2,6	1,8-2,4	0,54	20	0,65
	1.700	1,3-2,6	1,8-2,4	0,63	20	0,75
Calcestruzzo a struttura aperta						
calcestruzzo di argille espanse (conduttività di riferimento relativa a materiale secco)	500	18-36	60	0,14	20	0,16
	600	18-36	60	0,16	20	0,18
	700	18-36	60	0,18	20	0,21
	800	18-36	60	0,20	20	0,24
	900	18-36	60	0,22	20	0,27
	1.000	18-36	60	0,25	20	0,31
calcestruzzo cellulare da autoclave (valori di calcolo per pareti interne o esterne protette)	400	18-36	40-60	0,12	25	0,15
	500	18-36	40-60	0,14	25	0,17
	600	18-36	40-60	0,15	25	0,19
	700	18-36	40-60	0,17	25	0,22
	800	18-36	40-60	0,20	25	0,25
calcestruzzo di inerti espansi di origine vulcanica (valori orientativi di calcolo per pareti interne o esterne protette)	1.000					0,38
	1.200					0,47
	1.400					0,58

Fattore di resistenza igroscopica dei materiali

UNI EN ISO 10456:2008 Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto

La norma specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali e prodotti per l'edilizia termicamente omogenei.

La norma fornisce inoltre valori di progetto tabulati che possono essere utilizzati nei calcoli di trasferimento di calore e umidità per materiali termicamente omogenei e prodotti comunemente utilizzati nella costruzione degli edifici.

Material group or application		Density ρ kg/m ³	Design thermal conductivity λ W/(m·K)	Specific heat capacity c_p J/(kg·K)	Water vapour resistance factor		
					μ		
					dry	wet	
Asphalt		2 100	0,70	1 000	50 000	50 000	
Bitumen	Pure	1 050	0,17	1 000	50 000	50 000	
	Felt/sheet	1 100	0,23	1 000	50 000	50 000	
Concrete ^a	Medium density	1 800	1,15	1 000	100	60	
		2 000	1,35	1 000	100	60	
		2 200	1,65	1 000	120	70	
	High density	2 400	2,00	1 000	130	80	
		Reinforced (with 1 % of steel)	2 300	2,3	1 000	130	80
		Reinforced (with 2 % of steel)	2 400	2,5	1 000	130	80
Floor coverings	Rubber	1 200	0,17	1 400	10 000	10 000	
	Plastic	1 700	0,25	1 400	10 000	10 000	
	Underlay, cellular rubber or plastic	270	0,10	1 400	10 000	10 000	
	Underlay, felt	120	0,05	1 300	20	15	
	Underlay, wool	200	0,06	1 300	20	15	
	Underlay, cork	< 200	0,05	1 500	20	10	
	Tiles, cork	> 400	0,065	1 500	40	20	
	Carpet / textile flooring	200	0,06	1 300	5	5	
	Linoleum	1 200	0,17	1 400	1 000	800	
Gases	Air	1,23	0,025	1 008	1	1	
	Carbon dioxide	1,95	0,014	820	1	1	
	Argon	1,70	0,017	519	1	1	
	Sulphur hexafluoride	6,36	0,013	614	1	1	
	Krypton	3,56	0,009 0	245	1	1	
	Xenon	5,68	0,005 4	160	1	1	
Glass	Soda lime glass (including "float glass")	2 500	1,00	750	∞	∞	
	Quartz glass	2 200	1,40	750	∞	∞	
	Glass mosaic	2 000	1,20	750	∞	∞	

Fenomeni di condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

confronto grafico dell'andamento di P_s e di P_v

Ipotesi:

il trasporto di umidità si verifica in fase vapore in un materiale non igroscopico;

non si considera l'effetto provocato dai gradienti termici esistenti nella struttura;

non si considera il trasporto associato a moti convettivi di aria umida;

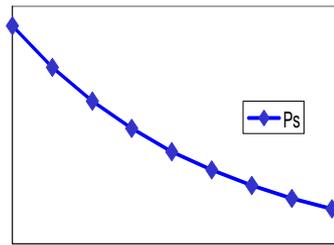
condizioni di regime stazionario;

l'acqua condensata non si muove verso le zone limitrofe più secche.

Fenomeni di condensazione interstiziale

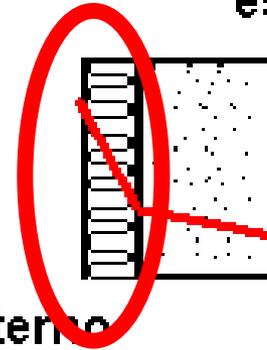
Procedura:

Calcolo della distribuzione di temperatura nella struttura



distribuzione di temperatura

esterno



interno

Calcolo della distribuzione di pressione di saturazione nella struttura

$$p_{\text{sat}} = 610,5 e^{\frac{17,269 \theta}{237,3 + \theta}}$$

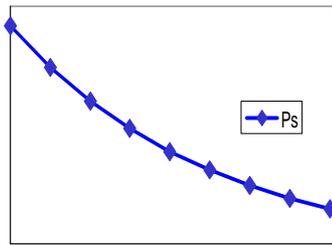
per $\theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$R \leq 0.25 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

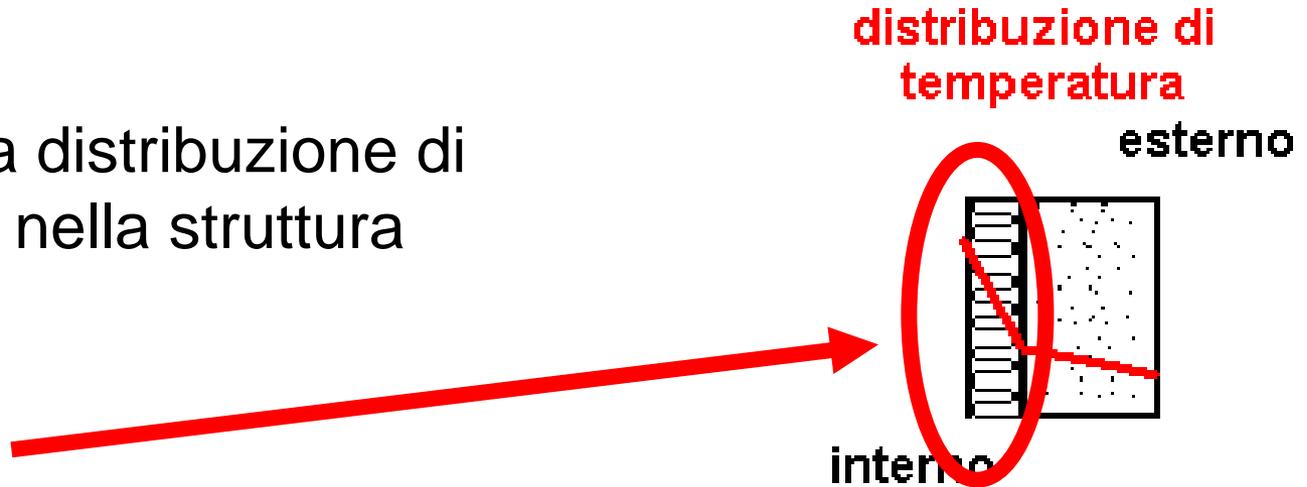
Fenomeni di condensazione interstiziale

Procedura:

Calcolo della distribuzione di temperatura nella struttura



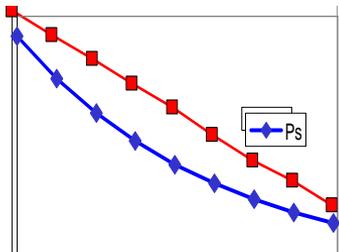
Resistenza alla diffusione del vapore z'v



Calcolo della distribuzione di pressione di saturazione nella struttura

$$p_{\text{sat}} = 610,5 e^{\frac{17,269 \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{per } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R \leq 0.25 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$



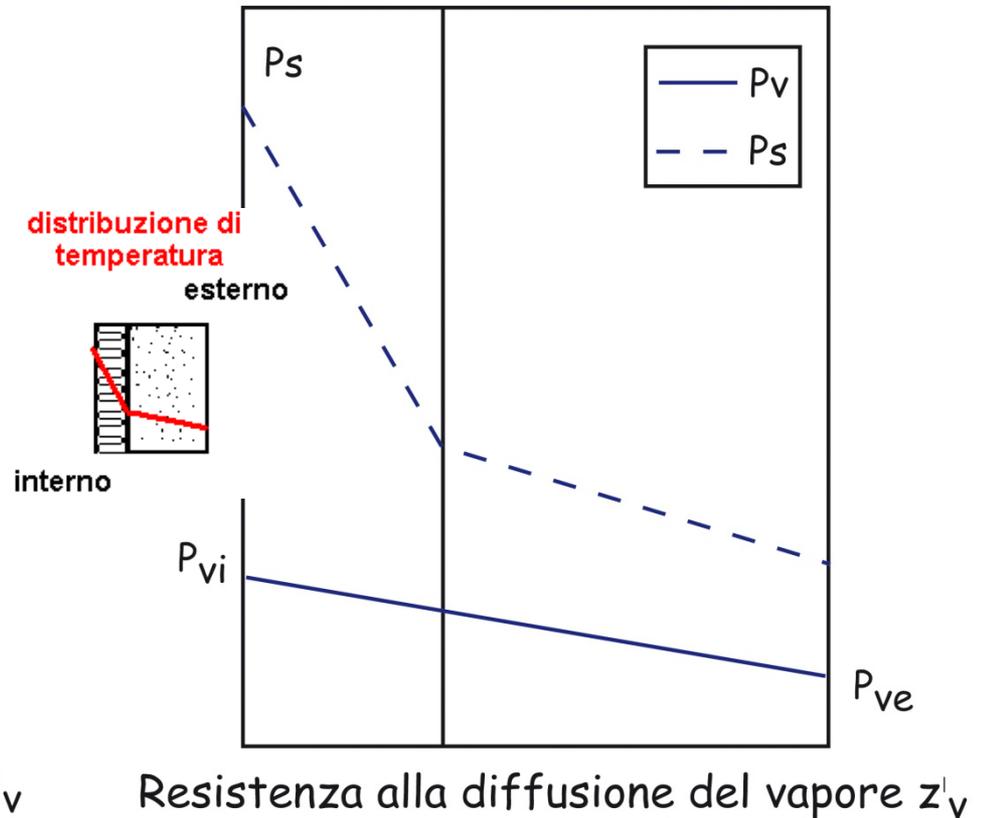
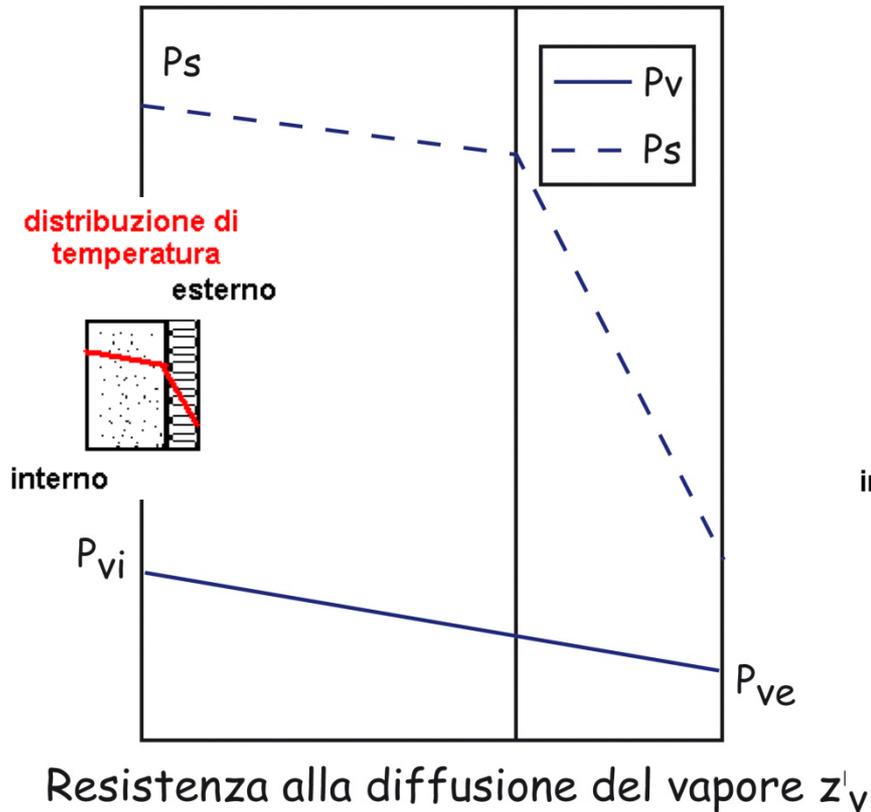
Resistenza alla diffusione del vapore z'v

Calcolo della pressione di vapore interna

Linea di congiungimento valore interno-esterno

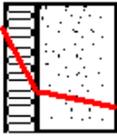
Fenomeni di condensazione interstiziale

Disposizione degli strati

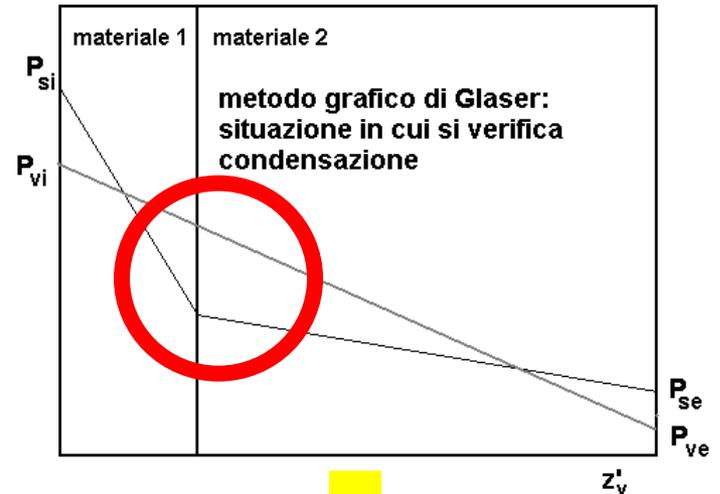
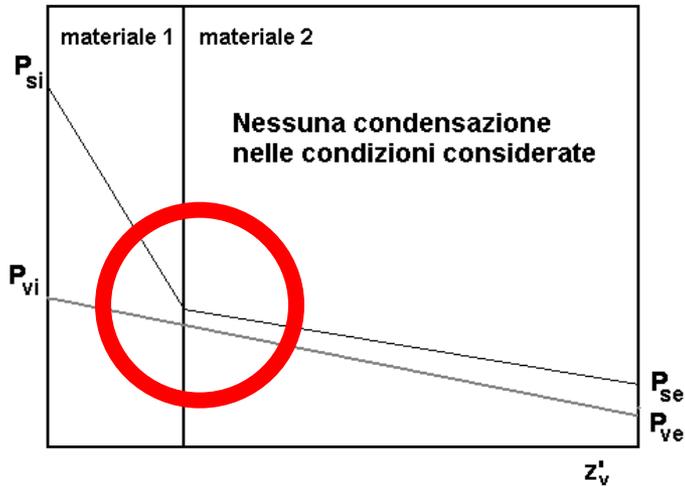


Fenomeni di condensazione interstiziale

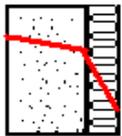
distribuzione di temperatura esterno



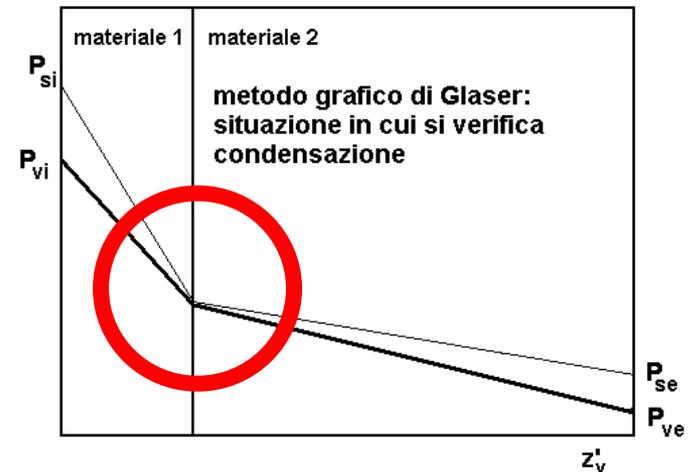
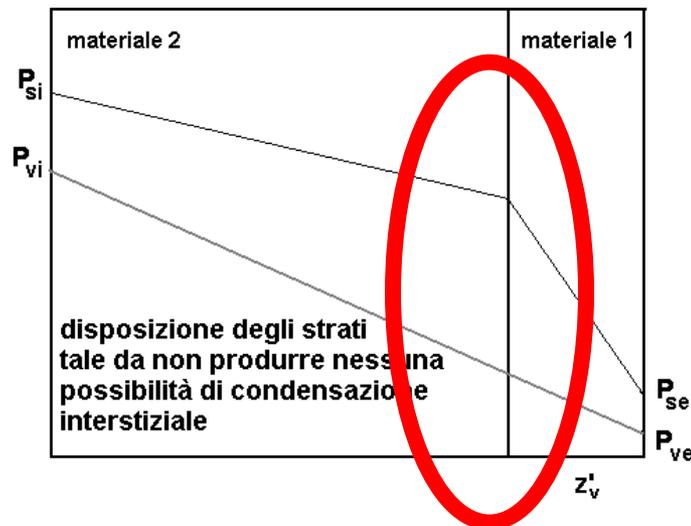
interno



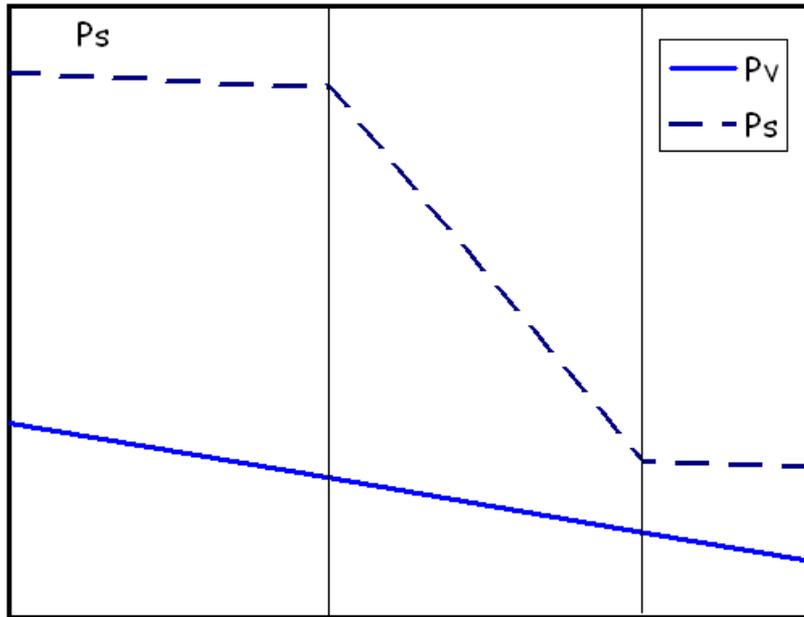
distribuzione di temperatura esterno



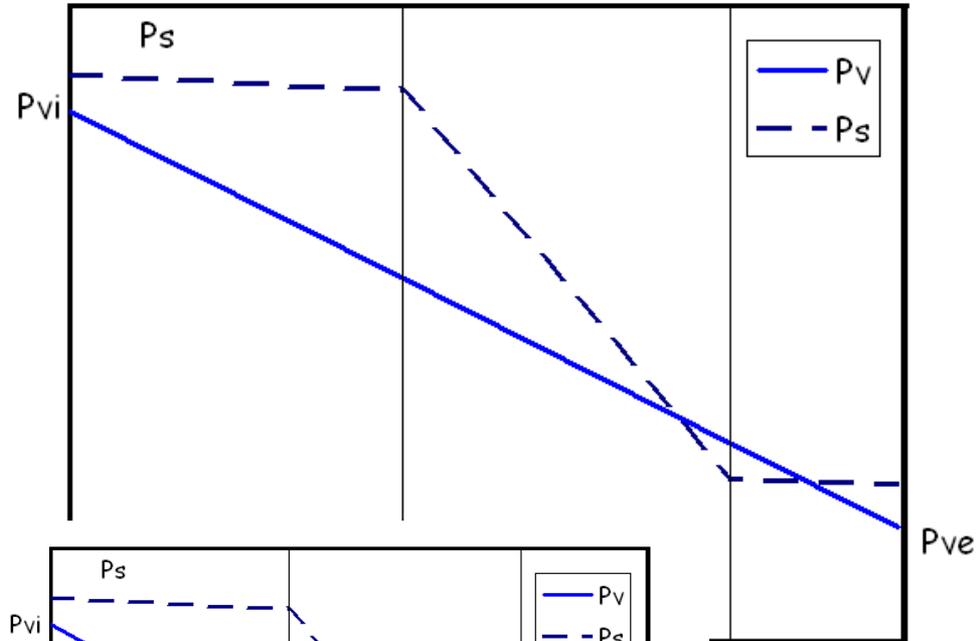
interno



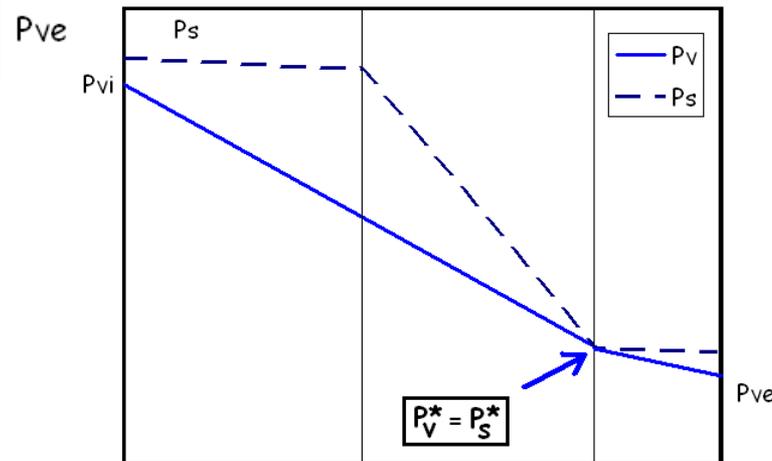
La condensazione dipende dalle condizioni climatiche, valutate su base mensile



Resistenza alla diffusione del vapore $z'v$



ore $z'v$



Resistenza alla diffusione del vapore $z'v$

Fenomeni di condensazione interstiziale

Quantità di vapore che condensa

Bilancio delle portate di vapore

Portata entrante (g'_{vi}) =

= portata uscente (g'_{ve}) + quantità di condensa

$$g'_{vi} - g'_{ve} = g'_c$$

g'_c = portata di vapore condensata per unità di area

Condensazione: $g'_{vi} - g'_{ve} > 0$

Evaporazione della condensa: $g'_{vi} - g'_{ve} < 0$

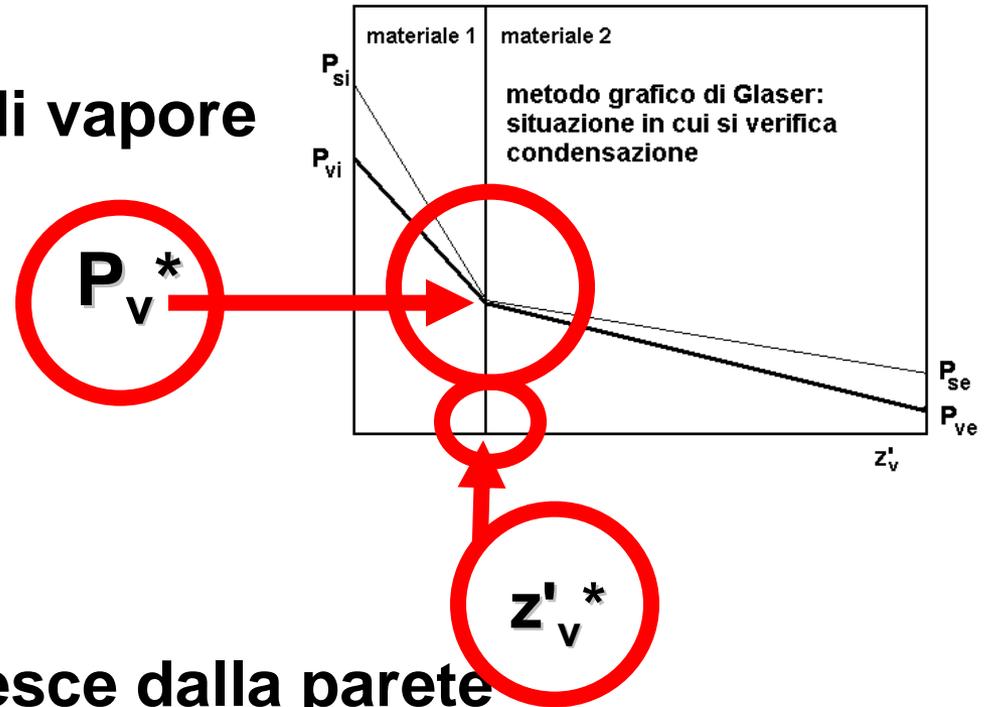
Fenomeni di condensazione interstiziale

Calcolo della condensa

Bilancio delle portate di vapore

Portata entrante

$$g'_{vi} = (P_{vi} - P_v^*) / z'_v{}^*$$



Portata di vapore che esce dalla parete

$$g'_{ve} = (P_v^* - P_{ve}) / (z'_v - z'_v{}^*)$$

Portata di vapore condensata per unità di area

$$g'_c = g'_{vi} - g'_{ve}$$

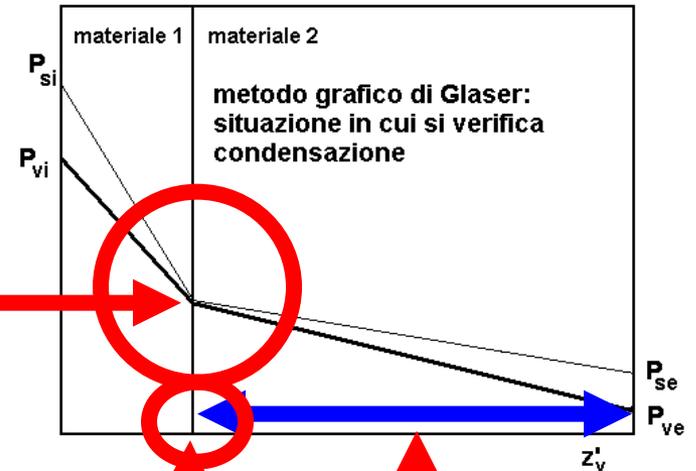
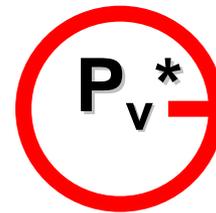
Fenomeni di condensazione interstiziale

Calcolo della condensa

Bilancio delle portate di vapore

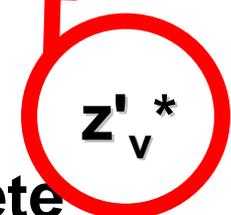
Portata entrante

$$g'_{vi} = (P_{vi} - P_v^*) / z'_v{}^*$$



Portata di vapore che esce dalla parete

$$g'_{ve} = (P_v^* - P_{ve}) / (z'_v - z'_v{}^*)$$



Portata di vapore condensata per unità di area

$$g'_c = g'_{vi} - g'_{ve}$$

Fenomeni di condensazione interstiziale

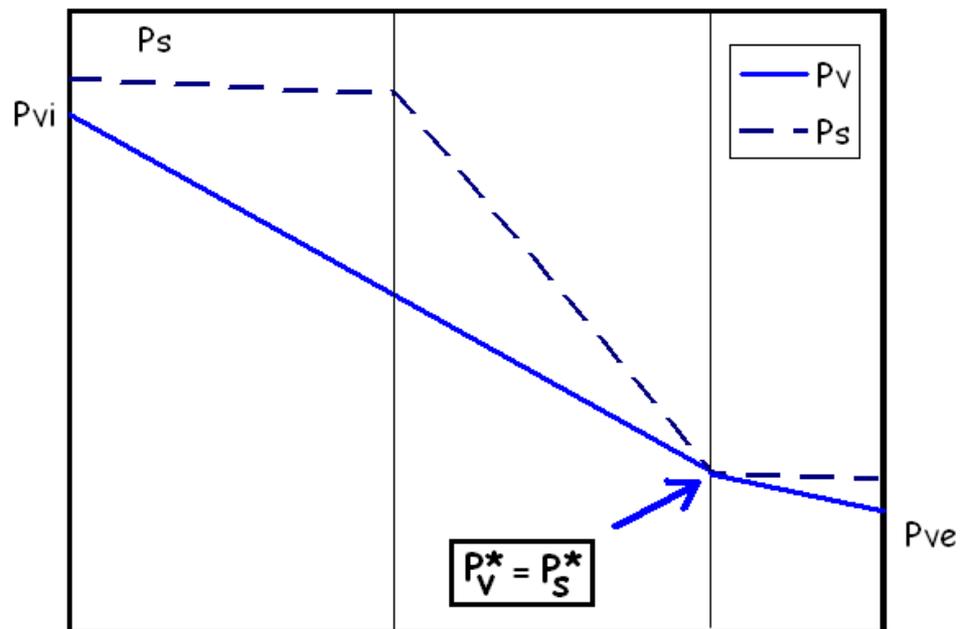
Condizioni per verifica positiva

Calcolo sulla base di condizioni climatiche medie mensili

Valutazione delle condizioni nel ciclo annuale

Quantità di vapore che condensa (in inverno) **UGUALE** o inferiore a quella che evapora (in estate)

INFERIORE al limite massimo ammissibile per il materiale

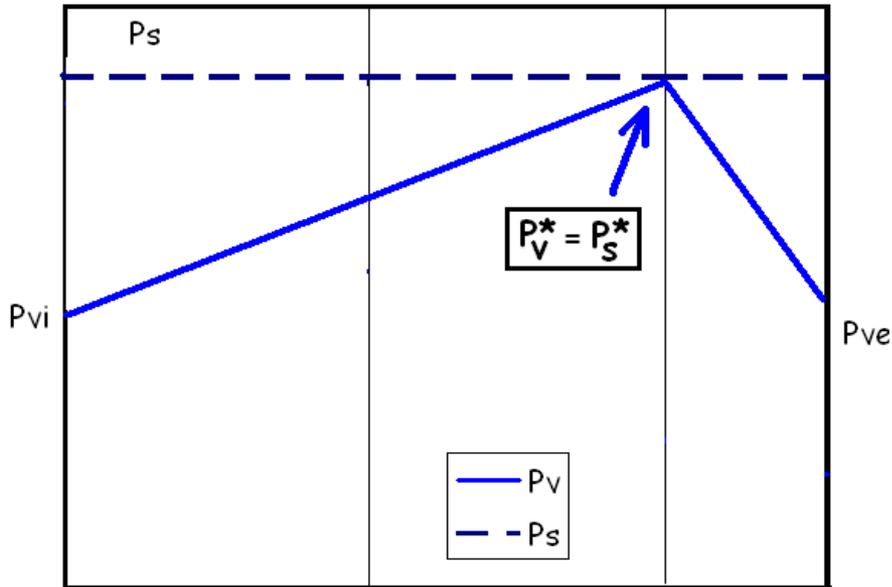


Resistenza alla diffusione del vapore $z'v$

Fenomeni di condensazione interstiziale

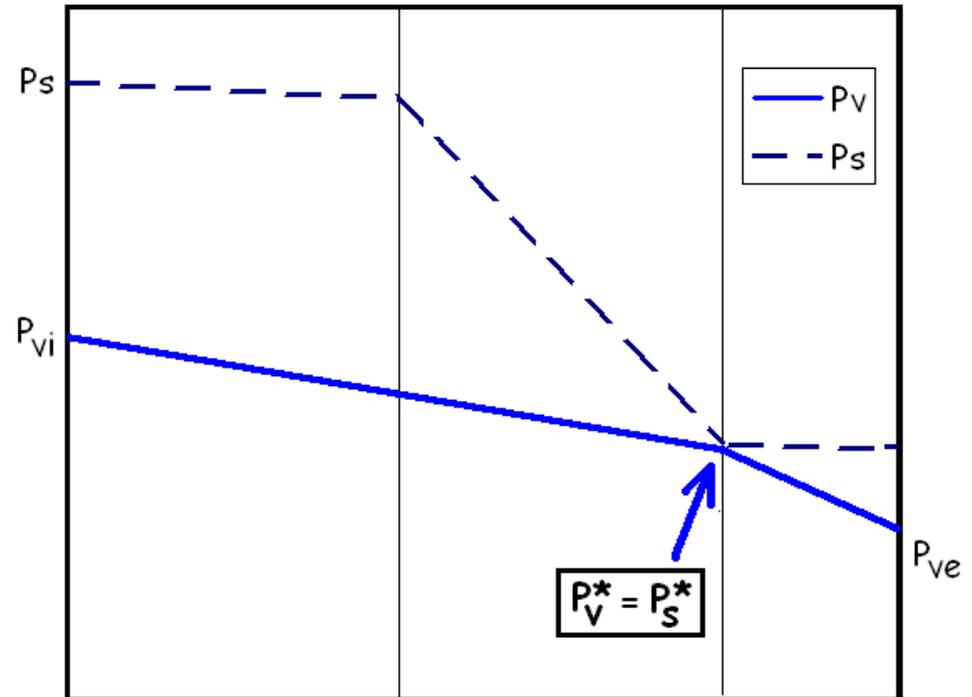
Evaporazione

Stagioni
intermedie



Resistenza alla diffusione del vapore $z'v$

Estate



Resistenza alla diffusione del vapore $z'v$

Problemi igrometrici degli edifici

Criteri di progettazione per prevenire fenomeni di degrado

- **FENOMENI IGROMETRICI DI SUPERFICIE**
- **CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE**

per evitare danneggiamenti:

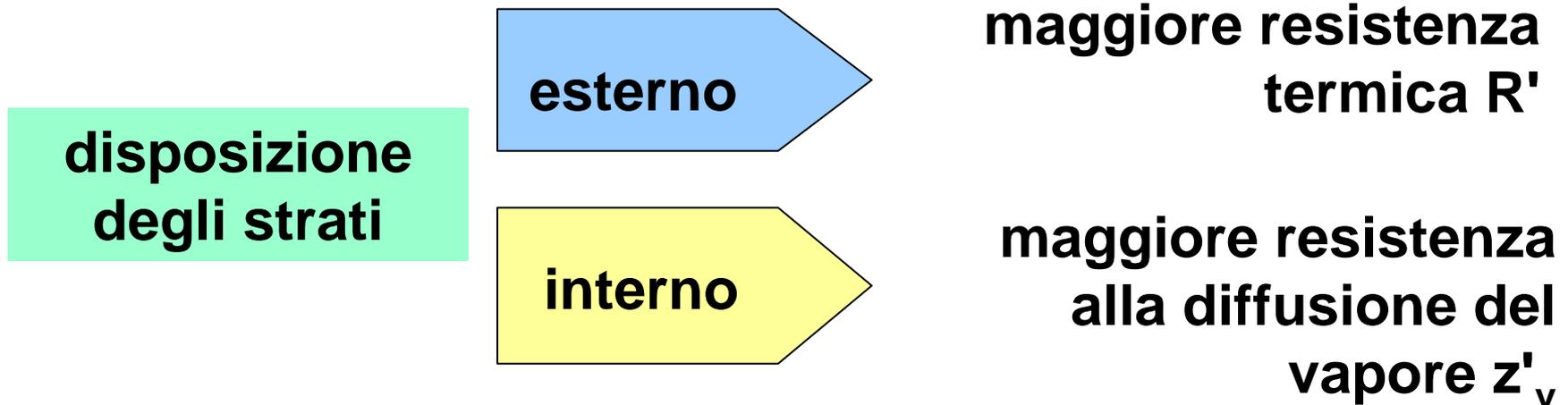
**intervenire sulle condizioni climatiche
interne**

**modificare il disegno delle parti di
edificio interessate**

Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Modifica dell'andamento della pressione di saturazione



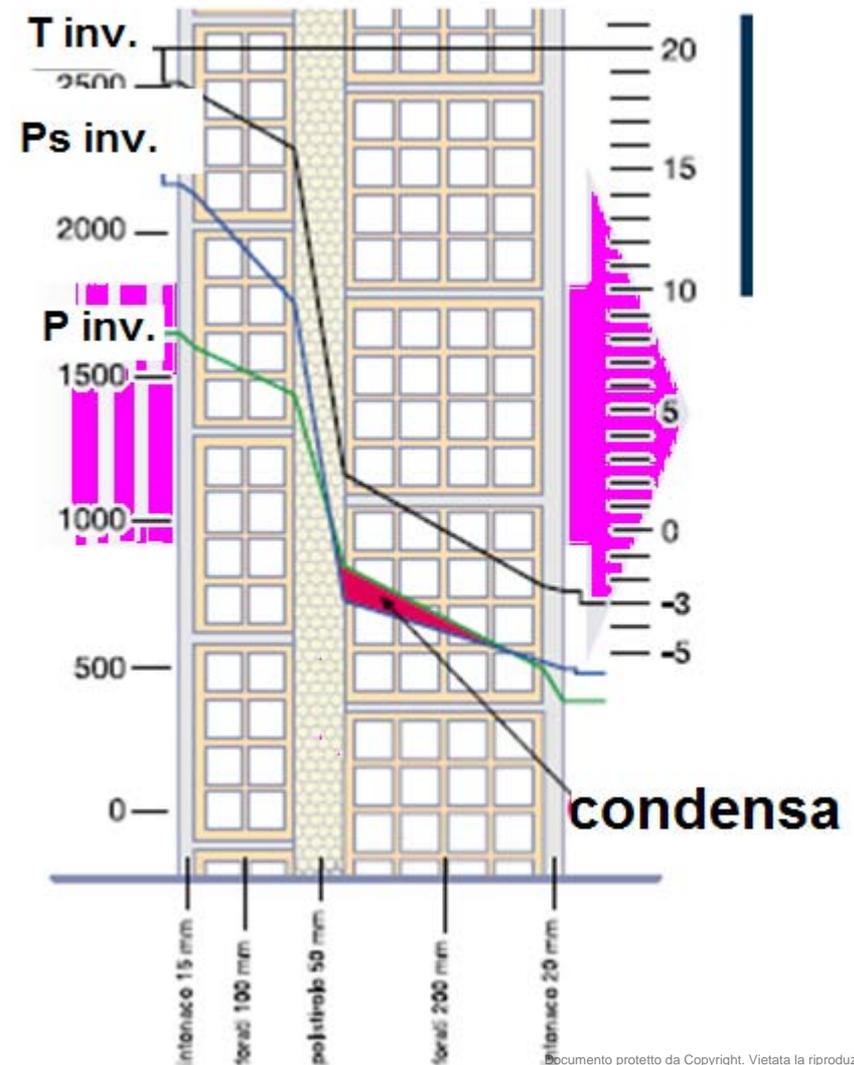
inserimento sul lato interno di un materiale ad alta resistenza alla diffusione (barriera al vapore)

Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Inserimento di strati isolanti
per mantenere la struttura a
temperatura maggiore

Pareti verticali - Cappotto

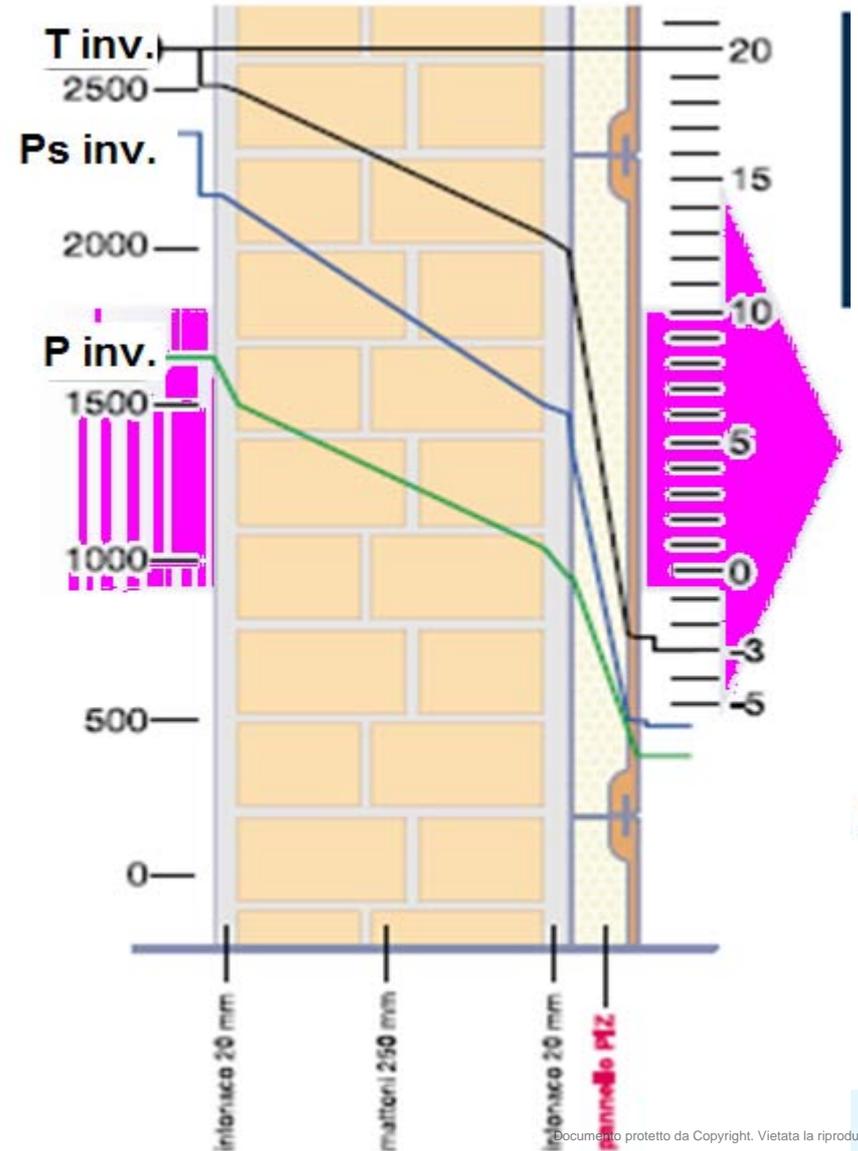


Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Inserimento di strati isolanti
per mantenere la struttura a
temperatura maggiore

Pareti verticali - Cappotto

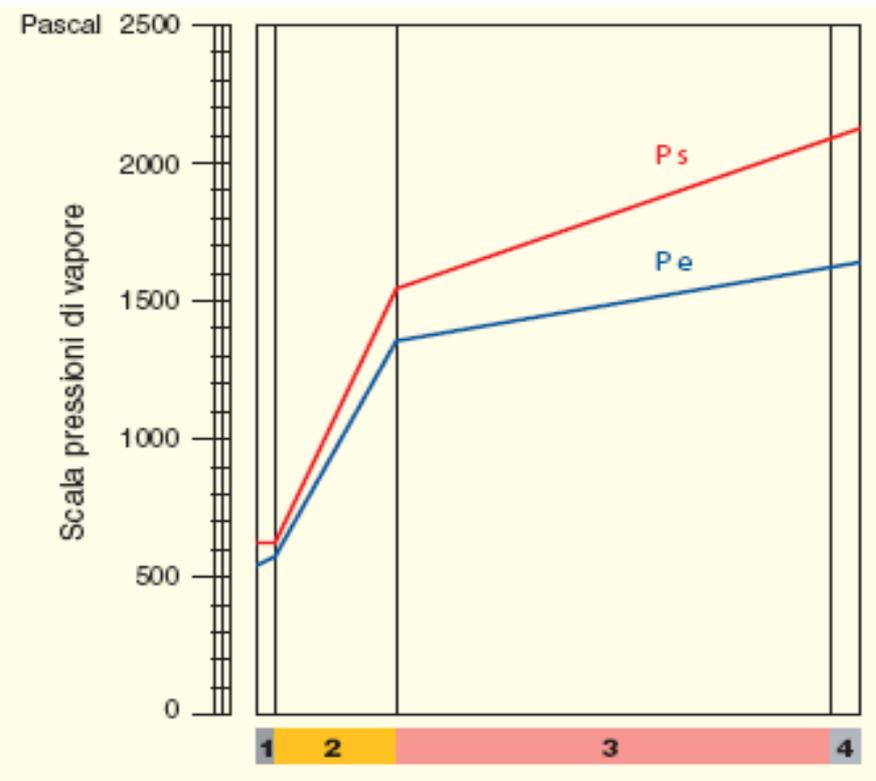
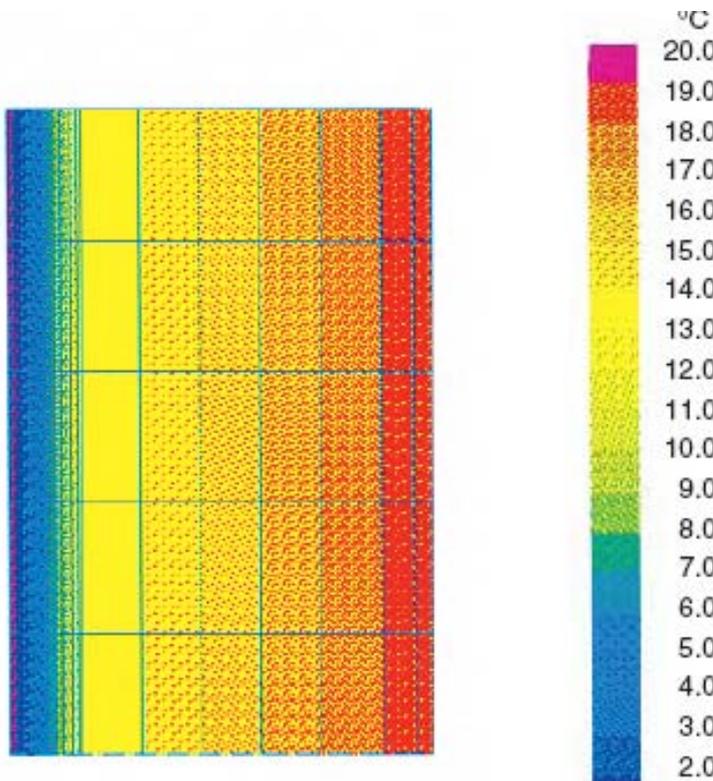


Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Inserimento di strati isolanti per mantenere la struttura a temperatura maggiore

Pareti verticali - Cappotto

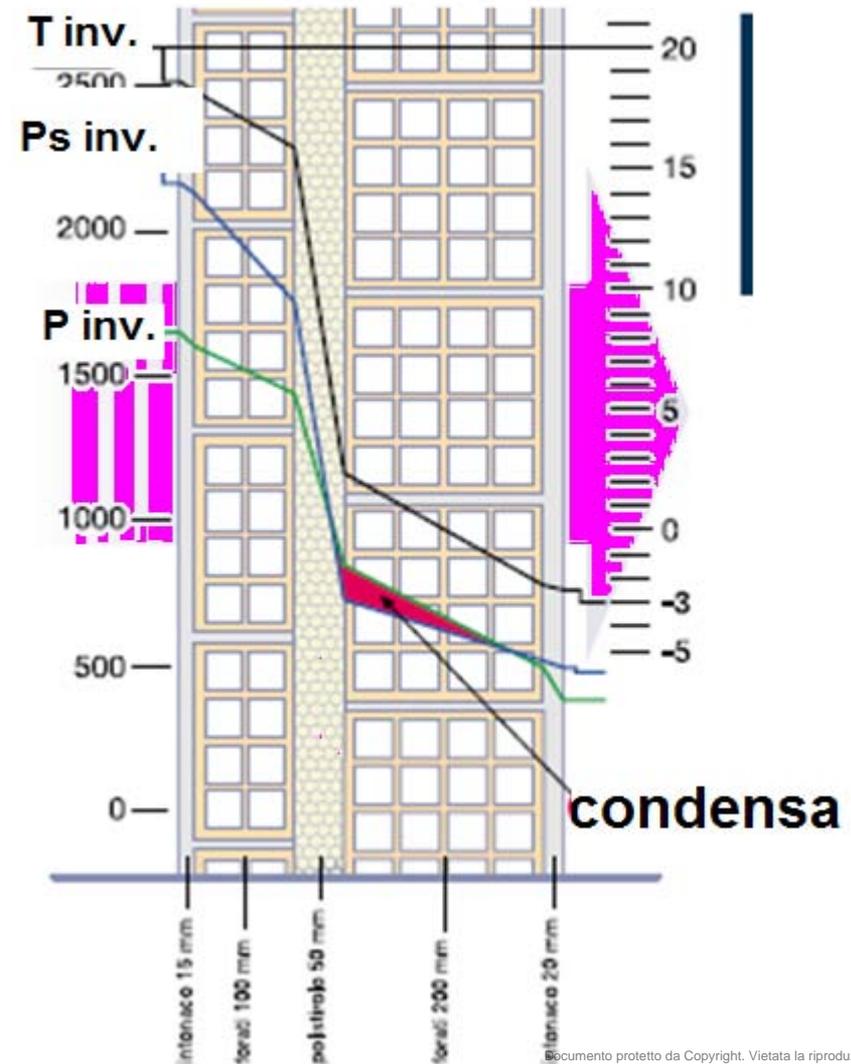
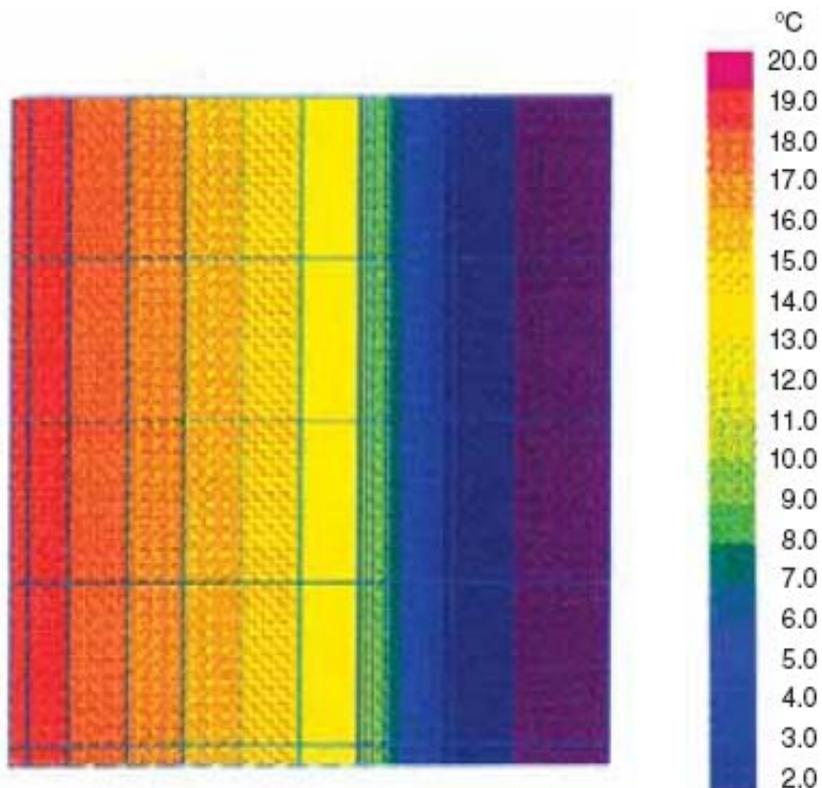


Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Pareti verticali

Isolante in intercapedine

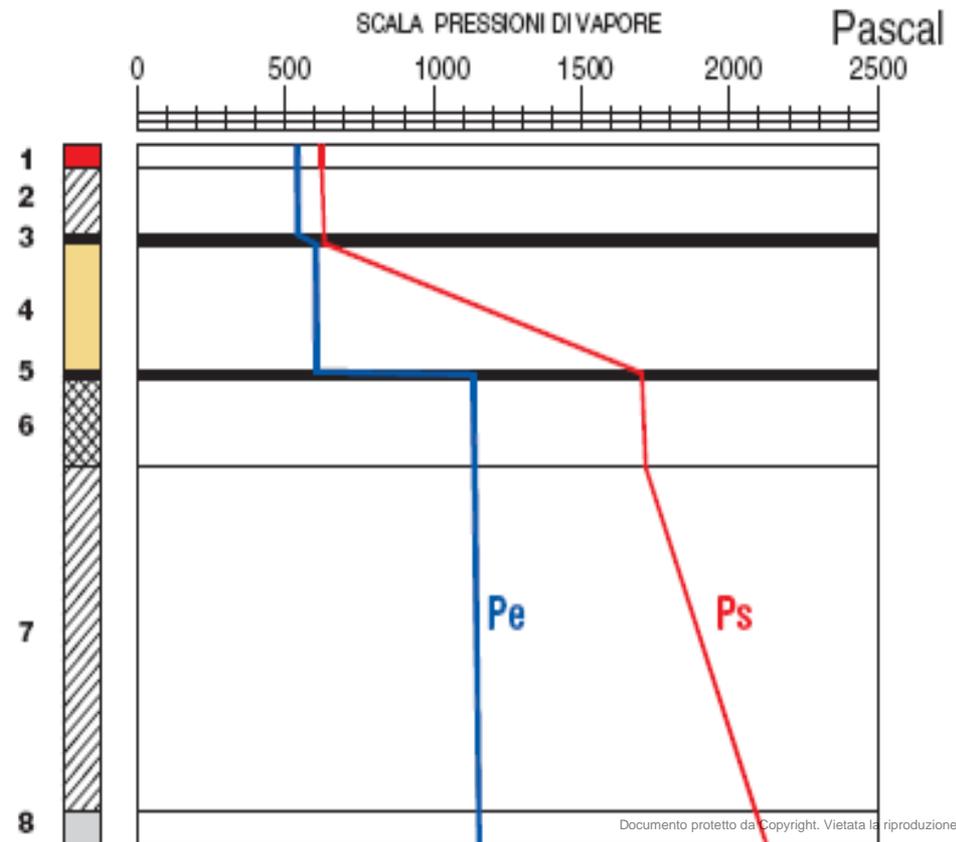
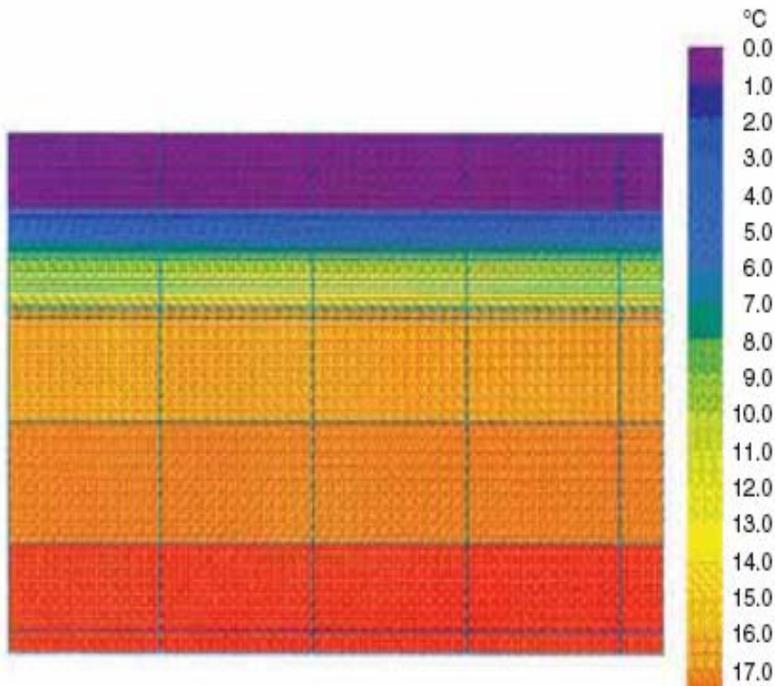


Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Inserimento di strati isolanti per mantenere la struttura a temperatura maggiore

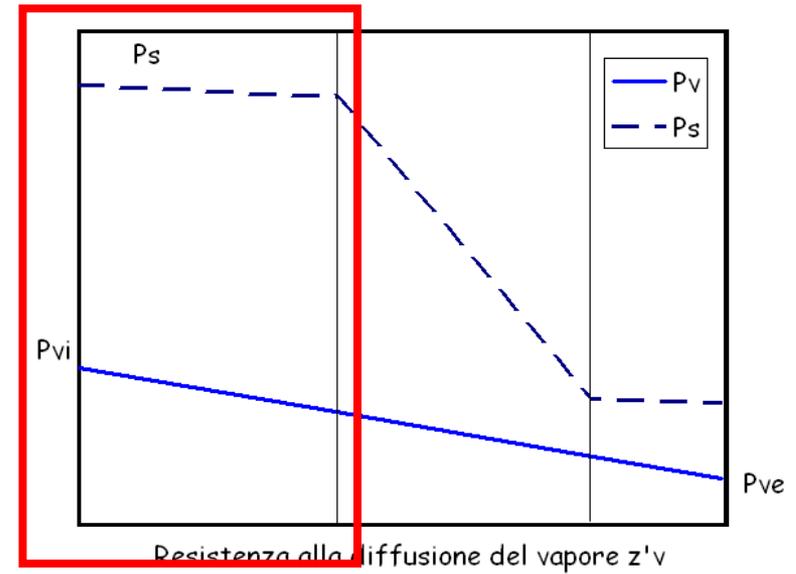
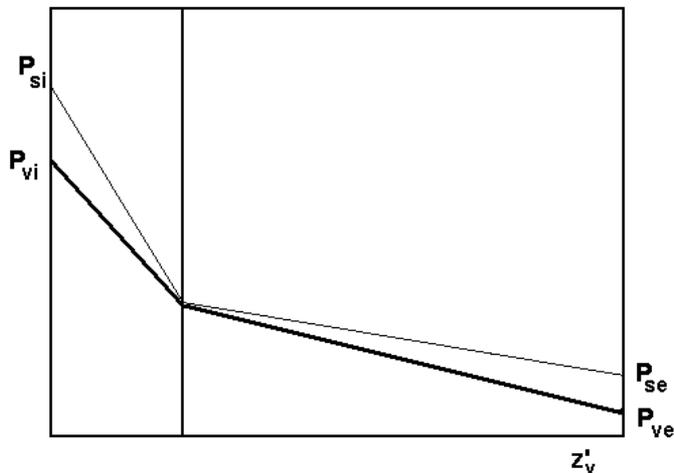
Coperture



Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Modifica dell'andamento della pressione di saturazione con inserimento di uno strato a bassissima permeabilità al vapore



Fenomeni di condensazione interstiziale

Criteri di intervento su strutture non idonee

Smaltimento della condensa

ventilazione naturale con aria esterna della zona (intercapedine) interessata alla condensazione

Modifica delle condizioni ambientali interne

Diminuzione della pressione del vapore nell'ambiente con un maggiore controllo delle condizioni termoigrometriche, per esempio mediante ventilazione controllata

Metodi di calcolo per scambio termico e di massa nelle strutture edilizie

UNI EN 15026:2008 3 luglio 2008

La norma specifica le equazioni da utilizzare in un metodo di simulazione per il calcolo del trasferimento in regime dinamico di calore e umidità nelle strutture degli edifici.

La norma fornisce inoltre un esempio di riferimento da utilizzare per validare la conformità di un metodo di simulazione alla norma stessa e indica le tolleranze ammesse

Le superfici opache e le relative problematiche igrometriche

Applicazioni numeriche

Prof. Paola Ricciardi

Condensazione superficiale del vapore

Calcolare lo spessore L_x dello strato isolante da inserire in una parete in modo da evitare sulla superficie rivolta verso l'ambiente interno la condensazione del vapore nelle seguenti condizioni:

$$t_i = 20^\circ\text{C}, t_e = -8^\circ\text{C}, i_i = 70\%,$$

$$\lambda_1 = 1.0 \text{ W/mK}, L_1 = 10 \text{ cm},$$

$$\lambda_2 = 0.04 \text{ W/mK}, L_x = ???$$

$$\lambda_3 = 0.8 \text{ W/mK}, L_3 = 6 \text{ cm}$$

$$(h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}, h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K})$$

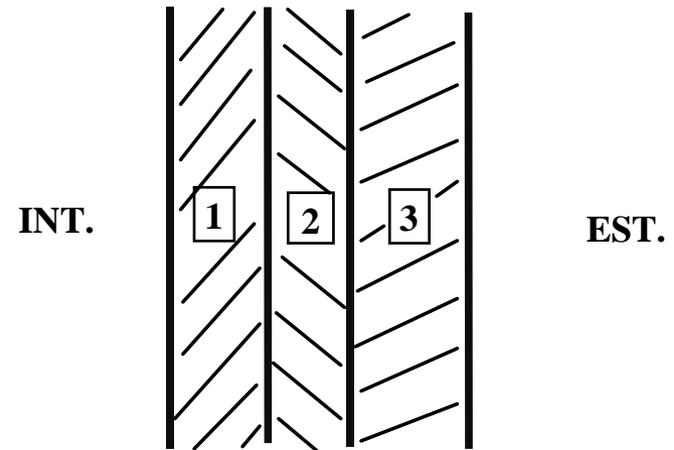


DIAGRAMMA DI MOLLIER

$$t_i = 20^\circ\text{C}$$

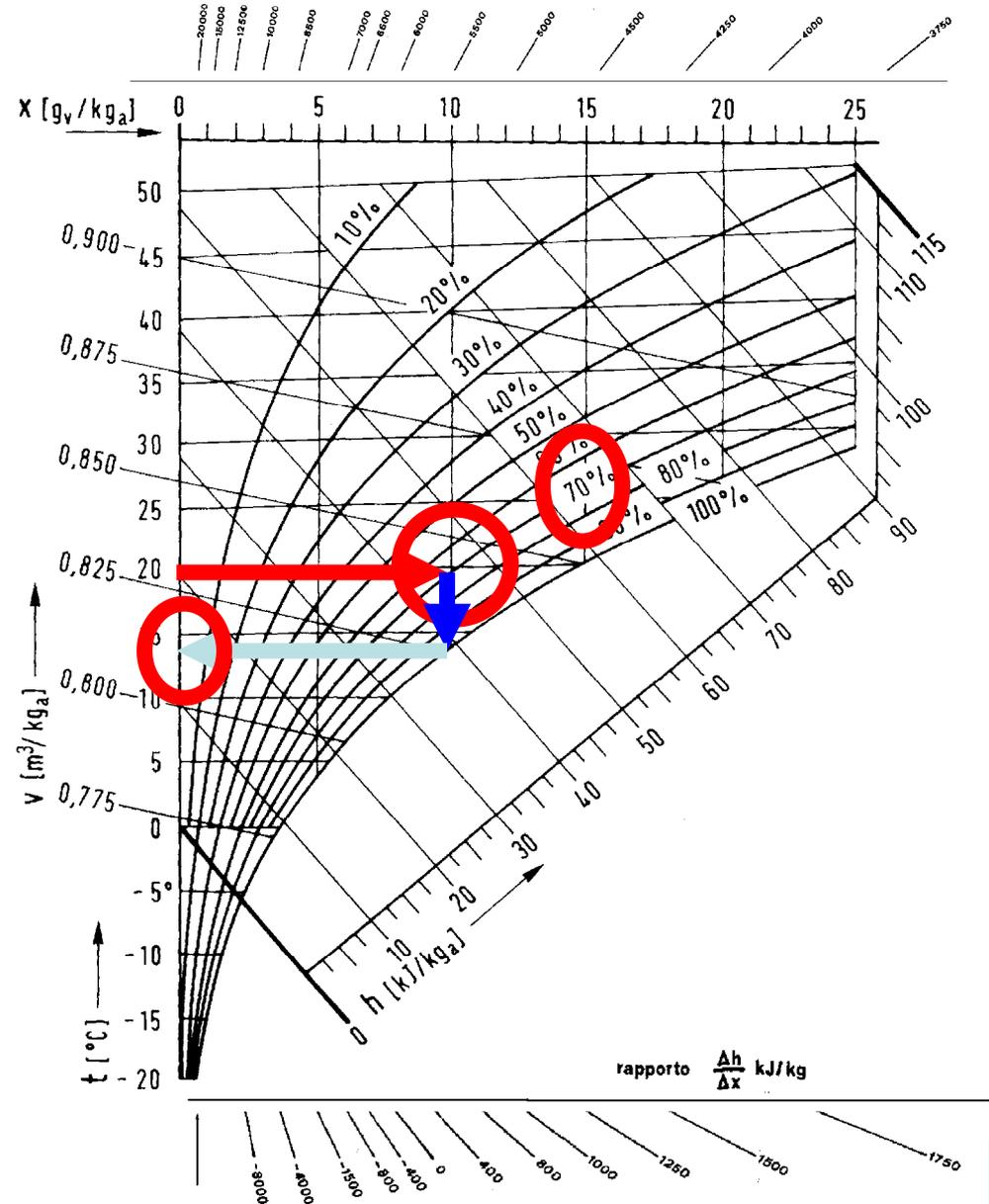
$$i_i = 70\%$$

$$t_e = -8^\circ\text{C}$$

Temperatura di rugiada:

$$t_r = 14^\circ\text{C}$$

Temperatura limite superficiale

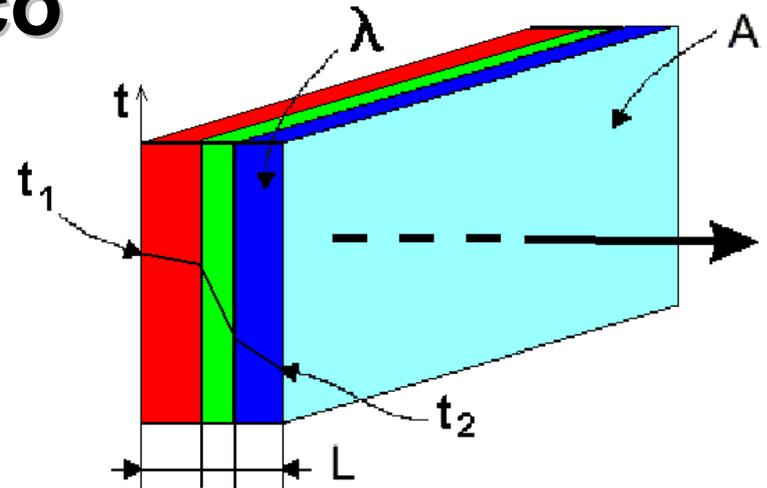


Calcolo del flusso termico

$$\varphi = h_i (t_i - t_{pi}) = 8 (20 - 14) = 48 \text{ W}$$

$$\varphi = (t_i - t_e) / R'_t \quad [\text{W}]$$

$$R'_t = (t_i - t_e) / \varphi = \\ = (20 + 8) / 48 = 0.58 \text{ m}^2\text{K/W}$$



Resistenza termica specifica R'_t

$$R'_t = (1/h_i + \sum_i L_i / \lambda_i + 1/h_e) \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$R'_t = 1/8 + 0.10/1 + L_x/0.04 + 0.06/0.8 + 1/23 = 0.58$$

$$L_x = 0.01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

Verifica dei fenomeni superficiali

Valutare il fattore di temperatura f_{Rsi} di un monolocale abitato da una persona in Novembre.

Dati: superficie in pianta 35 m^2 ,

altezza ambiente $h = 3 \text{ m}$,

temperatura esterna $t_e = 4^\circ\text{C}$,

temperatura interna $t_i = 20^\circ\text{C}$,

umidità relativa interna $i_e = 88\%$)

$$P_s = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269t}{237.3+t}}$$

Supponendo che tale valore risulti il massimo calcolato nella stagione invernale, valutare la trasmittanza massima che si può assumere per le pareti perimetrali.

Verifica dei fenomeni superficiali

Soluzione

$$P_s = 610.5 e^{\frac{17.269t}{237.3+t}}$$

Per calcolare f_{Rsi} relativo al mese indicato occorre determinare t_{pi} tale che $P_{vi} \leq 0.8 P'_{si}$

a) pressione di vapore media mensile esterna P_{ve} :

$$P_{se} = P_{se}(t_e) = 812 \text{ Pa}$$

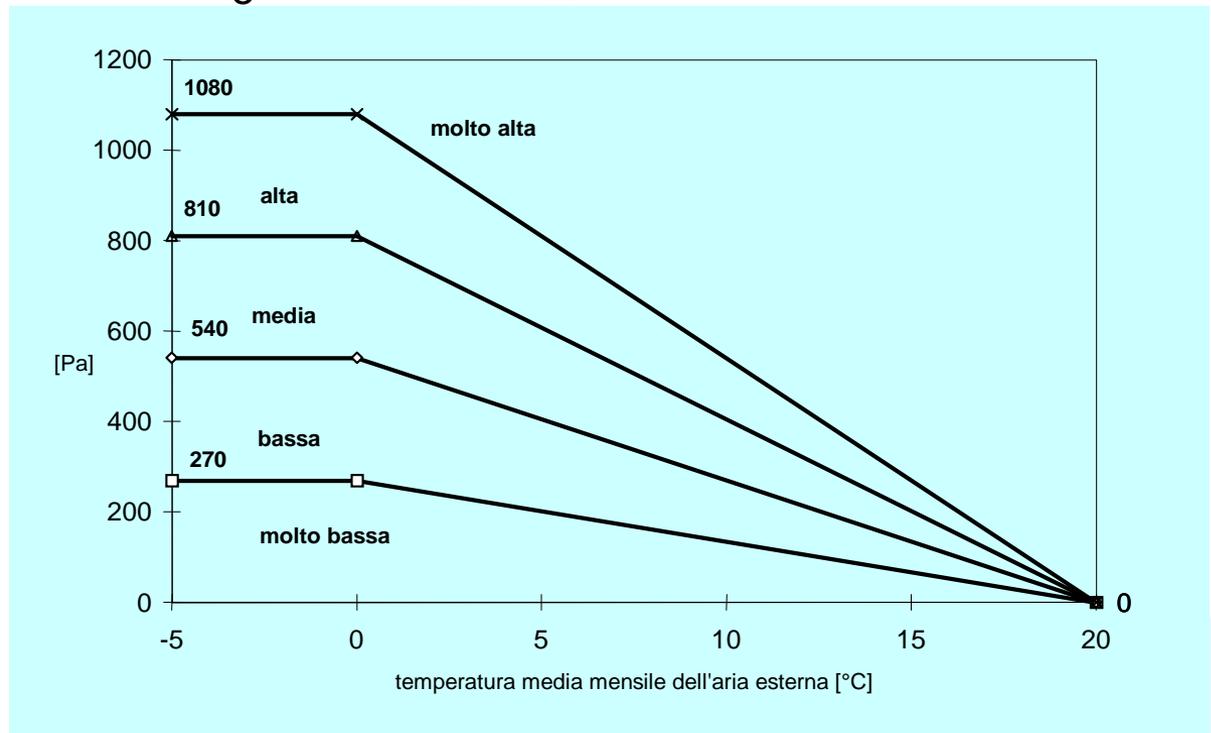
$$P_{ve} = i_e P_{se} = 0.88 \cdot 812 = 714.5 \text{ Pa}$$

Verifica dei fenomeni superficiali

b) pressione di vapore media mensile interna P_{vi} :

$$P_{vi} = P_{ve} + \Delta P_v$$

classe di affollamento tra media e alta, dal grafico
(o dalla expr. $\Delta P'_v = -40.5 t_e + 810$ [Pa]):



Verifica dei fenomeni superficiali

b) pressione di vapore media mensile interna P_{vi} :

$$P_{vi} = P_{ve} + \Delta P_v$$

classe di affollamento tra media e alta, dal grafico
(o dalla expr. $\Delta P'_v = -40.5 t_e + 810$ [Pa]):

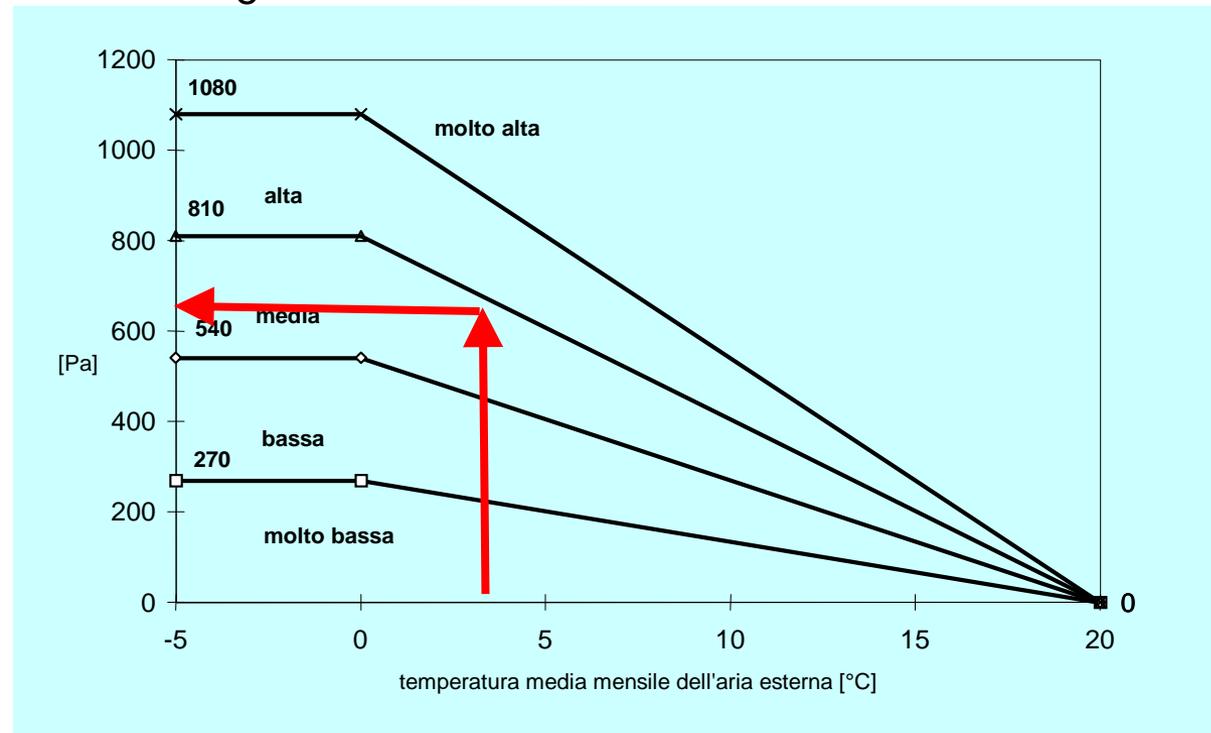
$$\Delta P'_v = 648 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_v = 1.10 \Delta P'_v$$

$$\Delta P_v = 713 \text{ Pa}$$

$$P_{vi} = 714.5 + 713$$

$$P_{vi} = 1427.3 \text{ Pa}$$



Verifica dei fenomeni superficiali

c) Si impone $P_{vi} = 0.8 P'_{si}(t_{pi})$ e si determina P'_{si}

$$P'_{si} = P_{vi} / 0.8 = 1784 \text{ Pa}$$

d) t_{pi} si ottiene attraverso la seguente espressione

$$P_s = 610.5 e^{\frac{17.269t}{237.3+t}}$$

valida per temperature $\geq 0^\circ\text{C}$

$$t_{pi} = 15.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$f_{Rsi} = 0.732$$

Verifica dei fenomeni superficiali

Supponendo che in questo caso $f_{Rsi} = f_{Rsi}^{\max}$

trasmittanza termica delle pareti perimetrali necessaria per assicurare sulla superficie $f_{Rsi} > f_{Rsi}^{\max}$

$$U = h_i (1 - f_{Rsi}) < h_i (1 - f_{Rsi}^{\max})$$

ponendo $h_i = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$U < 1.07 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La parete dovrà essere caratterizzata da una trasmittanza minore di $1.07 \text{ W/m}^2\text{K}$

CALCOLO DEL FATTORE DI TEMPERATURA in corrispondenza delle superfici interne per evitare valori critici di umidità superficiale

CALCOLO DEL FATTORE DI TEMPERATURA in corrispondenza delle superfici interne per evitare valori critici di umidità superficiale

Uso delle classi di umidità interna

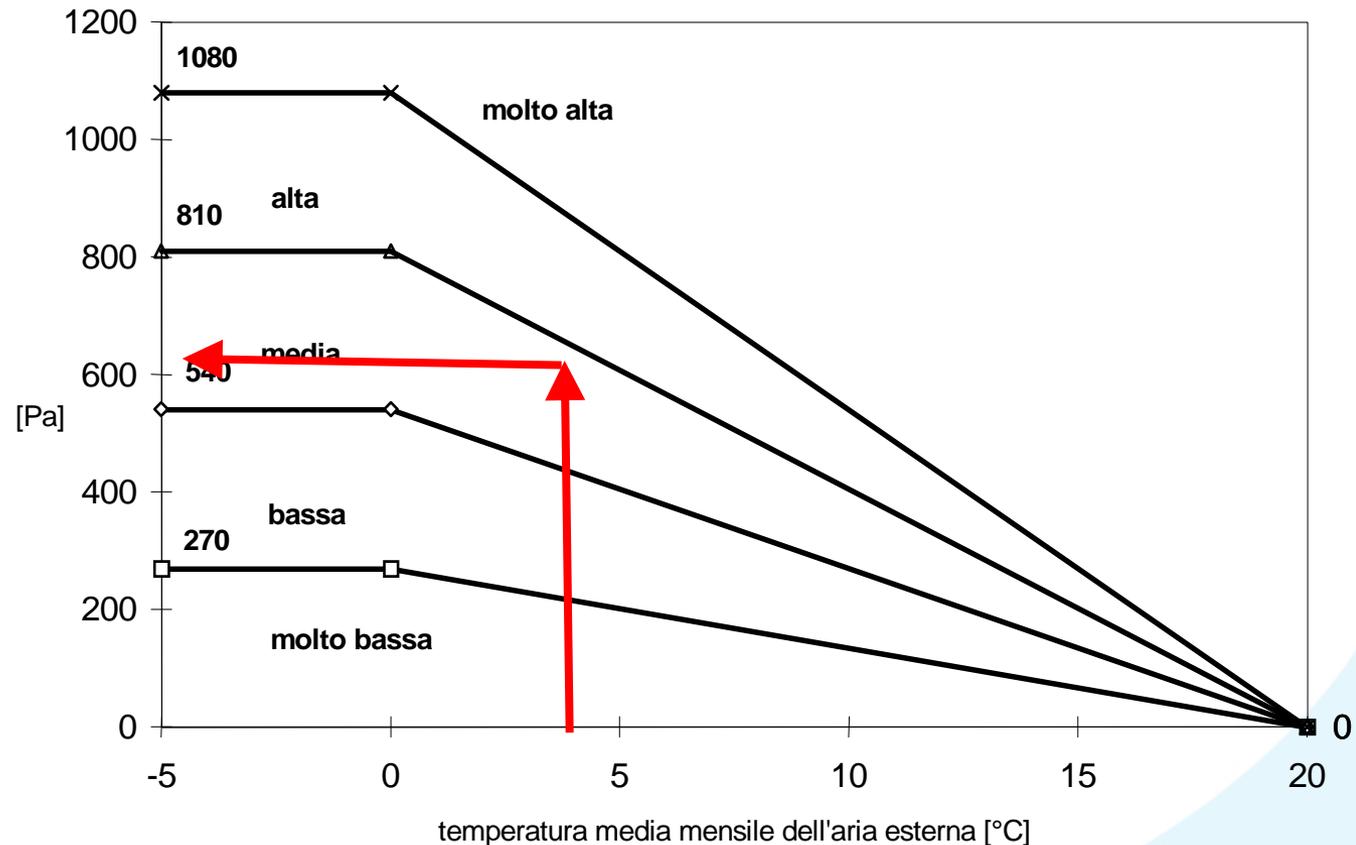
- 1) La temperatura media mensile esterna t_e e l'umidità relativa esterna media mensile i_e sono definite per la località in cui si trova l'edificio
- 2) La pressione di saturazione esterna mensile P_{se} calcolata in base alla temperatura e l'umidità relativa esterna mensile sono usate per calcolare la pressione di vapore esterna P_{ve}

CALCOLO DEL FATTORE DI TEMPERATURA

3) L'incremento di pressione di vapore ΔP_v , in relazione alla classe di umidità dell'edificio, è desunto in funzione della temperatura esterna (valore limite tra la classe 3 e 4), moltiplicato per 1,10

aggiunto a P_{ve}

per ottenere la
pressione di
vapore interna
 P_{vi}



CALCOLO DEL FATTORE DI TEMPERATURA

4) La pressione di saturazione minima accettabile P_{si} è

$$P_{si} = P_{vi} / 0.8$$

La t_{pi} corrispondente è calcolata da:

$$t = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{P_{sat}}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left(\frac{P_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{per } P_{sat} \geq 610,5 \text{ Pa}$$

CALCOLO DEL FATTORE DI TEMPERATURA

- 5) Dal valore di t_{pi} si calcola il corrispondente valore di f_{Rsi}
 Con le condizioni assunte in Tabella, Gennaio risulta il mese critico con $f_{Rsi,max} = 0,766$.

Mese	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	θ_e °C	φ_e	p_e Pa	Δp Pa	p_i Pa	$p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	θ_I °C	f_{Rsi}
Gennaio	2,8	0,92	683	698	1 451	1 813	16,0	20	0,766
Febbraio	2,8	0,88	657	697	1 423	1 779	15,7	20	0,748
Marzo	4,5	0,85	709	630	1 402	1 752	15,4	20	0,706
Aprile	6,7	0,80	788	538	1 380	1 725	15,2	20	0,638
Maggio	9,8	0,78	941	415	1 398	1 747	15,4	20	0,550
Giugno	12,6	0,80	1 162	299	1 491	1 864	16,4	20	0,513
Luglio	14,0	0,82	1 302	244	1 571	1 963	17,2	20	0,538
Agosto	13,7	0,84	1 317	256	1 598	1 998	17,5	20	0,602
Settembre	11,5	0,87	1 183	343	1 560	1 950	17,1	20	0,659
Ottobre	9,0	0,89	1 017	446	1 507	1 884	16,6	20	0,688
Novembre	5,0	0,91	788	610	1 458	1 823	16,1	20	0,738
Dicembre	3,5	0,92	719	670	1 456	1 820	16,0	20	0,759

CALCOLO DEL FATTORE DI TEMPERATURA

- 5) Dal valore di t_{pi} si calcola il corrispondente valore di f_{Rsi}
 Con le condizioni assunte in Tabella, Gennaio risulta il mese critico con $f_{Rsi,max} = 0,766$.

Mese	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	θ_e °C	φ_e	p_e Pa	Δp Pa	p_i Pa	$p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	θ_i °C	f_{Rsi}
Gennaio	2,8	0,92	683	698	1 451	1 813	16,0	20	0,766
Febbraio	2,8	0,88	657	697	1 423	1 779	15,4	20	0,748
Marzo	4,5	0,85	709	630	1 402	1 752	15,4	20	0,706
Aprile	6,7	0,80	788	538	1 380	1 725	15,2	20	0,638
Maggio	9,8	0,78	941	415	1 398	1 747	15,4	20	0,550
Giugno	12,6	0,80	1 162	299	1 491	1 864	16,4	20	0,513
Luglio	14,0	0,82	1 302	244	1 571	1 963	17,2	20	0,538
Agosto	13,7	0,84	1 317	256	1 598	1 998	17,5	20	0,602
Settembre	11,5	0,87	1 183	343	1 560	1 950	17,1	20	0,659
Ottobre	9,0	0,89	1 017	446	1 507	1 884	16,6	20	0,688
Novembre	5,0	0,91	788	610	1 458	1 823	16,1	20	0,738
Dicembre	3,5	0,92	719	670	1 456	1 820	16,0	20	0,759

Trasmissione del vapore

Determinare la portata specifica di vapore g_v [kg/m²s] che attraversa un pannello di polistirolo di separazione degli ambienti 1 e 2 isoterma

$$t_i = t_e = 20^\circ\text{C}, P_s = 2340 \text{ Pa}, i_i = 0.7, i_e = 0.3,$$

$$\text{spessore pannello } L = 10 \text{ cm}, \delta = 4 * 10^{-12} \text{ kg/msPa}$$

$$g'_{vi} = (P_{vi} - P_{ve}) / z'_v$$

$$z'_v = \sum_i L_i / \delta_i =$$

$$= L / \delta = 0.10 / (4 * 10^{-12}) = 0.025 * 10^{12}$$

$$P_{vi} = i_i P_{si} = 0.7 * 2340 = 1638 \text{ Pa}$$

$$P_{ve} = i_e P_{se} = 0.3 * 2340 = 702 \text{ Pa}$$

$$g'_{vi} = (P_{vi} - P_{ve}) / z'_v = (1638 - 702) / (0.025 * 10^{12}) = 3.74 * 10^{-8} \text{ kg/s} = \mathbf{0.13 \text{ g/h}}$$

Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

Verificare se si può avere condensazione del vapore nella parete (dall'interno verso l'esterno):

intonaco $L_1 = 1\text{cm}$ $\lambda_1 = 1.0\text{ W/mK}$, $\delta_1 = 18 \cdot 10^{-12}\text{ kg/m s Pa}$

isolante $L_2 = 8\text{cm}$ $\lambda_2 = 0.035\text{ W/mK}$, $\delta_2 = 150 \cdot 10^{-12}\text{ kg/m s Pa}$

mattoni $L_3 = 13\text{cm}$ $\lambda_3 = 0.2\text{ W/mK}$, $\delta_3 = 30 \cdot 10^{-12}\text{ kg/m s Pa}$

Condizioni termoigrometriche medie mensili di riferimento:

$t_e = 0^\circ\text{C}$, $i_e = 80\%$, $t_i = 20^\circ\text{C}$, $i_i = 50\%$

Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

Soluzione

Distribuzione della temperatura all'interno della parete
trasmittanza termica della parete $U = 0.32 \text{ W/m}^2\text{K}$

flusso termico specifico $\varphi' = 6.4 \text{ W/m}^2$

temperatura all'interfaccia tra gli strati: $t_x = t_e + \varphi' R'_j$

R'_j = resistenza a partire dall'esterno fino all'interfaccia j.

In corrispondenza delle temperature t_x si possono calcolare le pressioni di saturazione.

Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

Posizione	t [°C]	P _s [Pa]
Ambiente interno	20	2339.3
Superficie interna	19.2	2225.7
Interfaccia intonaco/isolante	19.1	2216.8
Interfaccia isolante/mattoni	4.5	839.9
Superficie esterna	0.3	623.4
Ambiente esterno	0	610.9

Pressione del vapore:

$$P_{vi} = i_i P_{si} = 0.5 \cdot 2339.3 = 1169.6 \text{ Pa}$$

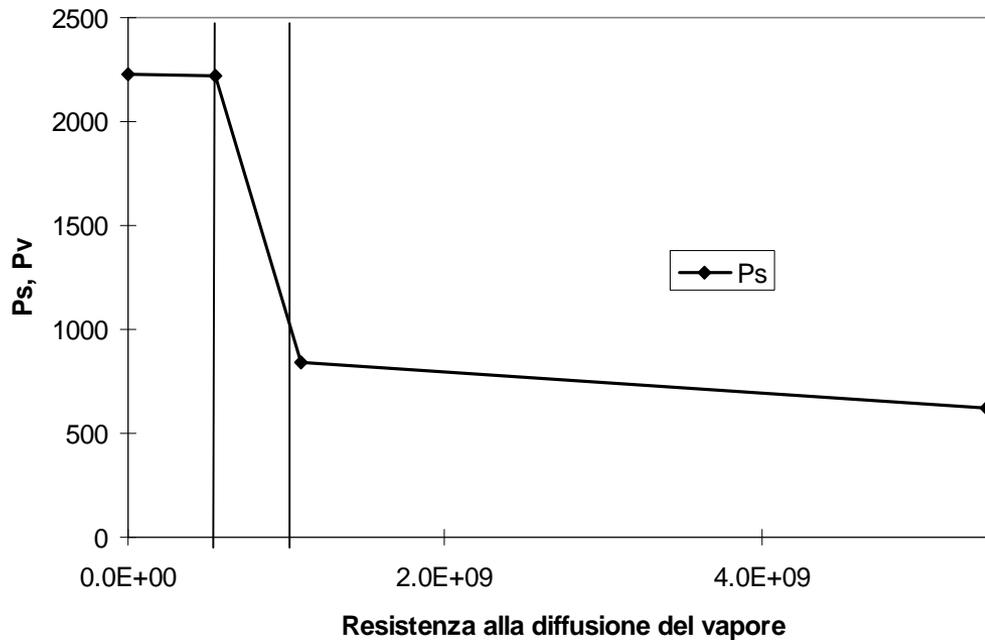
$$P_{ve} = i_e P_{se} = 0.8 \cdot 610.9 = 488.7 \text{ Pa}$$

Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

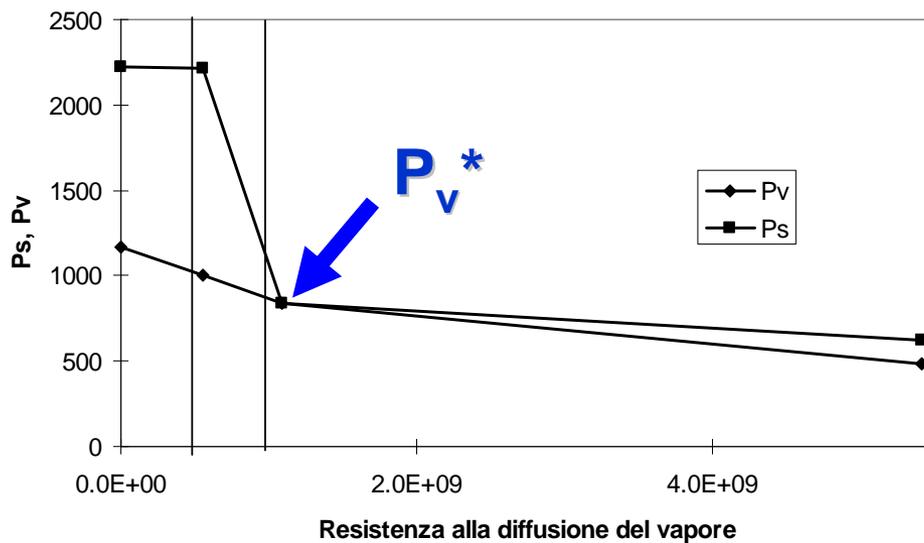
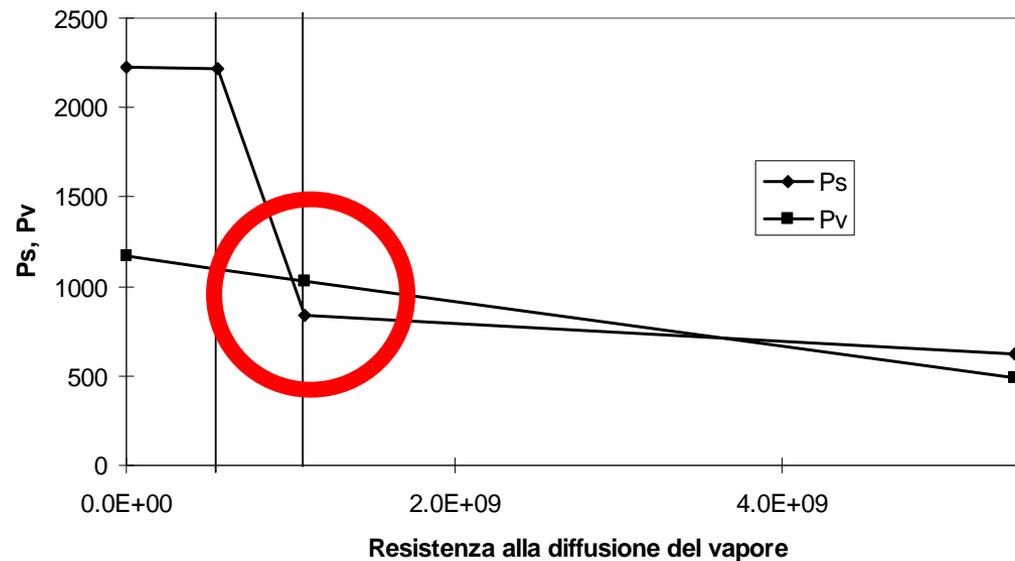
$$P_v \text{ e } P_s = f(z'_v)$$

andamento di P_s in ogni strato è per semplicità tracciato come lineare.



Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser



Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

da P_v^* : pendenze delle spezzate

portata di vapore che entra nella parete

$$g'_{vi} = (P_{vi} - P_v^*)/z'_v{}^*$$

$z'_v{}^*$ = resistenza al vapore fino all'interfaccia in cui si verifica condensazione.

portata di vapore che esce dalla parete

$$g'_{ve} = (P_v^* - P_{ve})/(z'_v - z'_v{}^*)$$

$(z'_v - z'_v{}^*)$ = resistenza che il vapore incontra tra l'interfaccia di condensazione e l'esterno

Condensazione interstiziale

Metodo di Glaser

$$g'_c = g'_{vi} - g'_{ve}$$

In questo caso

$$P_v^* = 840 \text{ Pa}$$

$$g'_{vi} = 3.03 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s m}^2$$

$$g'_{ve} = 0.81 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s m}^2$$

$$g'_c = g'_{vi} - g'_{ve} = 2.22 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s m}^2$$

periodo di condensazione = 30 giorni

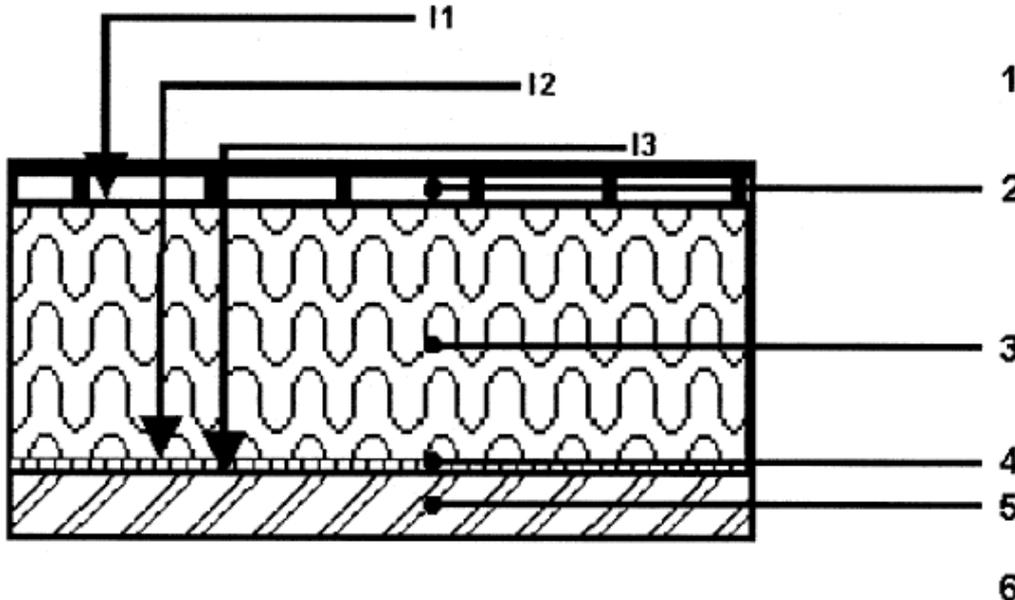
quantità di acqua condensata: $Q_{c(30gg)} = 575 \text{ g/m}^2$

(quantità superiore a quella ammissibile)

ESEMPIO DI CALCOLO DELLA CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

ESEMPIO DI CALCOLO DELLA CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

Componente edilizio con
condensazione in un piano di
interfaccia (tetto piano)



$I_1 - I_3$ piani di interfaccia

- 1.aria esterna
- 2.strato impermeabile
0,01 m
- 3.isolante 0,01 m
- 4.barriera al vapore
- 5.rivestimento di
finitura superficiale
0,012 m
- 6.aria interna

ESEMPIO DI CALCOLO DELLA CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

Condizioni
esterne e
interne

Mese	Interno		Esterno	
	θ_i °C	φ_i	θ_e °C	φ_e
Ottobre	20	0,57	10	0,83
Novembre	20	0,57	5	0,88
Dicembre	20	0,59	1	0,88
Gennaio	20	0,57	-1	0,85
Febbraio	20	0,58	0	0,84
Marzo	20	0,54	4	0,78
Aprile	20	0,51	9	0,72
Maggio	20	0,51	14	0,68
Giugno	20	0,50	18	0,69
Luglio	20	0,56	19	0,73
Agosto	20	0,52	19	0,75
Settembre	20	0,56	15	0,79

ESEMPIO DI CALCOLO DELLA CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

Proprietà dei materiali

	d m	R $m^2 \cdot K/W$	μ	S_d m
Resistenza esterna		0,04		
Strato impermeabile	0,010	0,05	500000	5000
Isolante	0,100	3	150	15
Barriera al vapore				1000
Finitura superficiale	0,012	0,075	10	0,12
Resistenza interna		0,13		

ESEMPIO DI CALCOLO DELLA CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

Si analizzano le tre interfacce corrispondenti alle intersezioni tra gli strati di materiale.

All'inizio dei calcoli si assume che la quantità di vapore accumulata M_a in tutte le tre interfacce sia nulla.

In Ottobre la pressione parziale del vapore supera quella di saturazione nell'interfaccia 1 di separazione tra l'isolante e lo strato impermeabile ed è quindi considerato quale mese di partenza per i calcoli

Attraverso la portata di vapore condensato, si calcola, moltiplicandola per il tempo corrispondente al mese, la massa di vapore per unità di superficie accumulata M_a

Il procedimento si ripete per ogni mese

Flusso specifico di vapore condensato mensilmente e quantità di condensa accumulata all'interfaccia 1

Da maggio la quantità di condensa diventa negativa: inizia il processo di evaporazione.

Da Agosto a Settembre la parete è asciutta

Mese	g_c kg/m ²	M_a kg/m ²
Ottobre	0,00288	0,00288
Novembre	0,01490	0,01778
Dicembre	0,02470	0,04248
Gennaio	0,02621	0,06869
Febbraio	0,02304	0,09173
Marzo	0,01499	0,10672
Aprile	0,00068	0,10740
Maggio	-0,01504	0,09236
Giugno	-0,03097	0,06139
Luglio	-0,03164	0,02975
Agosto	-0,03494	0
Settembre	0	0

Flusso specifico di vapore condensato mensilmente e quantità di condensa accumulata all'interfaccia 1

Da maggio la quantità di condensa diventa negativa: inizia il processo di evaporazione.

Da Agosto a Settembre la parete è asciutta



Mese	g_c kg/m ²	M_a kg/m ²
Ottobre	0,00288	0,00288
Novembre	0,01490	0,01778
Dicembre	0,02470	0,04248
Gennaio	0,02621	0,06869
Febbraio	0,02304	0,09173
Marzo	0,01499	0,10672
Aprile	0,00068	0,10740
Maggio	-0,01504	0,09236
Giugno	-0,03097	0,06139
Luglio	-0,03164	0,02975
Agosto	-0,03494	0
Settembre	0	0

Contenuto massimo ammissibile in diversi materiali

Materiale	Densità [kg/m³]	Q_{amm} [g/m²]
Laterizi	600-2000	≤ 500
Calcestruzzi	400-2400	≤ 500
Legnami e derivati	500-800	≤ 30 ρ d
Intonaci e malte	600-2000	≤ 30 ρ d
Fibre di natura organica: con collanti resistenti all'acqua con collanti non resistenti all'acqua	300-700 300-700	≤ 20 ρ d ≤ 5 ρ d
Fibre minerali	10-150	≤ 5000 ρ d [λ / (1-1.7λ)]
Materie plastiche cellulari	10-80	≤ 5000 ρ d [λ / (1-1.7λ)]

d in [m] e ρ in [kg/m³]

EFFICIENZA ENERGETICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Accumulo termico

**Sfasamento,
smorzamento,
risposta dinamica degli edifici**

METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

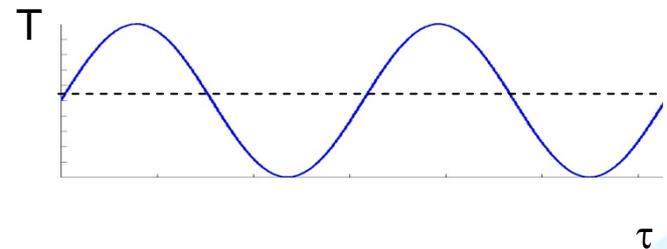
Analisi in **REGIME STAZIONARIO**:

- analisi semplificate effettuate in condizioni statiche di temperatura interna ed esterna;
- valutazione della prestazione termica dell'involucro in termini di **trasmissione U**.

METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

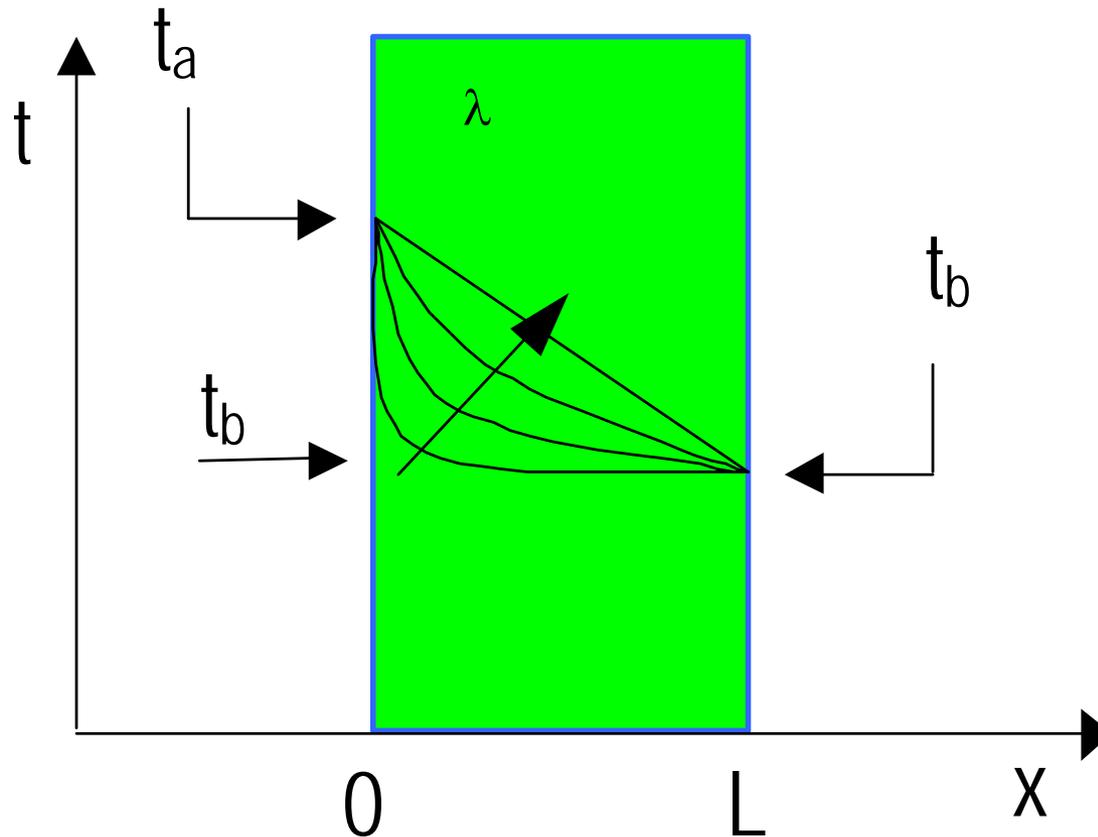
Analisi in **REGIME VARIABILE (DINAMICO)**:

- analisi che richiedono l'inserimento dei dati climatici, per una certa località, su base oraria;
- temperatura non più costante nel tempo ma soggetta ad una variazione periodica che per semplicità si assume di tipo sinusoidale;

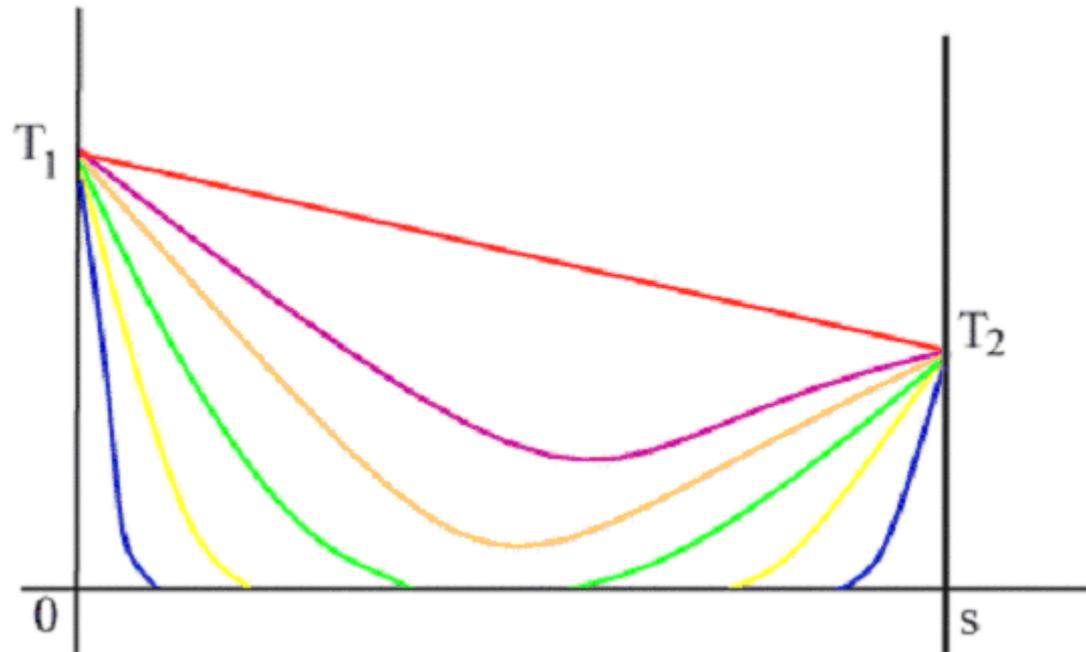


REGIME VARIABILE

distribuzione di temperatura per una variazione istantanea da t_a a t_b



TRANSITORIO DI TEMPERATURA ALL'INTERNO DI UNA PARETE



METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Analisi in **REGIME VARIABILE (DINAMICO)**:

- caratteristiche dell'involucro edilizio da considerare:
capacità termica o di accumulo del calore,
densità, calore specifico, diffusività;

- valutazione della prestazione dell'involucro in termini di
smorzamento e sfasamento dell'onda termica.

CAPACITA' TERMICA

Capacità termica specifica o di accumulo del calore C
unità di misura $J/ kg K$

rappresenta la capacità che ha un materiale di accumulare calore: indica la quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura di una massa di 1kg di materiale di 1 grado Kelvin.

Più alto è il valore C , maggiore è la capacità del materiale di accumulare calore e quindi maggiore è l'inerzia termica.

UNI-TS 11300-1:2008

Capacità termica areica

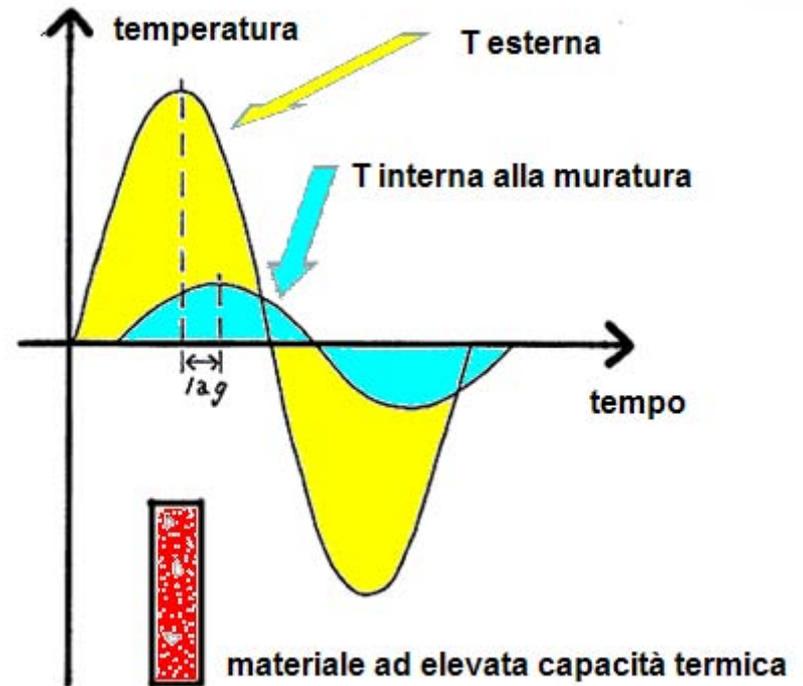
Caratteristiche costruttive dei componenti edilizi				Numero di piani		
Intonaci	Isolamento	Pareti esterne	Pavimenti	1	2	≥3
				Capacità termica areica [kJ/(m ² ·K)]		
gesso	interno	qualsiasi	tessile	75	75	85
	interno	qualsiasi	legno	85	95	105
	interno	qualsiasi	piastrelle	95	105	115
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	95	95	95
	assente/esterno	medie/pesanti	tessile	105	95	95
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	115	115	115
	assente/esterno	medie/pesanti	legno	115	125	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	115	125	135
	assente/esterno	medie/pesanti	piastrelle	125	135	135
malta	interno	qualsiasi	tessile	105	105	105
	interno	qualsiasi	legno	115	125	135
	interno	qualsiasi	piastrelle	125	135	135
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	125	125	115
	assente/esterno	medie	tessile	135	135	125
	assente/esterno	pesanti	tessile	145	135	125
	assente/esterno	pesanti	tessile	145	135	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	145	145	145
	assente/esterno	medie	legno	155	155	155
	assente/esterno	pesanti	legno	165	165	165
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	145	155	155
	assente/esterno	medie	piastrelle	155	165	165
	assente/esterno	pesanti	piastrelle	165	165	165

CAPACITA' TERMICA

Si riferisce alla capacità dei materiali di accumulare energia termica per lunghi periodi di tempo



Può essere utilizzata per assorbire calore di giorno (estate), riducendo la necessità di raffrescamento, e per rilasciarlo di notte



MATERIALI PER L'ACCUMULO TERMICO

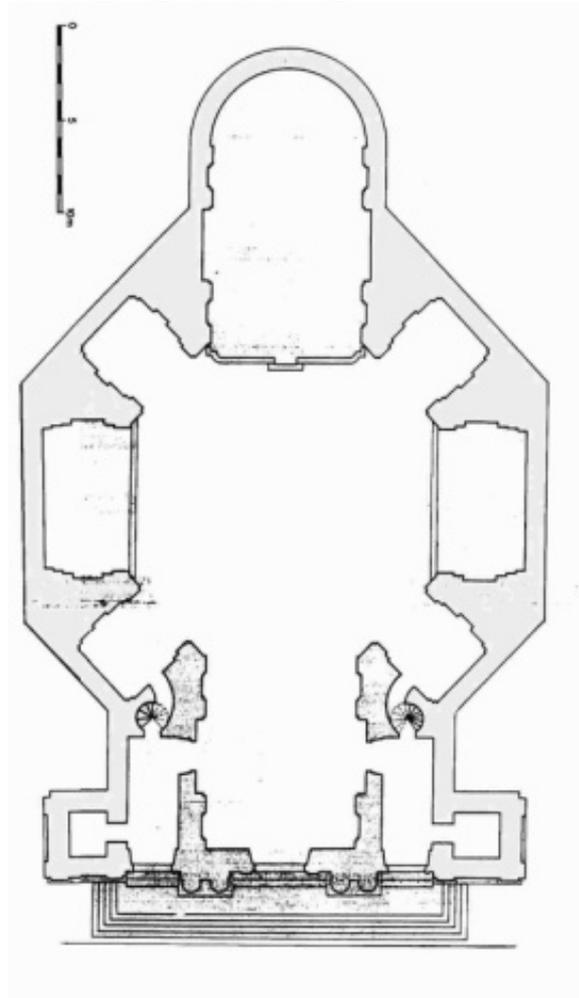
Acqua, pietra, terra, mattone, calcestruzzo, etc...

Materiali a passaggio di fase (PCM) possono accumulare 5-15 volte più calore per unità di volume dei materiali tradizionali



1.2-1 Storage rooms, temple of Ramses II, Gournah, Egypt

APPLICAZIONI NEL PASSATO



PROPRIETÀ TERMOFISICHE DEI MATERIALI

Densità, calore specifico, conduttività

Calore specifico dei materiali edilizi: circa 0.2-0.25 Wh/kg K

La capacità totale di accumulo dipende dalla massa complessiva della struttura dipendendo poco dalla sua tipologia (mattone-calcestruzzo, pietra, etc)

<u>Materiale</u>	<u>Densità (kg/m³)</u>
Calcestruzzo	600-2200
Pietra	1900-2500
Laterizio	1500-1900



DIFFUSIVITÀ TERMICA

La diffusività fornisce un'indicazione sulla rapidità di trasmissione del calore attraverso il materiale

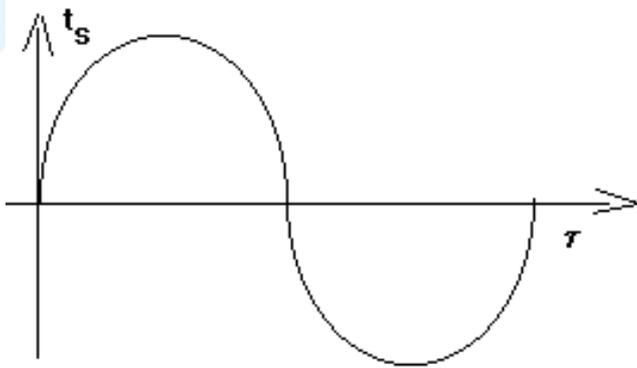
Il tempo che intercorre tra un picco di temperatura esterno ed interno dipende dalle spessore del materiale diviso la radice quadrata della diffusività

Diffusività termica

$$a = \lambda / \rho c$$

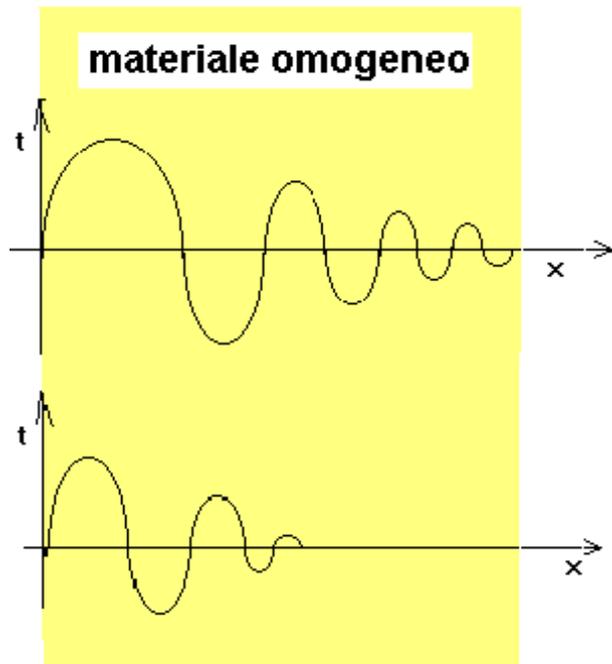
(ρc) calore specifico volumetrico
(per unità di volume) [J/m³K]

DIFFUSIVITA' TERMICA



DIFFUSIVITA' ELEVATA

perturbazione termica poco ridotta in ampiezza,
(poco smorzata)
avvertibile a notevole distanza dalla superficie

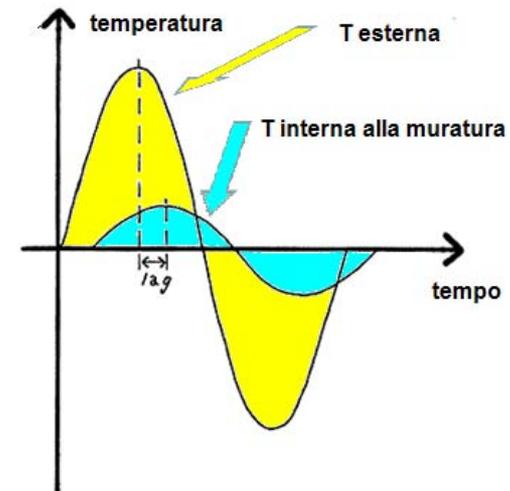


qualitativamente:

perturbazione di temperatura penetra più facilmente in un materiale leggero che non in uno pesante.

VANTAGGI DELLO SFRUTTAMENTO DEL CALORE IN TEMPI SFASATI

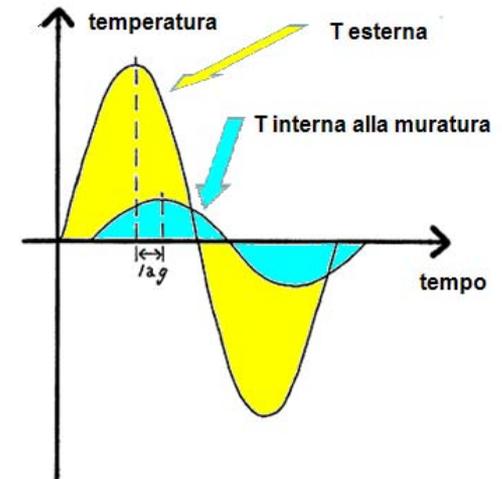
PERIODO INVERNALE: di giorno l'impianto termico riscalda l'aria dell'ambiente ed i muri, durante la notte, ad impianto spento, le pareti restituiscono l'energia accumulata durante il giorno. L'inerzia termica dell'involucro abbinata al regime intermittente dell'impianto garantisce così un risparmio energetico effettivamente riscontrabile.



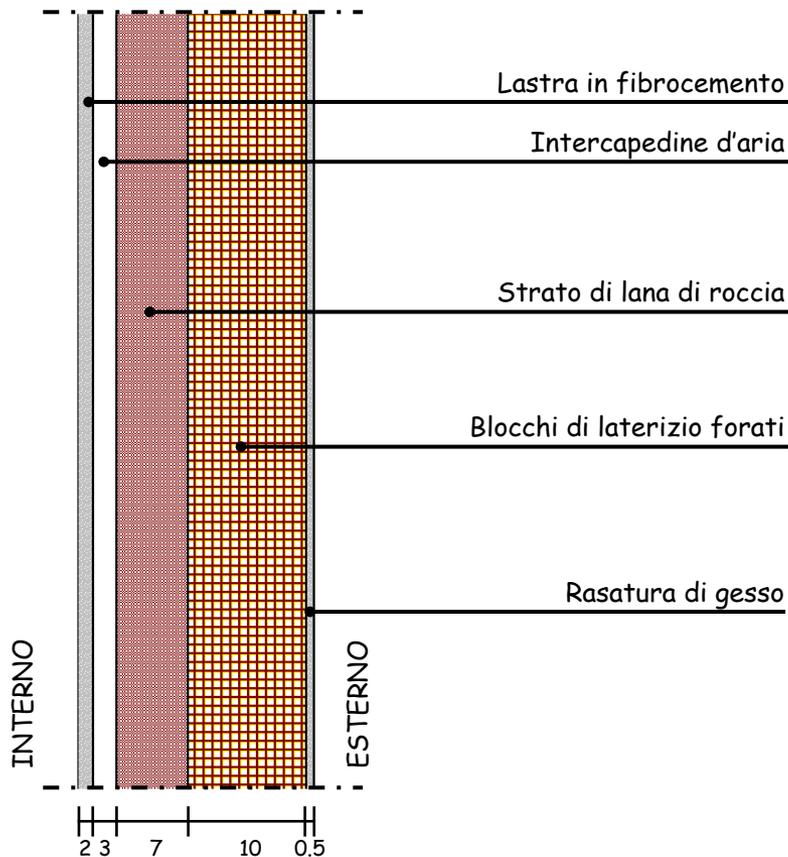
VANTAGGI DELLO SFRUTTAMENTO DEL CALORE IN TEMPI SFASATI

PERIODO ESTIVO: di giorno le pareti accumulano calore per effetto dell'irraggiamento solare, successivamente iniziano a trasferire calore verso l'interno. Se lo sfasamento temporale è superiore alle 10-12 ore, il momento in cui il calore viene restituito avviene alla sera o di notte quando la temperatura esterna si abbassa.

IMPORTANZA DEL POSIZIONAMENTO DELL'ISOLANTE A SECONDA DELLA DESTINAZIONE D'USO DEGLI EDIFICI



METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

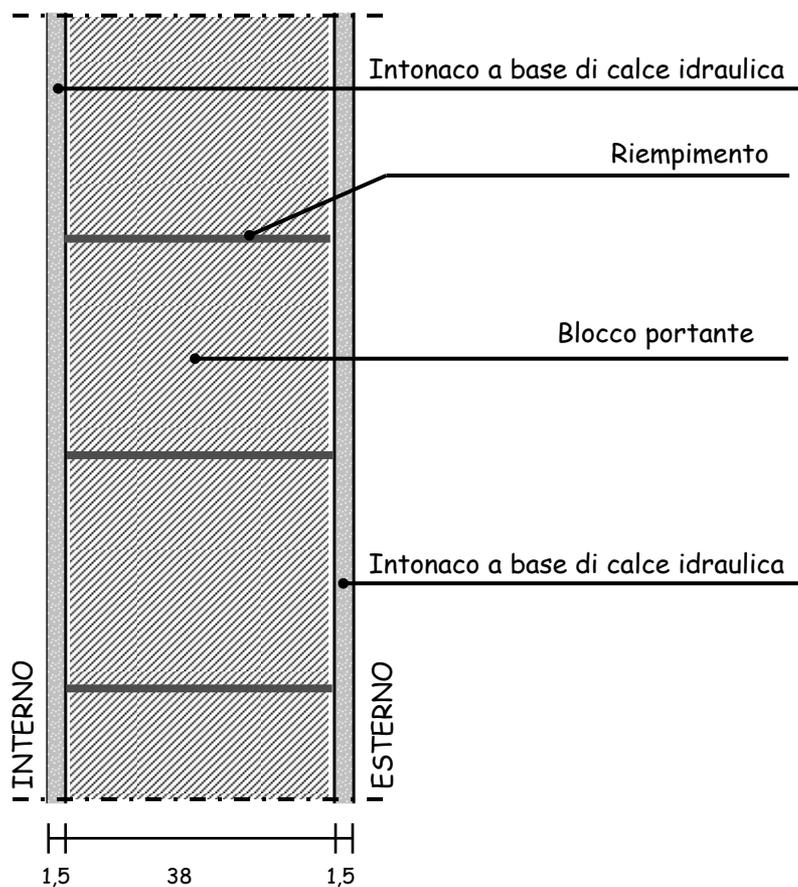


Spessore complessivo	22.5 cm
Trasmittanza	0,29 W/(m ² K)
Massa frontale	99 kg/m ²
Fattore di decremento (smorzamento)	0,75
Ritardo del fattore di smorzamento (sfasamento)	4,76 h

METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Nel caso di pareti perimetrali in cui la **massa** dell'involucro è stata volutamente scelta molto **contenuta**,
il **fabbisogno energetico** calcolato dai vari strumenti (regime **stazionario e transitorio**) risulta abbastanza **omogeneo**:
assumere la **trasmissione termica** come **unico parametro** caratteristico delle murature può essere, in tale circostanza, un'approssimazione accettabile.

METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO



Spessore complessivo	41	cm
Trasmittanza	0,37	W/(m ² K)
Massa frontale	405	kg/m ²
Fattore di decremento (smorzamento)	0,05	
Ritardo del fattore di smorzamento (sfasamento)	19,02	h

METODI DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Nel caso di strutture in **muratura pesante**, invece, sorge un divario profondo:

il **modello dinamico** può arrivare a stimare un fabbisogno energetico per riscaldamento fino al **30% inferiore rispetto alle analisi in regime stazionario**.

La riduzione dei fabbisogni energetici determinata dallo smorzamento dei picchi di freddo acquisisce in questo caso un peso assai rilevante, che solo la simulazione in regime dinamico mette in luce.

PROCEDURE PER IL CALCOLO DELLO SFASAMENTO DELL'ONDA TERMICA

IPOSTESI DI REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

NORMA TECNICA UNI EN ISO 13786:2008

“Prestazione termica dei componenti per l'edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche – Metodi di calcolo”

PROGRAMMI DI CALCOLO A DISCRETIZZAZIONE ORARIA

PROGRAMMI DEDICATI

ALLEGATO I: comma 11 del DLgs 311

Limitazione del fabbisogno estivo

- Negli edifici di nuova costruzione e oggetto di ristrutturazione di categoria E1, E2, E3, E4, E7 (*esclusi capannoni e*):
 - devono essere presenti schermi per le superfici vetrate. Gli schermi possono essere fissi o mobili, interni o esterni e devono essere efficaci.
 - In zona climatica A,B,C,D, in località con $I_{m,s}$ del mese più soleggiato $>290 \text{ W/m}^2$, la massa superficiale delle pareti opache (verticali e orizzontali) deve essere $>230 \text{ kg/m}^2$
- Oppure dimostrare che l'impiego di particolari materiali e tecnologie consente di ottenere lo stesso effetto di sfasamento e smorzamento ottenibile con la massa.

Province	Z	GG	S.P.	H	θ e	Verifica
Reggio di Calabria	B	772	RC	15	3	SI
Crotone	B	899	KR	8	0	SI
Palermo	B	751	PA	14	5	SI
Agrigento	B	729	AG	230	3	SI
Catania	B	833	CT	7	5	SI
Messina	B	707	ME	3	5	SI
Siracusa	B	799	SR	17	5	SI
Trapani	B	810	TP	3	5	SI
Ogliastra (Tortoli)	B	744	OG	13	1,7	SI
Imperia	C	1201	IM	10	0	SI
Latina	C	1220	LT	21	2	SI
Napoli	C	1034	NA	17	2	SI
Benevento	C	1316	BN	135	-2	SI
Caserta	C	1013	CE	68	0	SI
Salerno	C	994	SA	4	2	NO
Catanzaro	C	1328	CZ	320	-2	SI
Cosenza	C	1317	CS	238	-3	SI
Bari	C	1185	BA	5	0	SI
Brindisi	C	1083	BR	15	0	SI
Lecce	C	1153	LE	49	0	SI
Taranto	C	1071	TA	15	0	SI
Ragusa	C	1324	RG	502	0	SI
Cagliari	C	990	CA	4	3	SI
Carbonia-Iglesias (Carbonia)	C	922	CI	111	3	SI
Medio-Campidano (Sanluri)	C	1267	VS	135	3	SI
Olbia-Tempio (Olbia)	C	1442	OT	15	1,7	SI
Oristano	C	1059	OR	9	3	SI
Sassari	C	1185	SS	225	2	SI

Province	Z	GG	S.P.	H	θ e	Verifica
Vibo Valentia	D	1586	VV	476	-3	SI
Matera	D	1776	MT	401	-2	SI
Foggia	D	1530	FG	76	0	SI
Caltanissetta	D	1550	CL	568	0	SI
Nuoro	D	1602	NU	546	0	SI
Aosta	E	2850	AO	583	-10	NO
Torino	E	2617	TO	239	-8	NO
Alessandria	E	2559	AL	95	-8	NO
Asti	E	2617	AT	123	-8	NO
Biella	E	2589	BI	420	-9	NO
Novara	E	2463	NO	159	-5	NO
Verbano-Cusio-Ossola	E	2426	VB	197	-5	NO
Vercelli	E	2751	VC	130	-7	NO
Milano	E	2404	MI	122	-5	NO
Bergamo	E	2533	BG	249	-5	NO
Brescia	E	2410	BS	149	-7	NO
Como	E	2228	CO	201	-5	NO
Cremona	E	2389	CR	45	-5	NO
Lecco	E	2383	LC	214	-5	NO
Lodi	E	2592	LO	87	-5	NO
Mantova	E	2388	MN	19	-5	NO
Pavia	E	2623	PV	77	-5	NO
Sondrio	E	2755	SO	307	-10	NO
Varese	E	2652	VA	382	-5	NO
Trento	E	2567	TN	194	-12	NO
Bolzano	E	2791	BZ	262	-15	NO
Venezia	E	2345	VE	1	-5	SI
Padova	E	2383	PD	12	-5	NO

Provincie	Z	GG	S.P.	H	θ e	Verifica
Verona	D	2468	VR	59	-5	NO
Genova	D	1435	GE	19	0	NO
La Spezia	D	1413	SP	3	0	SI
Savona	D	1481	SV	4	0	NO
Forli	D	2087	FO	34	-5	SI
Firenze	D	1821	FI	50	0	SI
Grosseto	D	1550	GR	10	0	SI
Livorno	D	1408	LI	3	0	SI
Lucca	D	1715	LU	19	0	NO
Massa (Carrara)	D	1525	MS	65	0	SI
Pisa	D	1694	PI	4	0	SI
Pistoia	D	1885	PT	67	0	NO
Prato	D	1668	PO	61	0	NO
Siena	D	1943	SI	322	-2	NO
Ancona	D	1688	AN	16	-2	SI
Ascoli Piceno	D	1698	AP	154	-2	SI
Macerata	D	2005	MC	315	-2	SI
Pesaro Urbino (Pesaro)	D	2083	PS	11	-2	SI
Terni	D	1650	TR	130	-2	NO
Roma	D	1415	RM	20	0	SI
Viterbo	D	1989	VT	326	-2	NO
Chieti	D	1556	CH	330	0	SI
Pescara	D	1718	PE	4	2	SI
Teramo	D	1834	TE	265	0	SI
Isernia	D	1866	IS	423	-2	SI
Avellino	D	1742	AV	348	-2	SI

Provincie	Z	GG	S.P.	H	θ e	Verifica
Rovigo	E	2466	RO	7	-5	SI
Treviso	E	2378	TV	15	-5	NO
Vicenza	E	2371	VI	39	-5	NO
Trieste	E	2102	TS	2	-5	NO
Gorizia	E	2333	GO	84	-5	NO
Pordenone	E	2459	PN	24	-5	NO
Udine	E	2323	UD	113	-5	NO
Bologna	E	2259	BO	54	-5	SI
Ferrara	E	2326	FE	9	-5	NO
Modena	E	2258	MO	34	-5	NO
Parma	E	2502	PR	57	-5	SI
Piacenza	E	2715	PC	61	-5	SI
Ravenna	E	2227	RA	4	-5	SI
Reggio nell'Emilia	E	2560	RE	58	-5	SI
Rimini	E	2139	RN	5	-5	SI
Arezzo	E	2104	AR	246	0	NO
Perugia	E	2289	PG	493	-2	SI
Rieti	E	2324	RI	405	-3	NO
Frosinone	E	2196	FR	291	0	SI
L'Aquila	E	2514	AQ	714	-5	NO
Campobasso	E	2346	CB	701	-4	SI
Potenza	E	2472	PZ	819	-3	SI
Enna	E	2248	EN	931	-3	SI
Cuneo	F	3012	CN	534	-10	NO
Belluno	F	3043	BL	383	-10	NO

UNI EN ISO 13786:2008 - Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche

Metodi di calcolo

La norma definisce metodi per il calcolo del comportamento termico in regime dinamico di componenti edilizi completi.

Essa specifica quali siano le informazioni sul componente edilizio necessarie per il calcolo.

Nelle appendici sono forniti metodi semplificati per la stima delle capacità termiche, informazioni per informatizzare il metodo di calcolo, un esempio di calcolo per un componente edilizio.

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

Problema: determinazione della distribuzione di temperatura in un solido seminfinito quando la sua temperatura superficiale varia periodicamente: ovvero trovare come varia $T(x,t)$ essendo noto $T(0,t)$.

Quando si parla di regime termico stabilizzato?

Quando la variazione di temperatura è imposta per un intervallo di tempo sufficientemente grande cosicché i cicli successivi in ogni punto del mezzo sono tra loro identici.

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

Esempi di condizioni termiche riconducibili a questa classe di problemi:

- terra esposta alla radiazione solare;
- variazione di temperatura della parete di un cilindro di un motore a combustione interna;
- variazione giornaliera di temperatura di un edificio.

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

Si assume che la variazione di temperatura superficiale per $x=0$ (superficie esterna della parete) sia sinusoidale ed esprimibile con la seguente espressione:

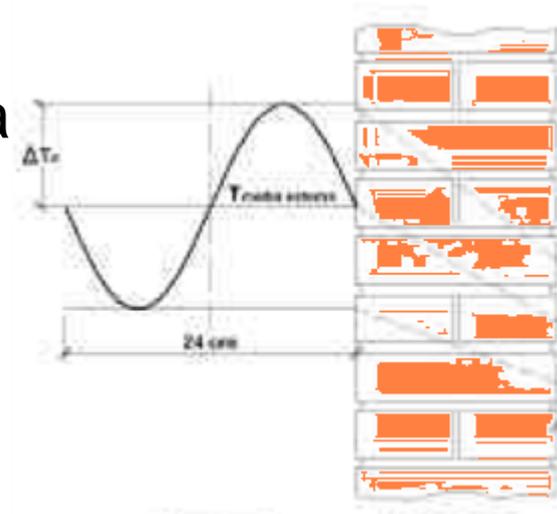
$$T(0,t) = T_0 + \Delta T \sin \omega t$$

dove :

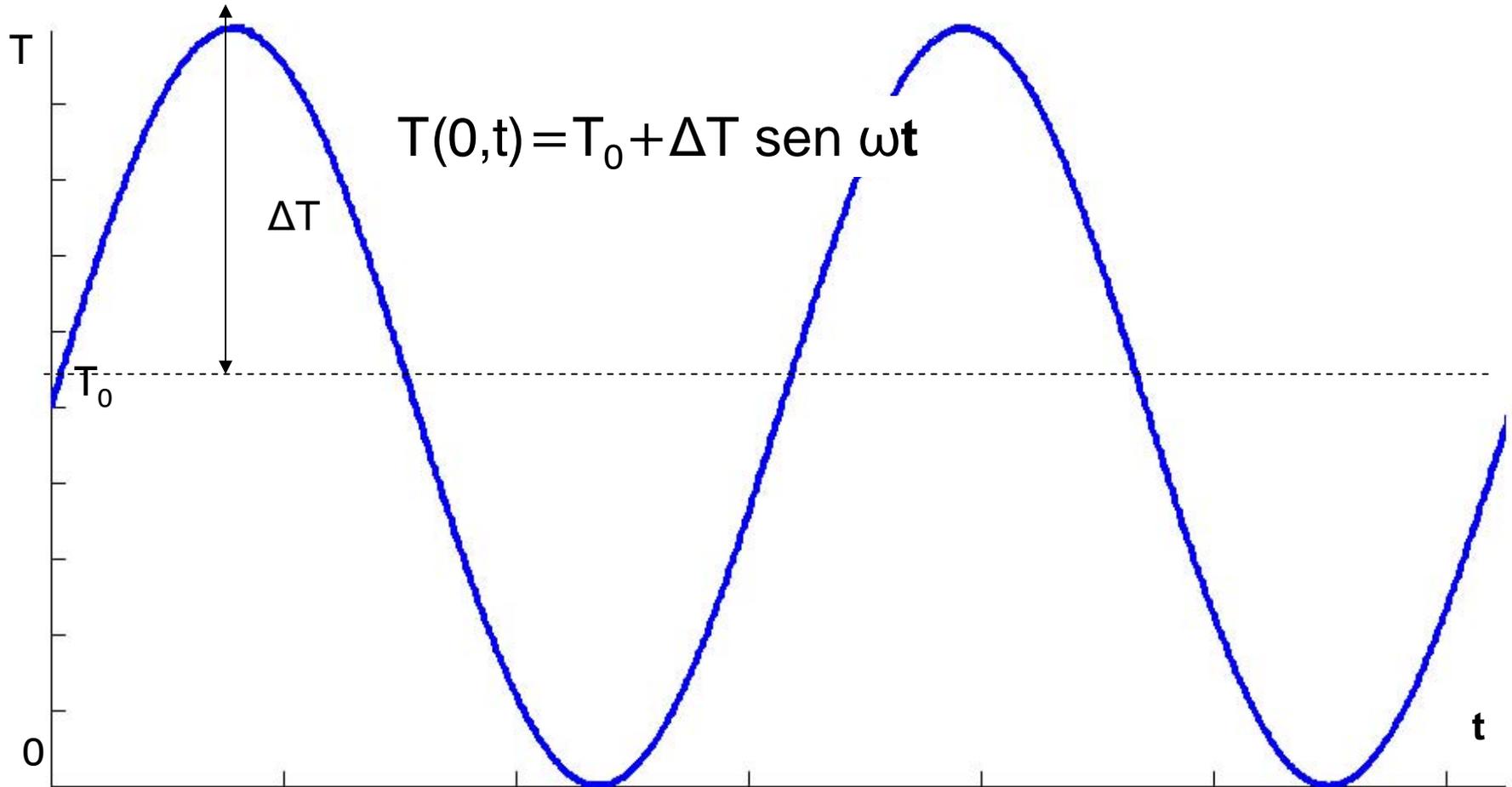
$\omega = 2\pi / t$ è la pulsazione del fenomeno oscillatorio di periodo t

T_0 è il valore medio della temperatura

ΔT è l'ampiezza di variazione della temperatura



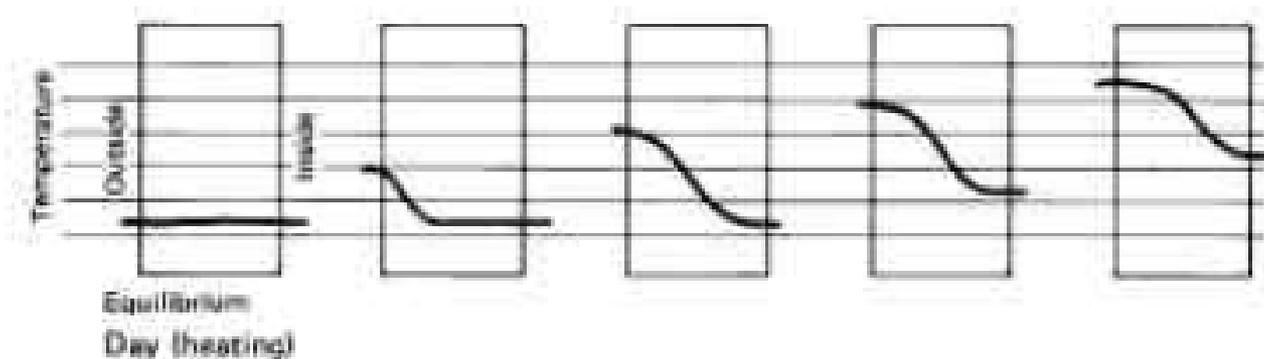
REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO



REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

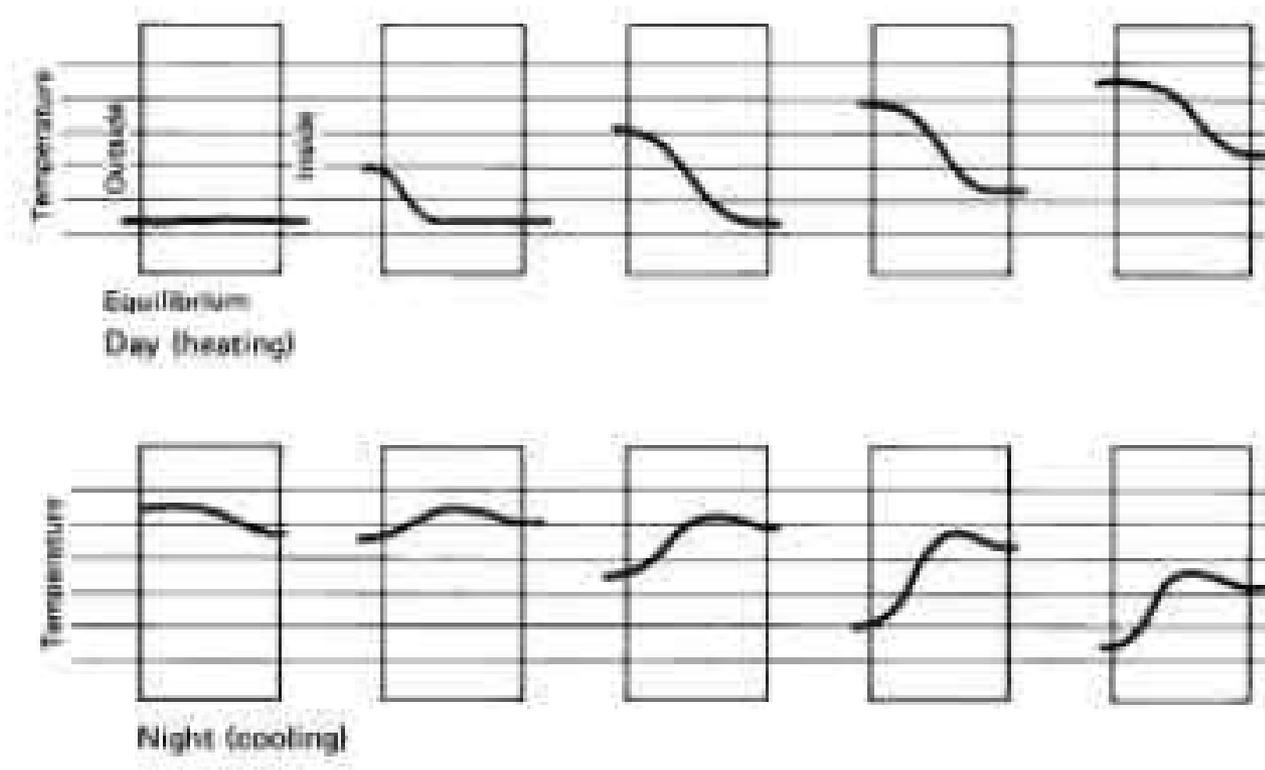
Se si considera una superficie piana di ascissa x , parallela a quella esterna, è possibile trovare come varia la temperatura in funzione del tempo e della posizione in ogni punto di essa: ovvero come varia $T(x,t)$ essendo noto $T(0,t)$.

Si suppone che tutti i punti della suddetta superficie abbiano la stessa temperatura allo stesso istante.



REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

La perturbazione non rimane localizzata sulla faccia esterna della parete ma si propaga nel mezzo



REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

Introducendo la variabile $\theta = T - T_0$ la condizione al contorno imposta precedentemente assume la seguente forma:

$$\theta(0,t) = \Delta T \text{ sen } \omega t$$

Assumendo **costanti le proprietà termofisiche del mezzo** la variabile θ dovrà soddisfare l'equazione della conduzione (monodimensionale, equazione differenziale di Fourier) :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$$

diffusività termica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

legata alla velocità di propagazione dell'onda termica dalla relazione:

$$v = \sqrt{2\alpha\omega}$$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

Per la risoluzione del problema si usa il metodo della temperatura complessa:

si associa alla grandezza θ , una funzione periodica, della stessa ampiezza e periodo, ma sfasata di $\pi/2$:

$$\bar{\theta} = \Delta T_0 \cos \omega \tau$$

Definita la temperatura complessa nella forma :

$$\vartheta_c(x, \tau) = \bar{\theta}(x, \tau) + i \theta(x, \tau) \quad \text{dove} \quad i = \sqrt{-1}$$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

si dimostra che essa soddisfa la seguente equazione differenziale e la relativa condizione al contorno:

$$\frac{\partial^2 \vartheta_c}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \vartheta_c}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\vartheta_c(0, \tau) = \Delta T_0 [\cos \omega \tau + i \operatorname{sen} \omega \tau] = \Delta T_0 e^{i\omega \tau} \quad (2)$$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

Il metodo della separazione delle variabili applicato alla

$$\frac{\partial^2 \vartheta_c}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \vartheta_c}{\partial \tau}$$

porta ad una soluzione del tipo:

$$\vartheta_c(x, \tau) = X(x)e^{i\omega\tau} \quad (3)$$

Sostituendo la (3) nella (2) e nella (1) si ottiene:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{i\omega X}{\alpha} = 0$$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

la cui soluzione è del tipo:

$$X(x) = A_1 e^{-(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} + A_2 e^{(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x}$$

Poiché per $x \rightarrow \infty$ la temperatura deve rimanere finita, A_2 deve essere nullo

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

La precedente espressione si presenta così nella forma:

$$X(x) = A_1 e^{-(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \quad (4)$$

Sostituendo la (4) nella (3) si ottiene:

$$\vartheta_c(x, \tau) = A_1 e^{-(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} e^{i\omega\tau}$$

ovvero:

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

$$\vartheta_c(x, \tau) = A_1 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \left[\cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x\right) + i \operatorname{sen}\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x\right) \right] \quad (5)$$

Dal confronto tra la (5) e la

$$\vartheta_c(x, \tau) = \bar{\theta}(x, \tau) + i\theta(x, \tau)$$

si ricava:

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

$$\theta(x, \tau) = A_1 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \operatorname{sen}\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x\right) \quad (6)$$

La condizione al contorno

$$\theta(0, \tau) = \Delta T_0 \operatorname{sen} \omega\tau$$

fornisce $A_1 = \Delta T_0$ per cui la (6) diventa:

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

$$\theta(x, \tau) = \Delta T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \operatorname{sen}\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x\right)$$

La variazione di temperatura ad una certa distanza dalla superficie ha lo stesso periodo della variazione imposta sulla superficie ma ampiezza che decresce esponenzialmente con la distanza

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

L'ampiezza risulta infatti rappresentata dal termine:

$$\Delta T_x = \Delta T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x}$$

dove: $e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x}$ è il fattore di smorzamento

$\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$ è la costante di smorzamento

Lo sfasamento temporale è dato da: $\Delta\tau = \frac{x}{2} \left(\frac{2}{\omega\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

ESEMPIO DI CALCOLO:

Stratigrafia della parete	spessore (m)	λ (W/mK)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	α (m ² /h)	R (m ² K/W)
mattoni	0,6	0,7	794,96	1800	0,00176	0,857

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_0} = \frac{6,28}{24} = 0,2617 \quad \left[\frac{1}{h} \right] \quad \text{pulsazione del fenomeno oscillatorio}$$

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

sfasamento dell'onda termica sulla superficie interna ($x = 0,6$ m):

$$\Delta\tau = \frac{x}{2} \left(\frac{2}{\omega\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{0,6}{2} \left(\frac{2}{0,2617 * 0,00176} \right)^{\frac{1}{2}} = 19,764 \quad [h]$$

VERIFICA:

Lo stesso risultato si può ottenere calcolando la velocità di propagazione dell'onda termica nella parete considerata, ricavabile con l'espressione:

REGIME PERIODICO STABILIZZATO IN UN MEZZO OMOGENEO SEMINFINITO

$$v = \sqrt{2\alpha\omega} = \sqrt{2 * 0,00176 * 0,2617} \cong 0,03 \quad \left[\frac{m}{h} \right]$$

Conoscendo lo spessore della compagine muraria e la velocità è possibile trovare il tempo impiegato dall'onda termica per attraversare tale spessore che risulta essere circa 20 ore:

$$\Delta T = \frac{\text{spessore}}{\text{velocità}} \cong \frac{0,6}{0,03} = 20 \quad [h]$$

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

La normativa individua la seguente procedura per il calcolo delle caratteristiche termiche dinamiche di una parete:

- identificare i materiali costituenti gli strati del componente edilizio, il loro spessore e le loro caratteristiche termiche;
- specificare il periodo delle variazioni in corrispondenza delle superfici

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

- calcolare la profondità di penetrazione per il materiale di ogni strato;
- determinare gli elementi della matrice di trasferimento per ciascuno strato;
- moltiplicare le matrici di trasferimento di ogni strato, escludendo quelle degli strati periferici, nell'ordine corretto per ottenere la matrice trasferimento del componente.

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

Il periodo delle variazioni termiche è assunto pari a 24 ore, la profondità di penetrazione periodica viene calcolata mediante la seguente espressione:

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

rappresenta la profondità alla quale l'ampiezza delle variazioni di temperatura è ridotta di un fattore e (base dei logaritmi naturali)

Il rapporto tra lo spessore dello strato e la profondità di penetrazione viene così indicato:

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

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

La matrice di trasferimento termico deve essere calcolata per poter mettere in relazione le ampiezze complesse della temperatura e del flusso termico su un lato di un componente con le ampiezze complesse della temperatura e del flusso termico sull'altro lato:

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

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

Gli elementi della matrice vengono calcolati come segue:

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

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

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

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

$|Z_{mn}|$

Gli elementi della matrice di trasferimento termico hanno la seguente interpretazione fisica: ogni elemento è un numero complesso che può essere rappresentato dal proprio modulo e dal proprio argomento

$$\varphi_{mn} = \arg(Z_{mn})$$

$|Z_{11}|$

è un fattore di ampiezza di temperatura, ovvero l'ampiezza delle variazioni di temperatura sul lato 2 come effetto di una variazione di temperatura di ampiezza 1 K sul lato 1.

φ_{11}

è la differenza di fase tra le temperature su ciascun lato del componente.

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

$$|Z_{21}|$$

fornisce l'ampiezza della densità del flusso termico attraverso il lato 2 come effetto di una variazione periodica della temperatura sul lato 1 con un'ampiezza di 1 K.

$$\varphi_{12}$$

è la differenza di fase tra la densità di flusso termico attraverso il lato 2 e la temperatura sul lato 1.

$$|Z_{12}|$$

fornisce l'ampiezza della temperatura sul lato 2 quando il lato 1 è soggetto a una variazione periodica di densità di flusso termico con un'ampiezza di 1 W/m².

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

φ_{12} è la differenza di fase tra la temperatura sul lato 2 e la densità di flusso attraverso il lato 1.

$|Z_{22}|$ è il fattore di ampiezza di flusso termico, ovvero l'ampiezza delle variazioni della densità di flusso termico attraverso il lato 2 come effetto di una variazione di densità di flusso termico con ampiezza di 1 W/m^2 attraverso il lato 1.

φ_{22} è la differenza di fase tra le densità di flusso termico attraverso ciascun lato del componente.

La norma stabilisce che, per componenti dell'involucro edilizio, il lato 1 deve essere il più interno.

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

Nel caso di componente con strato singolo è sufficiente calcolare l'elemento della matrice Z_{11} :

infatti i ritardi temporali tra il massimo di un effetto e il massimo della causa corrispondente possono essere calcolati dalla variazione di fase dell'elemento della matrice di trasferimento Z_{11}



$$\Delta t_{11} = \frac{T}{2\pi} \varphi_{11} = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{11})$$

Sfasamento temporale [h]
Sfasamento angolare [rad]

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

Nel caso di **componente multistrato** la matrice del componente edilizio da superficie a superficie assume la seguente forma:

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

dove Z_i sono le matrici di trasferimento dei vari strati del componente edilizio, a cominciare dallo strato 1 (quello più interno).

L'inverso della matrice Z , ovvero (Z'), rappresenta la matrice di trasferimento del componente invertito e deve essere fornito per quei componenti dell'involucro edilizio che potrebbero essere installati con uno o l'altro lato in corrispondenza dell'ambiente esterno.

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

ESEMPIO DI CALCOLO

Calcolo del valore della profondità di penetrazione :

IL PERIODO VA INSERITO IN SECONDI

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}} = \sqrt{\frac{0,7 * 24 * 3600}{3,14 * 1800 * 794,96}} = 0,116$$

Il rapporto ξ risulta quindi pari a:

$$\xi = \frac{d}{\delta} = \frac{0,6}{0,116} = 5,171$$

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

ESEMPIO DI CALCOLO

Nel caso specifico della muratura presa in esame la notazione complessa di Z_{11} risulta:

$$Z_{11} = 39,04 - 78,97j$$

$$\arg(Z_{11}) = \operatorname{arctg}\left(\frac{b}{a}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{-78,97}{39,04}\right) = -1,112$$

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

Lo sfasamento temporale risulterà:

$$\Delta t_{ij} = \frac{T}{2\pi} \varphi_{ij} = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{ij}) = \frac{24}{6,28} * (-1,112) \cong -4,25$$

Quindi la sinusoide che esprime l'effetto risulta in anticipo rispetto a quella che esprime la causa di circa quattro ore.

In pratica l'effetto sarà in ritardo di

$$24 \text{ h} - 4,25 \text{ h} \cong 19,75$$

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

ESEMPIO DI CALCOLO

Stratigrafia parete	spessore (m)	λ (W/mK)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
calcestruzzo	0,2	1,8	1000	2400

Ipotesi: non si considerano le resistenze superficiali interna ed esterna

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}} = 0,144 \text{ m} \quad Z_{11} = 0,379 + 1,86 \text{ j} \quad Z_{12} = -0,097 - 0,071 \text{ j}$$

$$\xi = \frac{d}{\delta} = 1,393 \quad Z_{21} = 22,16 - 30,55 \text{ j} \quad Z_{22} = -0,379 + 1,858 \text{ j}$$

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

La matrice di trasferimento da ambiente ad ambiente attraverso il componente edilizio deve tener conto anche delle matrici di trasferimento degli strati periferici, quindi:

$$Z_{ee} = Z_{s2} Z Z_{s1}$$

dove Z_{s2} e Z_{s1} rappresentano le matrici di trasferimento degli strati periferici, fornite da:

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

R_s rappresenta la resistenza superficiale dello strato periferico comprendente gli effetti di convezione e irraggiamento

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

$$\begin{pmatrix} 1 & -R_{s2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -R_{s1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} Z_{11} - R_{s2}Z_{21} & Z_{12} - R_{s2}Z_{22} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -R_{s1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} Z_{11} - R_{s2}Z_{21} & (Z_{11} - R_{s2}Z_{21})(-R_{s1}) + Z_{12} - R_{s2}Z_{22} \\ Z_{21} & Z_{21}(-R_{s1}) + Z_{22} \end{pmatrix}$$

CALCOLO SECONDO UNI EN ISO 13786:2008

Assumendo:

$$R_{s1}(\text{interna})=0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$R_{s2}(\text{esterna})=0,04 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$$

$$Z_{11} = -0,508 + 3,081 j$$

$$Z_{12} = -0,046 - 0,545 j$$

$$Z_{21} = 22,16 - 30,55 j$$

$$Z_{22} = -2,502 + 5,830 j$$

$$\arg(Z_{11}) = \arctg\left(\frac{b}{a}\right) + \pi = \arctg\left(\frac{3,081}{-0,508}\right) + 3,14 = 1,73$$

se a > 0

$$\arg(z) = \arctg(b/a)$$

Lo sfasamento temporale risulterà:

se a < 0

$$\Delta t_{ij} = \frac{T}{2\pi} \varphi_{ij} = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{ij}) = \frac{24}{6,28} * 1,73 = 6,62$$

$$\arg(z) = \arctg(b/a) + \pi$$

se a = 0

$$\arg(z) = 1/2 \pi \text{ sen } (b)$$