SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Architettura

-

Laurea magistrale in
Architettura a ciclo unico

Corso di fisica tecnica ambientale

LEZIONE 8:
TRASMISSIONE DEL CALORE IN EDILIZIA

Ing. Marco Cecconi

marco.cecconi@ingenergia.it

Obiettivo

- **Applicare agli edifici i meccanismi generali di trasmissione del calore.**
- **Calcolare i flussi energetici che interessano gli edifici.**

Indice

8 Trasmissione del calore in edilizia

- **Generalità**
  - Analisi dei flussi termici 4
- **Pareti opache**
  - Scambio termico delle pareti opache 8
  - Adduzione 10
  - Scambio per trasmissione, trasmittanza termica 14
  - Profilo di temperatura nella parete 23
  - Trasmissione dinamica, trasmittanza periodica 29
  - Apporto solare opaco 33
  - Temperatura fittizia al sole 35

...indice...

- **Pareti vetrate**
  - Analisi dei meccanismi di scambio termico 40
  - Scambio per trasmissione 41
  - Apporto solare trasparente 43
- **Ponti termici** 47
- **Scambio per trasmissione verso locali non climatizzati** 60
- **Ventilazione e infiltrazioni** 60
- **Apporti interni** 64
- **Conclusioni** 67

Trasmissione del calore negli edifici

DAI MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO GENERALI A QUELLI NEGLI EDIFICI

- Rispetto ai **singoli meccanismi** di scambio termico studiati (conduzione, convezione, irraggiamento), **la loro applicazione agli edifici comporta le seguenti problematiche**:
  - **i singoli meccanismi agiscono contemporaneamente** sugli elementi edilizi;
  - **alcune delle ipotesi fatte possono non essere più valide** (es. stazionarietà, omogeneità, flussi unidirezionali, ecc);
  - **alcuni parametri del sistema possono avere valore difficilmente conoscibile oppure variabile in modo aleatorio** (temperature, composizione delle murature, comportamento degli occupanti,ecc).



...QUINDI...

...occorre studiare accuratamente l'applicazione agli edifici dei meccanismi di scambio termico.

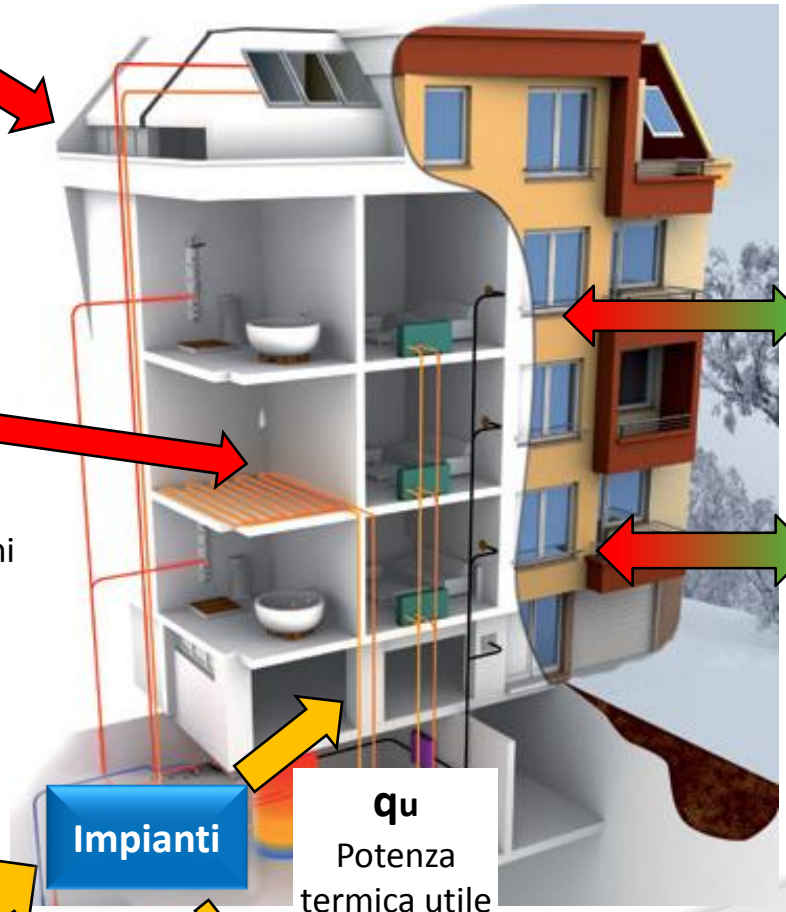
Trasmissione del calore negli edifici

ANALISI DEGLI SCAMBI TERMICI

q_{sol}
Irraggiamento solare [W]



q_{int}
Apporti interni [W]



q_{tr}
Scambi per trasmissione dell'involucro [W]

q_v
Scambi per infiltrazioni e ventilazione [W]

Impianti

q_u
Potenza termica utile [W]

Fonti energetiche

q_{in}
Potenza introdotta [W]

q_p Potenza persa [W]

Trasmissione del calore negli edifici

ANALISI DEGLI SCAMBI TERMICI

Per conoscere il comportamento energetico del sistema-edificio occorre **studiare i singoli flussi termici** scambiati con l'esterno oppure generati all'interno:

1. **Flussi di calore attraverso l'involucro**:
   - **pareti opache**
   - **pareti vetrate**
   - **ponti termici**
2. **Flussi di calore per ventilazione e infiltrazioni**
3. **Apporti interni**

Involucro edilizio

CARATTERISTICHE, FUNZIONI, PRESTAZIONI

- L'involucro è l'insieme degli elementi architettonici che delimitano gli spazi interni da quelli esterni, ossia il **confine tra interno ed esterno**.
- L'involucro costituisce l'**ultima barriera che ostacola la trasmissione del calore** dagli spazi climatizzati a quelli esterni.
- **Un buon involucro fornisce una elevata resistenza** al flusso di calore e riduce le dispersioni termiche.



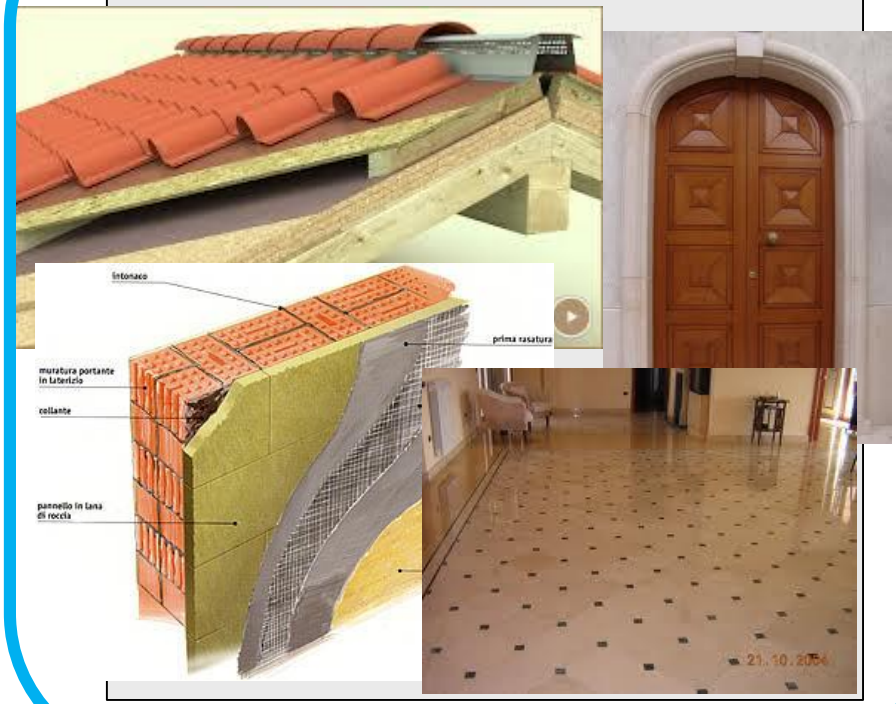


Involucro edilizio

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO

- Dal punto di vista termico l'**involucro si suddivide in**:
  - **Pareti opache** (murature, solai, coperture, porte, ecc)
  - **Pareti vetrate** (infissi)

Pareti opache



Pareti vetrate

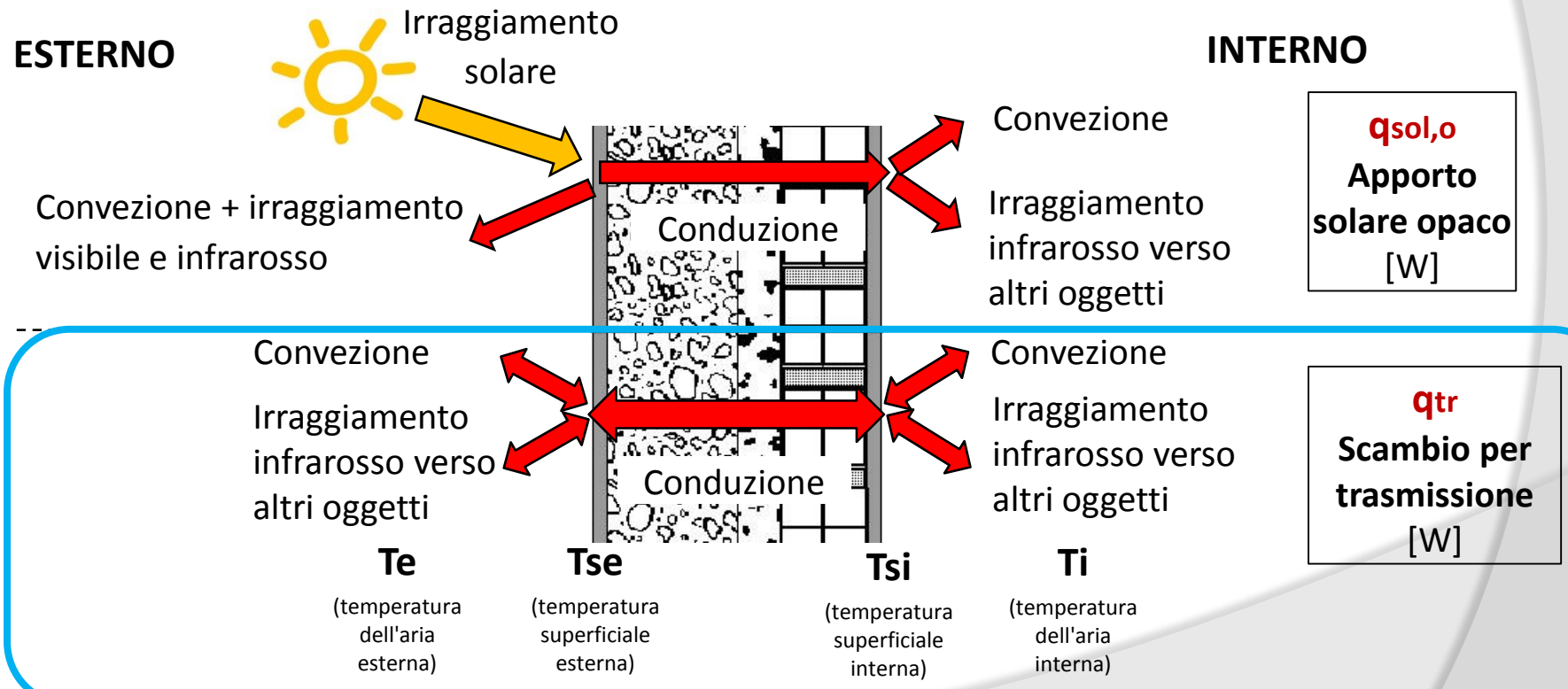


Flussi di calore attraverso le pareti opache

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO DELLE PARETI OPACHE

Ai fini del calcolo i vari meccanismi di trasmissione del calore si raggruppano in:

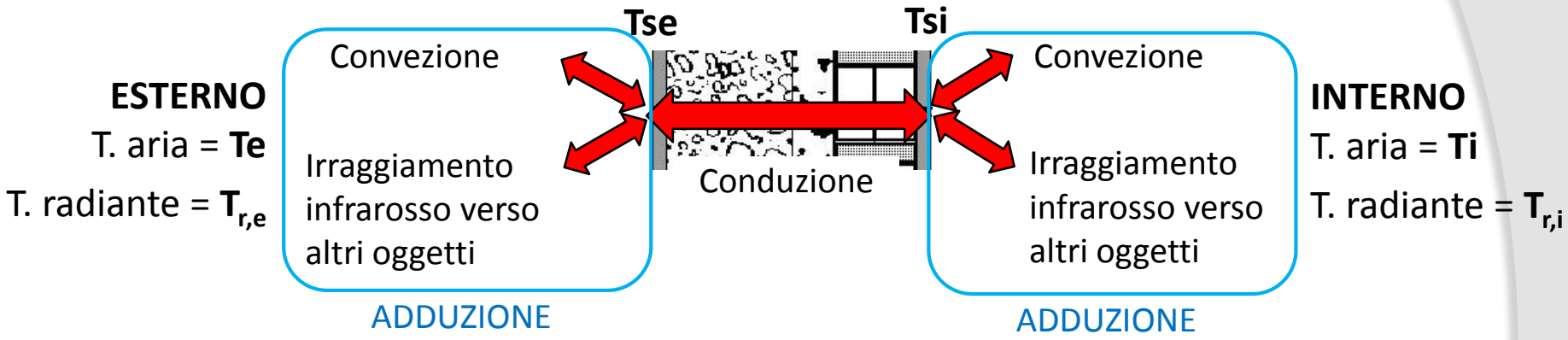
- **Apporti solari opachi**
- **Scambio termico per trasmissione**



Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ADDUZIONE

- **E' possibile associare gli scambi termici per convezione ed irraggiamento in un unico effetto chiamato adduzione termica.**



$$q = H_{r,e} \cdot \left(T_{r,e} - T_{se}\right) + H_{c,e} \cdot \left(T_e - T_{se}\right)$$

$$q = H_{r,i} \cdot \left(T_{si} - T_{r,i}\right) + H_{c,i} \cdot \left(T_{si} - T_i\right)$$

..se $T_{r,e} \cong T_e$ e $T_{r,i} \cong T_i$ è possibile associare contributi radiativi e convettivi:

$$q = H_{add,e} \cdot \left(T_e - T_{se}\right)$$

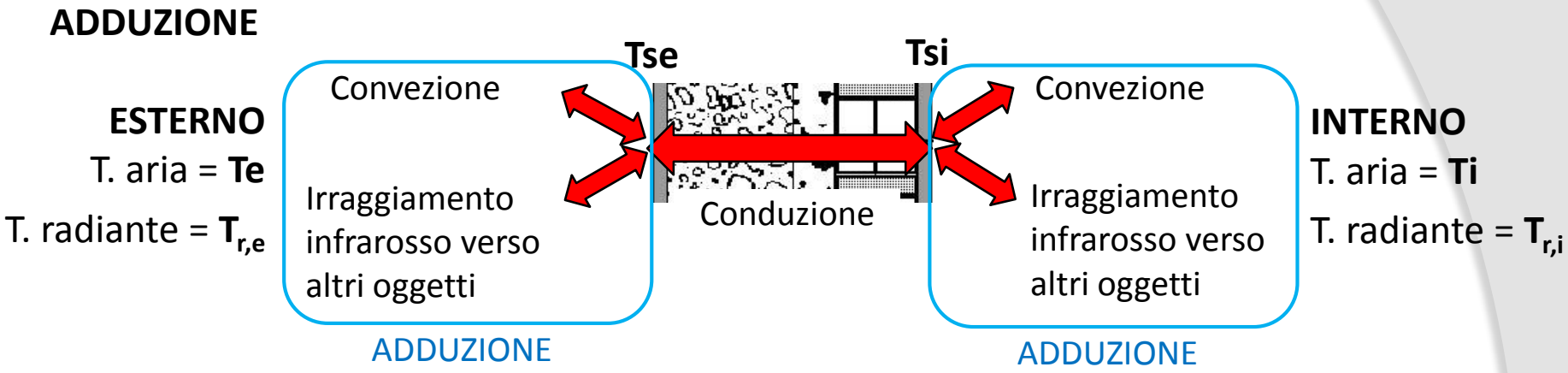
$$q = H_{add,i} \cdot \left(T_{si} - T_i\right)$$

..dove: $H_{add,e} = H_{r,e} + H_{c,e}$

..dove: $H_{add,i} = H_{r,i} + H_{c,i}$

- **I coefficienti di adduzione (o adduttanze) sono in tutto e per tutto delle conduttanze, perciò si misurano in [W/m²K].**

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache



IPOTESI DI VALIDITA'

- Per poter unire convezione e irraggiamento nell'adduzione, **il ΔT dello scambio per convezione deve essere circa uguale a quello per irraggiamento, ossia: Tr,e ≈ Te; Tr,i ≈ Ti.**

...QUINDI...

- **Tramite l'adduzione si può considerare solo l'irraggiamento verso superfici che sono a temperatura radiante circa uguale a quella dell'aria ambiente esterna** (es. edifici antistanti, terreno, ecc) **oppure interna** (altre pareti).
- **Irraggiamenti a temperatura molto diversa vanno considerati a parte** (irraggiamento solare, caminetti, termosifosi, persone, ecc).

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ADDUZIONE

- **I coefficienti di adduzione sono chiamati anche adduttanze o coefficienti di scambio termico liminare o superficiale**, poiché descrivono lo scambio termico che avviene sulla superficie delle pareti.
- Le adduttanze **sono in tutto e per tutto delle conduttanze**, perciò si misurano in **[W/m²K].**
- In alternativa, anziché le adduttanze, si possono trovare in letteratura le **resistenze termiche superficiali**. Come sempre le resistenze sono il reciproco delle adduttanze ($\mathbf{R_{add} = 1 / H_{add}}$) e si misurano come sempre in **[m²K/W]**.
- La norma tecnica **UNI EN ISO 6946:2008** fornisce i seguenti valori per le **resistenze termiche superficiali** (chiamate $\mathbf{R_{si}}$ e $\mathbf{R_{se}}$ anziché R_{add}):

Resistenze termiche superficiali (in $m^2 \cdot K/W$)

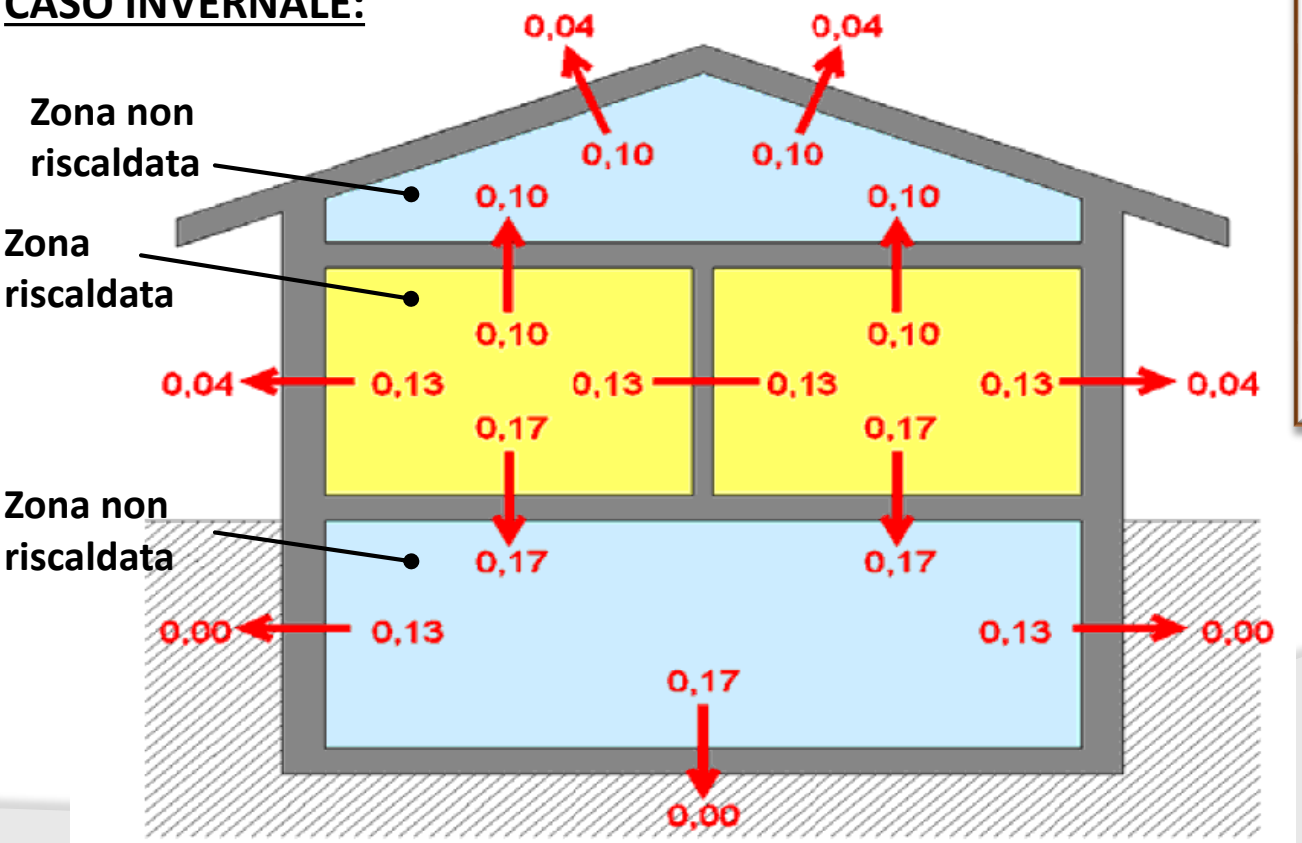
	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

Resistenze termiche superficiali (in $m^2 \cdot K/W$)

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

CASO INVERNALE:



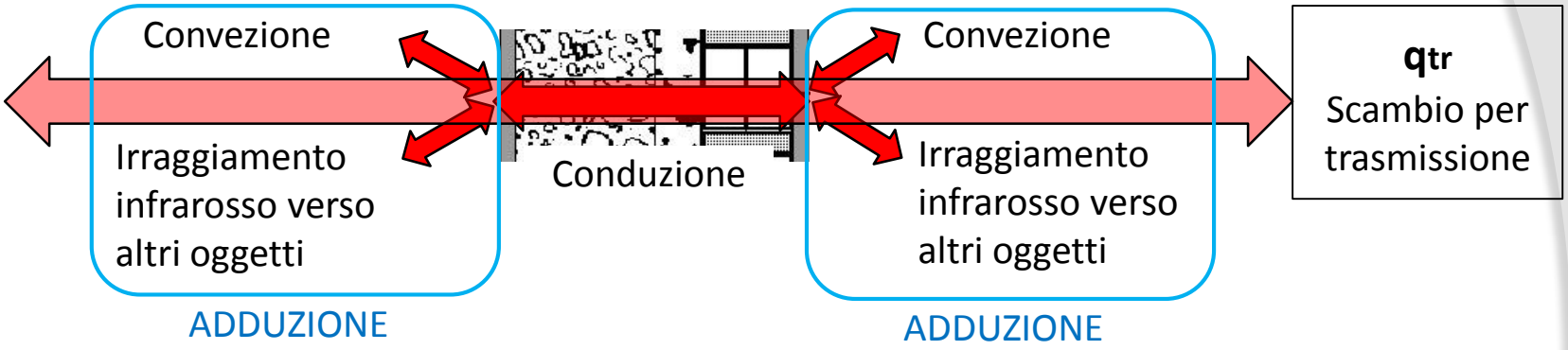
CASO ESTIVO:

Occorre girare i versi delle frecce e cambiare quindi alcuni dei valori di R_{si} e R_{se}.

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

- **Tutti i singoli meccanismi di scambio termico** che avvengono nella parete vengono inclusi in un unico flusso di calore che è lo **scambio per trasmissione**.



- **Calcolo della potenza termica che fluisce per trasmissione**:

$$q_{tr} = H_{tr}\Delta T = AU\Delta T$$

..dove: $U = \frac{1}{R_{tot}}$

q_{tr} = Potenza termica scambiata per trasmissione [W]

H_{tr} = Coeff. di scambio termico per trasmiss. [W/K]

U = **Trasmittanza termica [W/m²K]**

A = Area della parete [m²]

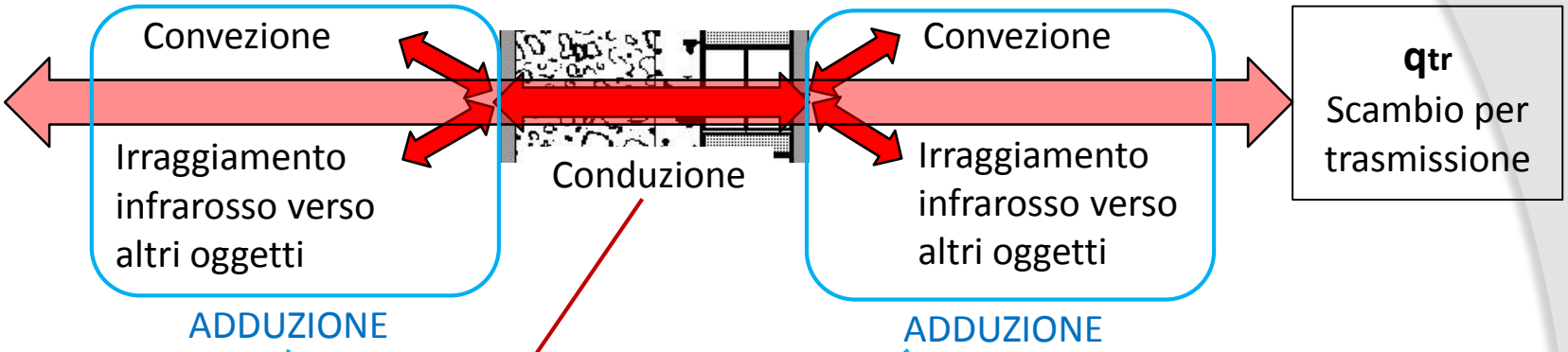
ΔT = Differenza di temperatura aria esterna – interna [K]

R_{tot} = Resistenza termica totale parete+strati sup. [m²K/W]

- **IPOTESI DI BASE = STAZIONARIETA'!! (no accumulo di calore nella parete)**

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

TRASMITTANZA TERMICA



- **Calcolo della trasmittanza termica:**

$$U = \frac{1}{R_{tot}}$$

$$R_{tot} = R_{s,est} + \sum_{k=1}^{N} \frac{s_k}{\lambda_k} + \sum_{j=1}^{M} R_j + R_{s,\text{int}}$$

U = **Trasmittanza termica [W/m²K]**

R_{tot} = **Resistenza termica totale parete+strati sup. [m²K/W]**

λ_k = Conducibilità termica dello strato k-esimo [W/mK]

s_k = Spessore dello strato k-esimo [m]

R_j = Resistenza termica dello strato interno j-esimo [m²K/W]

R_s = Resist. term. strati superficiali interno ed esterno [m²K/W]

- **La differenza di questa R_{tot} rispetto a quella della sola conduzione è la presenza delle adduttanze superficiali.**

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

TRASMITTANZA TERMICA

- La **trasmittanza termica (U) è una conduttanza termica particolare** poiché tiene in considerazione **tutti gli scambi termici per trasmissione della parete**, compresi quelli per adduzione sulle superfici interna ed esterna. Sono esclusi invece gli scambi per irraggiamento con corpi a temperature diverse da quelle dell'aria ambiente (per esempio il sole).

- E' una grandezza fondamentale poiché **su di essa si basano i limiti di legge per il livello di isolamento minimo delle pareti** (D.Lgs. 192/2005 coordinato con D.Lgs. 311/2006, aggiornato dal DM 26/06/2015) e per l'accesso alle **detrazioni fiscali** sul risparmio energetico.

- La trasmittanza resta una **grandezza stazionaria**, non tiene conto cioè delle capacità di accumulo di calore e "sfasamento" della parete.

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE DI UNA PARETE

Calcolare la potenza termica che fluisce nella parete in figura con:

A =10m^2

ΔT =20K

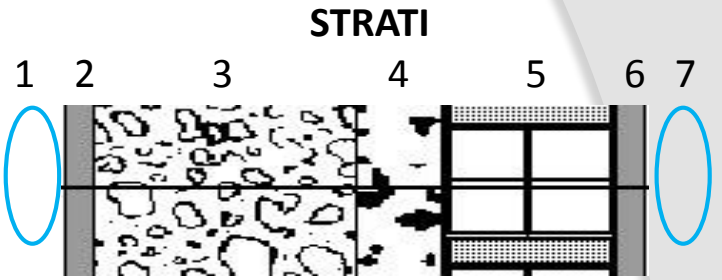
s_2 = 15mm, intonaco

s_3 = 20cm, calcestruzzo

s_4 = 5cm, isolante

s_5 = 12cm, laterizio forato

s_6 = 15mm, intonaco



SPESSORI =	nc	s2	s3	s4	s5	s6 nc
CONDUCIBILITA' =	nc	λ2	λ3	λ4	nc	λ6 nc
RESISTENZA =	Rs,est	s_2/k_2	s_3/k_3	s_4/k_4	R_j	s_6/k_6 Rs,int

$$q_{tr} = AU\Delta T$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{s,est} + \sum_{k=1}^{N} \frac{s_k}{\lambda_k} + \sum_{j=1}^{M} R_j + R_{s,\mathrm{int}}}$$

1 - Primo passo :
trovare i dati mancanti dalle tabelle sulle caratteristiche termiche dei materiali.

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

- Resistenze termiche superficiali (norma UNI EN ISO 6946:2008)

Resistenze termiche superficiali (in $m^2 \cdot K/W$)

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

- Conducibilità dei materiali compatti (norma UNI 7357)

Intonaco

Prospetto — Conduttività termica e permeabilità al vapore dei materiali da costruzione

Materiale	ϱ (kg/m³)	$\delta_a \cdot 10^{12}$ (kg/msPa)	$\delta_u \cdot 10^{12}$ (kg/msPa)	λ_m (W/mK)	m %	λ (W/mK)
Intonaci e malte						
— malte di gesso per intonaci o in pannelli con inerti di vario tipo (per prodotti senza inerti e secchi le conduttività di riferimento possono valere il 60% dei valori di calcolo)	600	≅ 18				0,29
	750					0,35
	900					0,41
	1 000					0,47
	1 200					0,58
— intonaco di gesso puro	1 200	≅ 18				0,35
— intonaco di calce e gesso	1 400	≅ 18				0,70
— malta di calce o di calce e cemento	1 800	5 a 12				0,90
— malta di cemento	2 000	5 a 12				1,40

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

- Conducibilità dei materiali compatti (norma UNI EN ISO 7357)

Calcestruzzo

Materiale	ϱ (kg/m³)	$\delta_a \cdot 10^{12}$ (kg/msPa)	$\delta_u \cdot 10^{12}$ (kg/msPa)	λ_m (W/mK)	m %	λ (W/mK)
Calcestruzzo						
a) a struttura chiusa[2]:						
— calcestruzzo confezionato con aggregati naturali (valori di calcolo per pareti esterne e interne protette; per pareti esterne non protette assumere m = 25%)[3]	2 000	1,3 a 2,6	1,8 a 4	1,01	15	1,16
	2 200			1,29		1,41
	2 400			1,66		1,91
— calcestruzzo di argille espanse (conduttività di riferimento relativa a materiale secco); valori di calcolo per pareti interne o protette con umidità del 4%; per pareti esterne con umidità 6% assumere m = 30%; per pareti di scantinati con 8% di umidità assumere m = 45%; per sottofondi non aerati assumere m = 100%[3]	1 000	1,3 a 2,6	1,8 a 4	0,25	20	0,31
	1 100			0,29		0,35
	1 200			0,33		0,39
	1 300			0,37		0,44
	1 400			0,42		0,50
	1 500			0,47		0,57
	1 600			0,54		0,65
	1 700			0,63		0,75
b) a struttura aperta[2]:						
— calcestruzzo di argille espanse (conduttività di riferimento relativa a materiale secco); valori di calcolo per pareti interne o protette con umidità del 4%; per pareti esterne con umidità 6% assumere m = 30%; per pareti di scantinati con 8% di umidità assumere m = 45%; per sottofondi non aerati assumere m = 100%[3]	500	18 a 36	≥ 60	0,14	20	0,16
	600			0,16		0,18
	700			0,18		0,21
	800			0,20		0,24
	900			0,22		0,27
	1 000			0,25		0,31
— calcestruzzo cellulare da autoclave (valori di calcolo per pareti interne o esterne protette con umidità dal 4 al 5%; per pareti esterne con umidità dal 6 al 7% assumere m = 40%; per pareti di scantinati con umidità dall'8 al 10% assumere m > 50%)[3] (per calcestruzzi espansi in situ maggiorare i dati dei calcestruzzi da autoclave del 10%)	400	18 a 36	40 a 60	0,12	25	0,15
	500			0,14		0,17
	600			0,15		0,19
	700			0,17		0,22
	800			0,20		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

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

- Conducibilità dei materiali compatti (norma UNI EN ISO 7357)

Polistirene

Materiale	ϱ (kg/m³)	$\delta_a \cdot 10^{12}$ (kg/msPa)	$\delta_u \cdot 10^{12}$ (kg/msPa)	λ_m (W/mK)	m %	λ (W/mK)
Materie plastiche cellulari						
Le conduttività di riferimento sono valide per materiali prodotti da non meno di 100 d (giorni). Per temperature medie comprese tra 270 e 320 K la conduttività delle materie plastiche cellulari aumenta da 0,4 a 0,5% / K al crescere della temperatura media del materiale. Sul valore di *m* le tolleranze di spessore riferite a lastre di 10 cm di spessore, incidono dall'1 al 3%; l'effetto dell'installazione per incollaggio accostamento, incastro o battentatura, ecc. incide dall'1 al 3%, per montaggi che impiegano staffe o altri sistemi che introducono ponti termici, maggiorare i dati di calcolo almeno del 5%. Per montaggi contro il terreno maggiorare i dati di calcolo dal 10 al 25%[4]. Per i materiali leggeri le resistenze termiche specifiche non sono rigorosamente additive; ricalcolare la resistenza termica specifica totale di ciascun manufatto o di ciascun isolamento composto da più strati sovrapposti di resistenza termica specifica nota. Qualora sia fornita, per un determinato materiale, una correlazione tra la conduttività a 100 d dalla produzione e la conduttività ad un diverso numero di giorni dalla produzione, si possono ricalcolare i valori di *m*.						
— cloruro di polivinile espanso rigido in lastre[5]	30	0,5 a 1	1 a 2	0,032	20	0,039
	40			0,035	20	0,041
— polietilene[5]						
— espanso estruso in continuo, non reticolato	30			0,042	20	0,050
	50			0,050	20	0,060
— espanso estruso in continuo, reticolato	33			0,040	20	0,048
	50			0,048	20	0,058
— polistirene (contenuto di umidità in pareti interne[3] da 1 a 2%; per applicazioni contro il terreno[4] sino al 20%; per i prodotti estrusi i valori di umidità indicati devono essere circa dimezzati. La conduttività aumenta da 0,1 a 0,5% per ogni % di umidità)						
— espanso sinterizzato per alleggerimento strutture	15	3,6 a 9	3,6 a 9	0,041	10	0,045
— espanso sinterizzato, in lastre ricavate da blocchi (conforme a UNI 7891, le masse volumiche sono quelle nominali indicate nella norma; conduttività di riferimento ricalcolate a 293 K e per 10 cm di spessore)	20	2,5 a 6	2,5 a 6	0,037	10	0,041
	25			0,036	10	0,040
	30	1,8 a 4,5	1,8 a 4,5	0,036	10	0,040
— espanso sinterizzato, in lastre ricavate da blocchi	10	3,6 a 9	3,6 a 9	0,051	10	0,059
	15	2,5 a 6	2,5 a 6	0,043	10	0,047
	20	1,8 a 4,5	1,8 a 4,5	0,040	10	0,044
	25			0,039	10	0,042
	30			0,038	10	0,042

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

- Conducibilità delle murature (norma UNI EN ISO 10355)

Laterizi forati

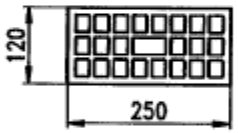
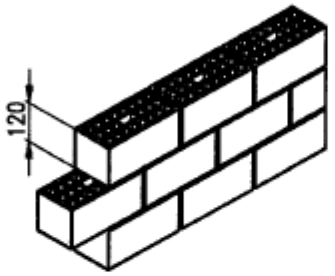
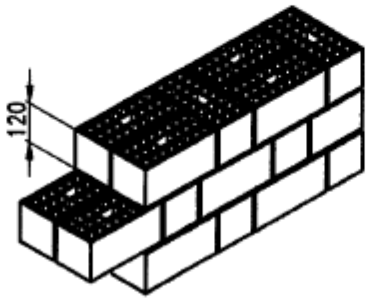


Fig. 4 Mattone semipieno

Rappresentazione dell'elemento	Rappresentazione della struttura	Caratteristiche elemento			Caratteristiche struttura						
		Codice	Foratura %	Foratura tipo	Spessore mm	Tipo di giunto		Massa volumica** kg/m³	Massa superficiale kg/m²	Resistenza termica m²K/W	Fattore di correzione %
	 a)	1.1.04	41	V	120	CM	GC	1800	140	0,24	9
	 b)	1.1.04	41	V	250	CM	GC	1800	297	0,47	9

** Valore riferito al materiale costituente l'elemento

(segue prospetto)

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

Calcolare la potenza termica che fluisce nella parete in figura con:

A =10m²

ΔT =20K (40°-20°)

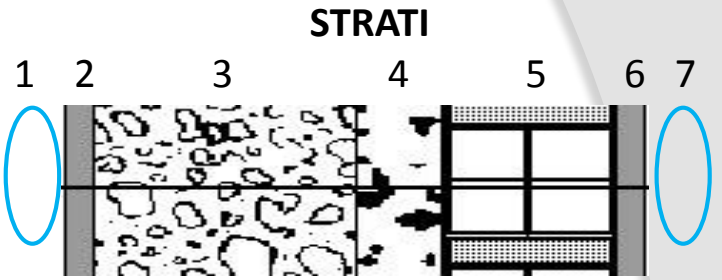
s_2 = 15mm, intonaco

s_3 = 20cm, calcestruzzo

s_4 = 5cm, isolante

s_5 = 12cm, laterizio forato

s_6 = 15mm, intonaco



2 – Secondo passo: svolgere i calcoli

		GRANDEZZE			
		s	**λ**	**C**	**R**
STRATO	**MATERIALE**	[m]	[W/mK]	[W/m²K]	[m²K/W]
1 (esterno)	Adduttanza esterna				0,040
2	Intonaco in malta di calce	0,015	0,900	60,0	0,017
3	Calcestruzzo	0,200	1,410	7,1	0,142
4	Polistirene espanso	0,050	0,040	0,8	1,250
5	Laterizio forato da 120mm	0,120			0,240
6	Intonaco in malta di calce	0,015	0,900	60,0	0,017
7 (interno)	Adduttanza interna				0,130
	TOTALI	**0,40**			**1,835**

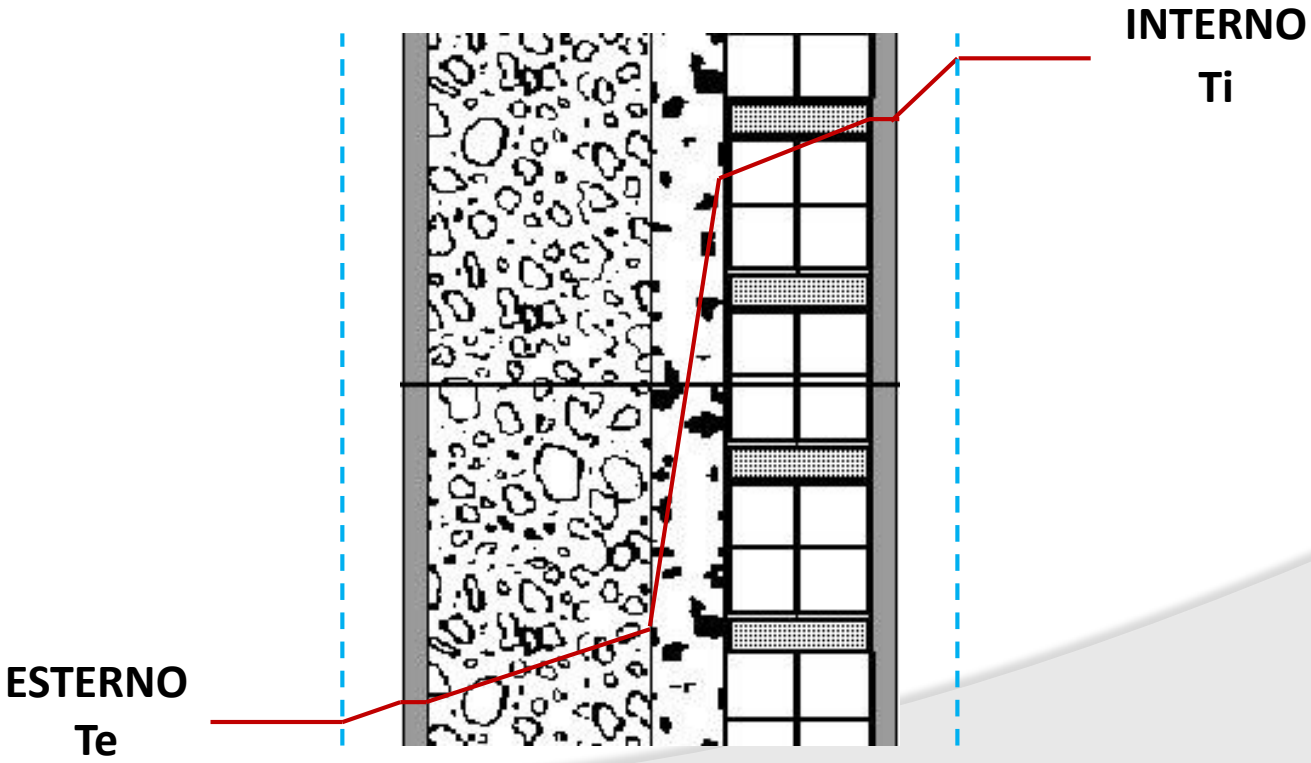
$$U = 0{,}545 \frac{W}{m^2 K}$$

$$q_{tr} = 109W$$

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

PROFILO DI TEMPERATURA NELLA PARETE

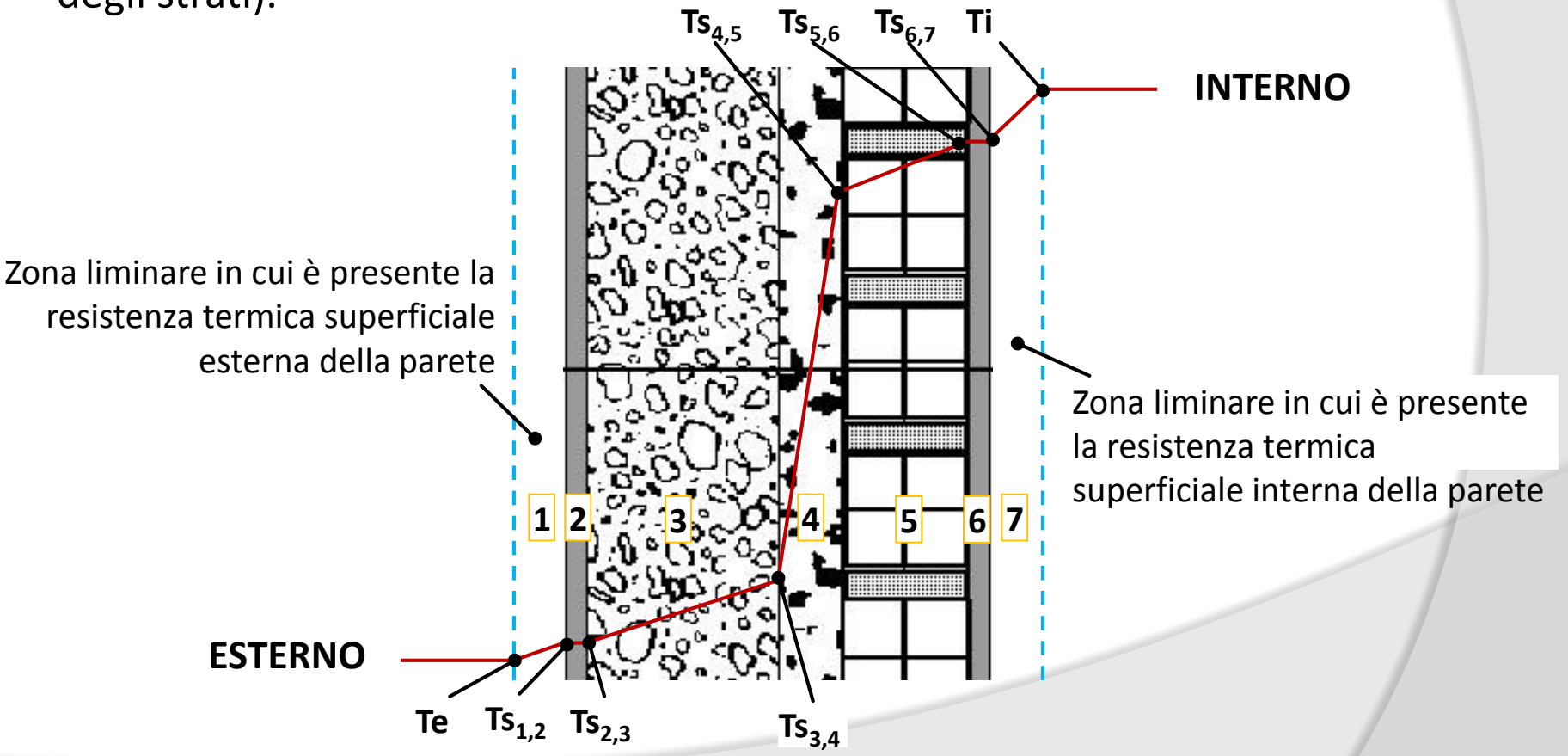
- E' possibile calcolare il **profilo di temperatura interna della parete**.
- Ciò è necessario per verificare la presenza di **condensazione interstiziale** (verifica di **Glaser**) che potrebbe degradare i materiali (ad es. cemento armato, isolanti naturali, ecc).



Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

PROFILO DI TEMPERATURA NELLA PARETE

- Per determinare il profilo basta sapere le **temperature superficiali all'interfaccia tra due strati** e unire i punti trovati con dei segmenti, poiché all'interno del singolo strato l'**andamento sarà lineare** (ipotesi di omogeneità degli strati).



Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

PROFILO DI TEMPERATURA NELLA PARETE

- Il **salto termico che si verifica sul singolo strato** può essere calcolato a partire dalle formule già viste per la conduzione della lastra piana e della parete multistrato:

Per tutta la parete: $q_{tr} = H_{tr}\Delta T_{tot} = A\frac{\Delta T_{tot}}{R_{tot}}$

Per lo strato 1: $q_1 = H_1\Delta T_1 = A\frac{\Delta T_1}{R_1}$

Siccome non c'è accumulo di calore nella parete (ipotesi di stazionarietà) il calore che fluisce in ogni strato è sempre lo stesso:

$$q_{tr} = q_1 = q_2 = q_x$$

Quindi facendo i conti:

$$\Delta T_1 = R_1 \frac{\Delta T_{tot}}{R_{tot}}$$

...e in generale, il **salto termico per lo strato qualsiasi (x)**:

$$\boxed{\Delta T_x = R_x \frac{\Delta T_{tot}}{R_{tot}}}$$

- La formula ci permette di calcolare il **salto termico di ogni strato, non la temperatura delle interfacce tra gli strati (NON $T_{s1,2}$ $T_{s2,3}$ ecc)!!!**

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

PROFILO DI TEMPERATURA NELLA PARETE

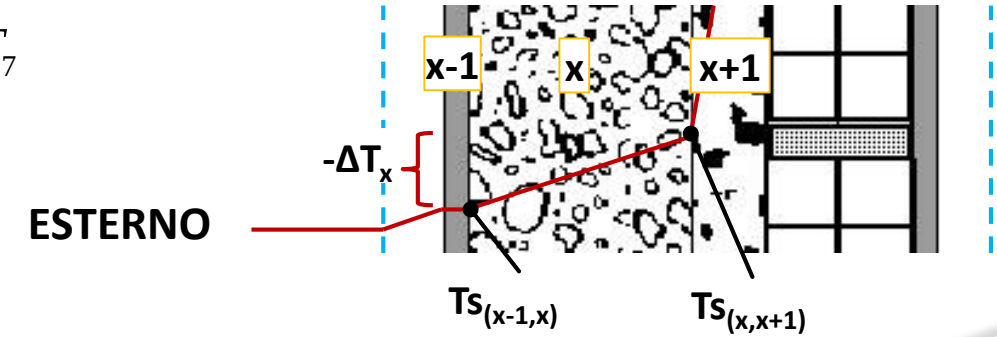
- **La temperatura delle interfacce tra gli strati** ($T_{s1,2}$; $T_{s2,3}$; ecc) devono essere calcolate a partire dalla **temperatura esterna sottraendo progressivamente i salti termici** appena trovati. Si sottrae perché per noi $\Delta T = T_e - T_i$.
- Per il caso specifico dell'esercizio:

$$\begin{cases} T_{S1,2} = T_e - \Delta T_1 \\ T_{S2,3} = T_{S1,2} - \Delta T_2 \\ .... \\ T_{S6,7} = T_{S5,6} - \Delta T_6 \\ T_i = T_{S6,7} - \Delta T_7 \end{cases}$$

...quindi in **generale**, se si procede **dall'esterno all'interno**:

$$T_{S(x,x+1)} = T_{S(x-1,x)} - \Delta T_x$$

Si capisce meglio graficamente:



- Se invece si procede **dall'interno all'esterno**, (nel disegno si scambiano esterno e interno), allora **la formula generale** è:

$$T_{S(x,x+1)} = T_{S(x-1,x)} + \Delta T_x$$

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESERCIZIO SU TRASMITTANZA E PROFILO DI TEMPERATURA

- *Calcolo della trasmittanza e della temperatura degli strati per l'esempio riportato in precedenza:*

Temperature:

Te = 0°

Ti = 20°

		GRANDEZZE				
		s	**λ**	**C**	**R**	**ΔT**
STRATO	**MATERIALE**	[m]	[W/mK]	[W/m^{2}K]	[m^{2}K/W]	[°C]
1 (esterno)	Adduttanza esterna				0,040	-0,44°
2	Intonaco in malta di calce	0,015	0,900	60,0	0,017	-0,18°
3	Calcestruzzo	0,200	1,410	7,1	0,142	-1,55°
4	Polistirene espanso	0,050	0,040	0,8	1,250	-13,62°
5	Laterizio forato da 120mm	0,120			0,240	-2,62°
6	Intonaco in malta di calce	0,015	0,900	60,0	0,017	-0,18°
7 (interno)	Adduttanza interna				0,130	-1,42°
	TOTALI	**0,40**			**1,835**	**-20,00°**

	Tstrati [°C]
Te	0,00°
Ts1,2	0,44°
Ts2,3	0,62°
Ts3,4	2,16°
Ts4,5	15,79°
Ts5,6	18,40°
Ts6,7	18,58°
Ti	20,00°

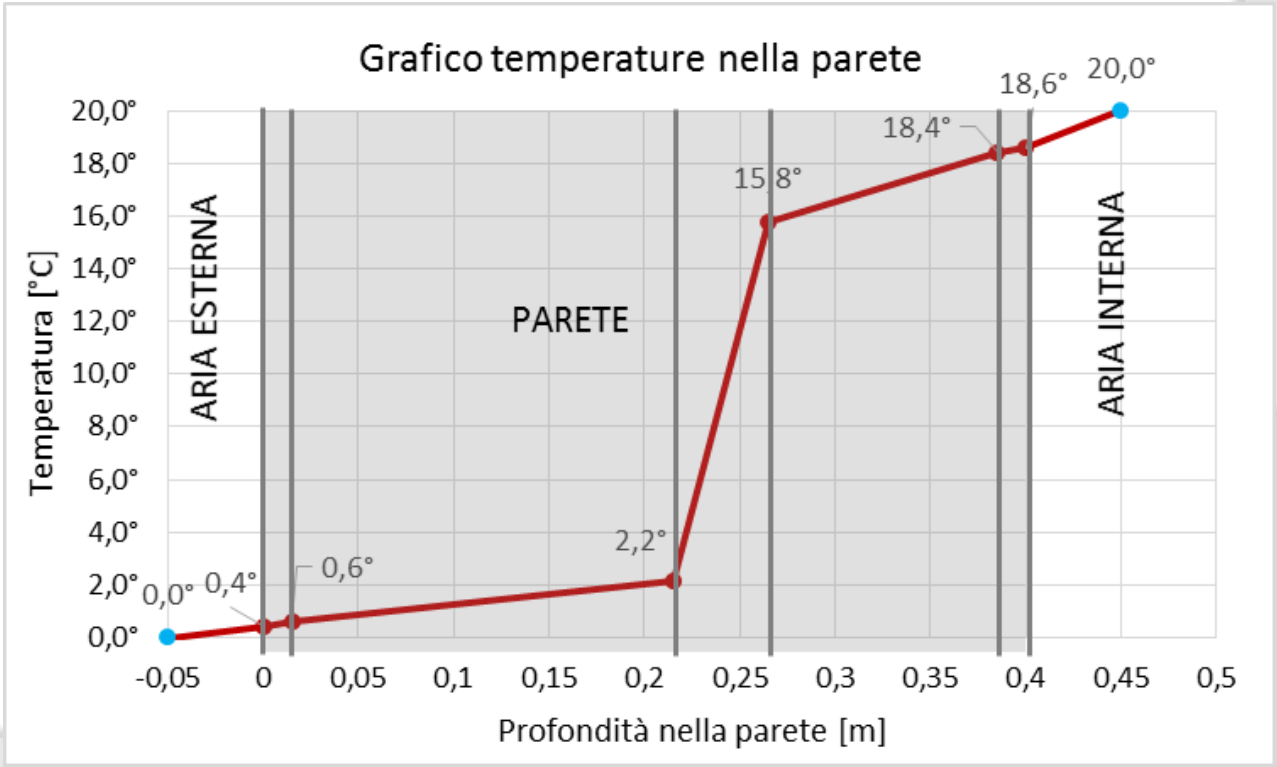
- *E' conveniente utilizzare una tabella per riportare i risultati dei calcoli poiché è un sistema più ordinato e pratico.*
- ***Nota bene: per ottenere un errore sufficientemente piccolo sul risultato è consigliabile arrotondare i calcoli delle resistenze termiche alla terza cifra decimale.***

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ESERCIZIO SU TRASMITTANZA E PROFILO DI TEMPERATURA

- *Con i valori calcolati è possibile costruire l'andamento grafico delle temperature nella parete.*
- *Si ipotizzata che le temperature dell'aria interna ed esterna si trovino 5 cm fuori dalla parete.*
- *Il salto termico maggiore avviene sullo strato che oppone più resistenza, quindi sull'isolante.*

	Tstrati [°C]
Te	0,00°
Ts1,2	0,44°
Ts2,3	0,62°
Ts3,4	2,16°
Ts4,5	15,79°
Ts5,6	18,40°
Ts6,7	18,58°
Ti	20,00°



Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ACCENNO AL REGIME DINAMICO - TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA

- Se vengono rimosse le ipotesi di stazionarietà si innescano i **meccanismi di conduzione dinamica** (ved. presentazione sulla conduzione).
- La presenza delle adduttanze superficiali non modifica la trattazione già fatta per la conduzione dinamica.
- In condizioni dinamiche periodiche si definisce la **trasmittanza termica periodica ($Y_{i,e}$)**: parametro che **valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore**.
- Il calcolo di $Y_{i,e}$ va effettuato secondo la **norma UNI EN ISO 13786:2008** e successivi aggiornamenti.
- Il **DM 26/06/2015** ed il **DPR 59/2009**, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni totali di edifici esistenti, **obbliga il progettista ad effettuare verifiche sul modulo della trasmittanza termica periodica** delle pareti più esposte al sole affinché sia non inferiore ad un valore indicato.

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

ACCENNO AL REGIME DINAMICO - TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA

- La **trasmittanza termica periodica** è definita come il **rapporto tra il flusso termico periodico in entrata** nell'ambiente interno (con temperatura costante) **e la temperatura dell'ambiente esterno**.

$$\overline{Y}_{e,i} = -\left.\frac{\overline{\varphi}_i}{\overline{T}_e}\right|_{\overline{T}_i = \text{costante}}$$

- La definizione è simile a quella della trasmittanza stazionaria $U = \frac{q}{A\Delta T} = \frac{\varphi}{\Delta T}$

  però la presenza di un sistema dinamico e di una sollecitazione periodica fanno sì che la $\mathbf{Y_{e,i}}$ **sia un numero complesso** composto da un modulo e una fase.

- **Il modulo di $Y_{e,i}$ è indice dell'attenuazione dell'onda termica.**
- **La fase di $Y_{e,i}$ è indice dello sfasamento.**

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

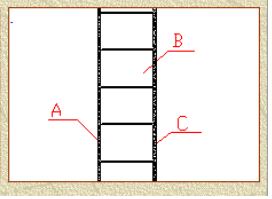
ACCENNO AL REGIME DINAMICO - ESEMPI DI SFASAMENTO DI ALCUNE MURATURE

Wall features: wall composed by calcarinite blocks and plaster
Wall function: load bearing
Building tipology: palace
Building location: vicolo ragusi n° 19
Building name:



Grande complesso di edifici su tre livelli, attualmente è in un stato di abbandono

Layer	Description	Functional layer	Thickness [m]
A	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,01
B	calcarinite	load bearning	0,42
C	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,01



Sfasamento di 10h 54’

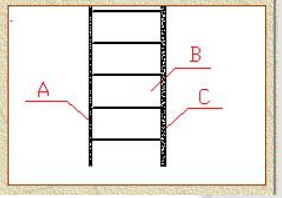
Wall features: wall composed by calcarinite blocks and plaster
Wall function: load bearing
Building tipology: palace
Building location: piazza della fonderia
Building name:



Ruderi in piazza della fonderia, struttura in conci di calcarinite e pilastri in laterizio quadri



Layer	Description	Functional layer	Thickness [m]
A	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,02
B	balatone	load bearning	0,512
C	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,03



Sfasamento di 15h 6’

Wall features: wall composed by calcarinite blocks and plaster
Wall function: load bearing
Building tipology: palace
Building location: largo Cav. di Malta n° 9
Building name: Niscemi palace

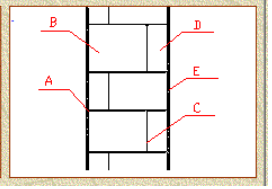


Built in the XVI century, they in the 700 had remade the elevations according to a classical style,





Layer	Description	Functional layer	Thickness [m]
A	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,02
B	calcarinite	load bearning	0,7
C	malta di calce e arena di mare	connection layer	0,01
D	calcarinite	load bearning	0,24
E	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,03



Sfasamento di 4h 48’

Wall features: wall composed by calcarinite blocks and plaster
Wall function: load bearing
Building tipology: palace
Building location: largo Cav. di Malta n° 9
Building name: Niscemi palace

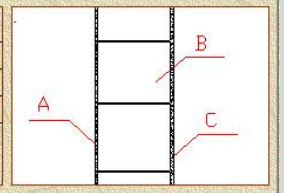


secolo,nel 700 furono rifatti i prospetti secondo uno stile classico ,attualmente e sede di una scuola





Layer	Description	Functional layer	Thickness [m]
A	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,02
B	calcarinite	load bearning	0,55
C	malta di calce e arena di mare	finish layer	0,03



Sfasamento di 16h 18’

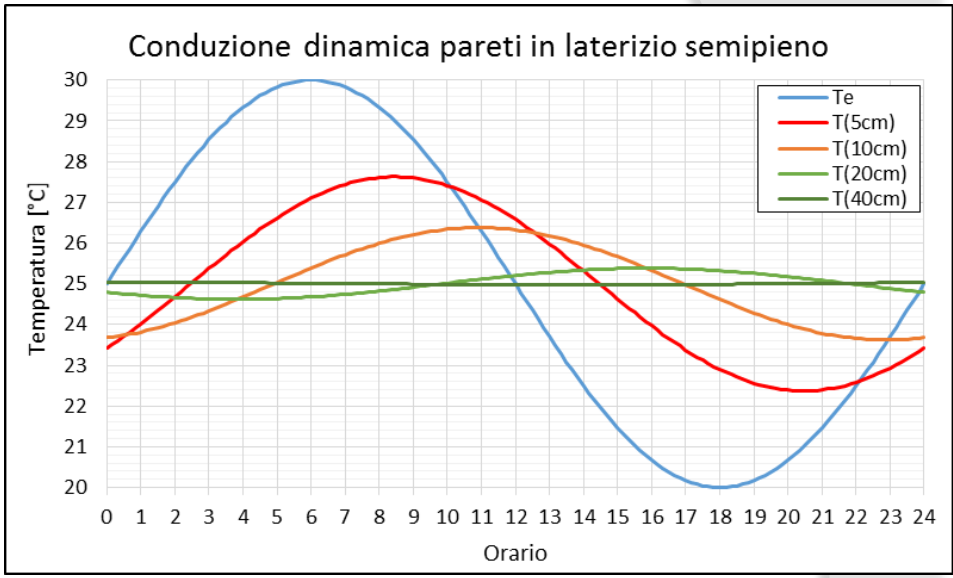
Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti opache

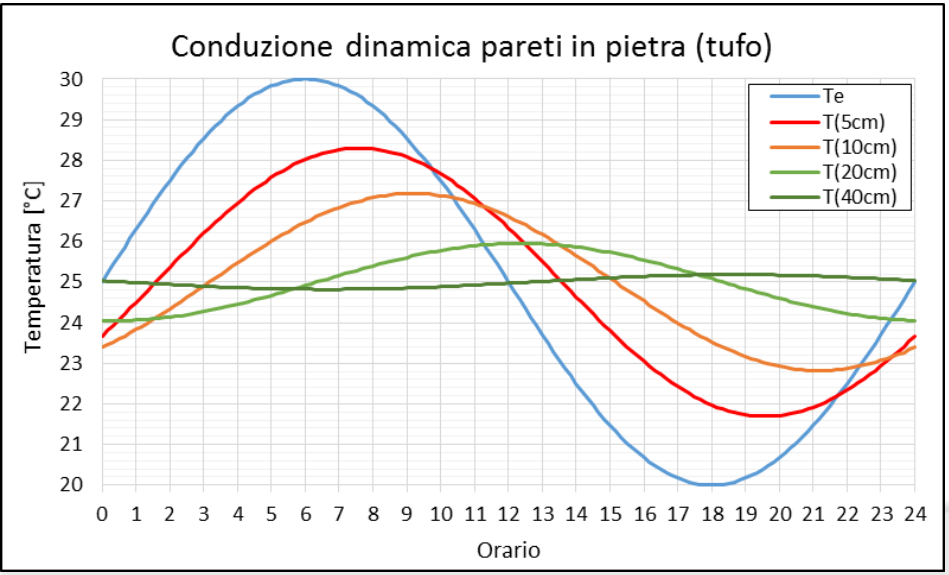
ACCENNO AL REGIME DINAMICO - TEMPERATURA INTERNA DI ALCUNE PARETI

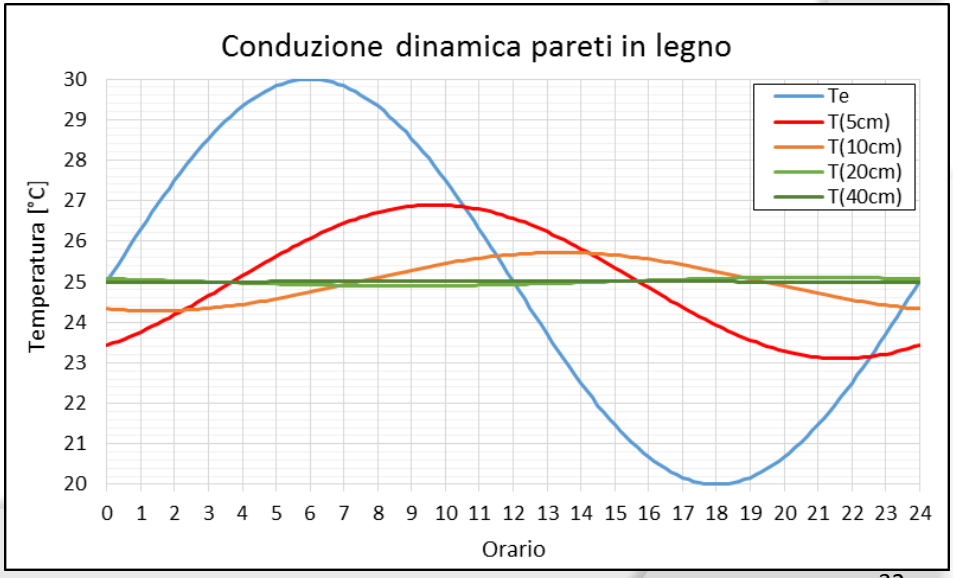
Temperature a diverse profondità nella parete, calcolate per una temperatura esterna (Te) periodica nelle 24 ore.

Le pareti sono considerate composte in maniera omogenea dai seguenti tre materiali:

- laterizi semipieni
- pietra (tufo)
- legno (abete)





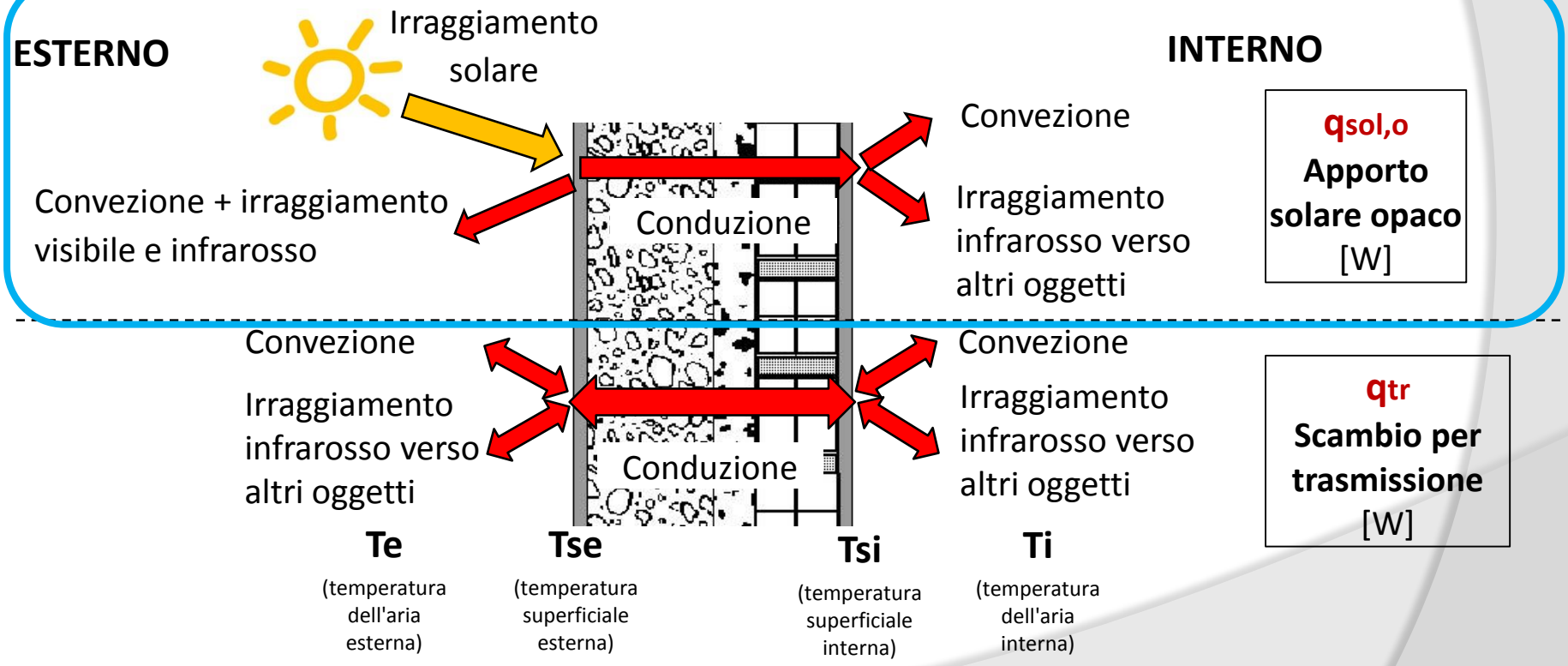


Flussi di calore attraverso le pareti opache

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO DELLE PARETI OPACHE

Ai fini del calcolo i vari meccanismi di trasmissione del calore si raggruppano in:

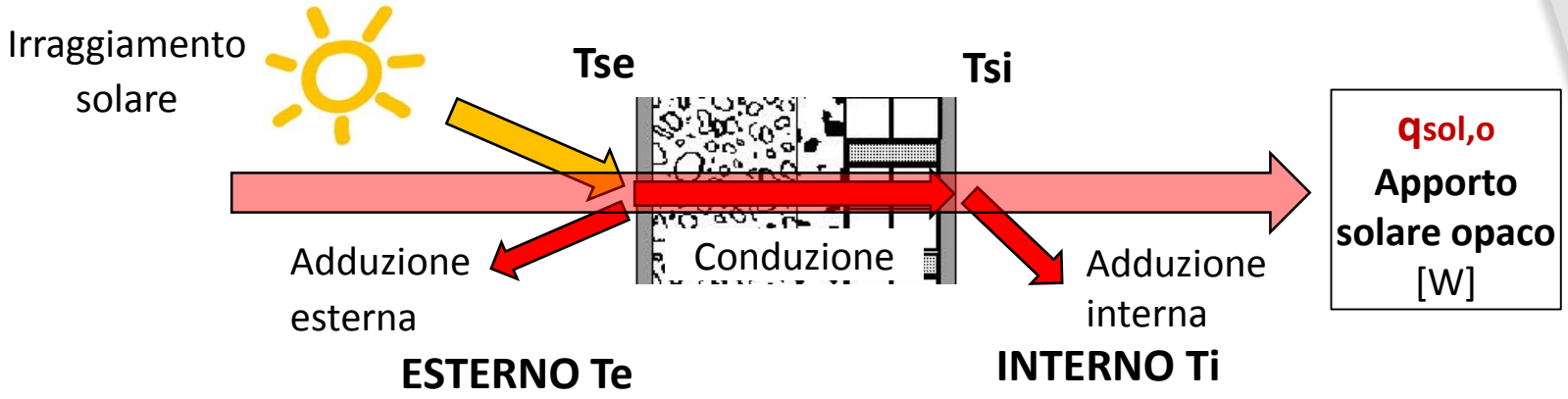
- **Apporti solari opachi**
- **Scambio termico per trasmissione**



Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti opache

APPORTO SOLARE TRASMESSO DALLE PARETI OPACHE

- **Tutti i singoli meccanismi di scambio termico** nella parete vengono inclusi in un unico flusso di calore che è l'**apporto solare opaco**.



- **Calcolo della potenza termica che fluisce all'interno**:

$$q_{sol,o} = F_{sh} a_{sol} I_{sol,p} R_{s,est} AU$$

$q_{sol,o}$ = Pot. term. solare portata all'interno dai comp. opachi [W]

F_{sh} = Fattore di ombreggiamento (shading) [adim]

a_{sol} = Assorbività solare della parete [adim]

$I_{sol,p}$ = Irraggiamento proiettato sulla superficie [W/m^2]

$R_{s,est}$ = Resist. term. strato superficiale esterno [m^{2}K/W]

A = Area della parete [m^2]

U = Trasmittanza termica [W/m^{2}K]

- **IPOTESI DI BASE = STAZIONARIETA'!! (no accumulo di calore nella parete)**

Flussi di calore attraverso le pareti opache

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO DELLE PARETI OPACHE

Il valore complessivo degli scambi termici di una parete opaca (scambio per trasmissione + apporto solare opaco) si può calcolare in due modi differenti:

1. **Si sommano i contributi dello scambio per trasmissione (q_{tr}) e degli apporti solari (q_{sol_o}):**

$$q_{tot,o} = q_{tr} + q_{sol,o}$$

2. **Si calcolano entrambi gli scambi sfruttando il concetto di temperatura fittizia al sole (T_f):**

$$q_{tot,o} = AU\left(T_f - T_i\right)$$

Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti opache

TEMPERATURA FITTIZIA AL SOLE (TEMPERATURA ARIA-SOLE)

- La temperatura fittizia al sole è quella **temperatura esterna virtuale** **che, in assenza di soleggiamento, produrrebbe nella parete lo stesso flusso di calore della parete soleggiata** ($q_{tr} + q_{sol,o}$).
- **Permette** di calcolare il flusso da una parete soleggiata con le **stesse formule di una parete non soleggiata**.

$$T_f = T_e + F_{sh} a_{sol} I_{sol,p} R_{s,est}$$

T_f = Temperatura fittizia al sole [K] o [°C]

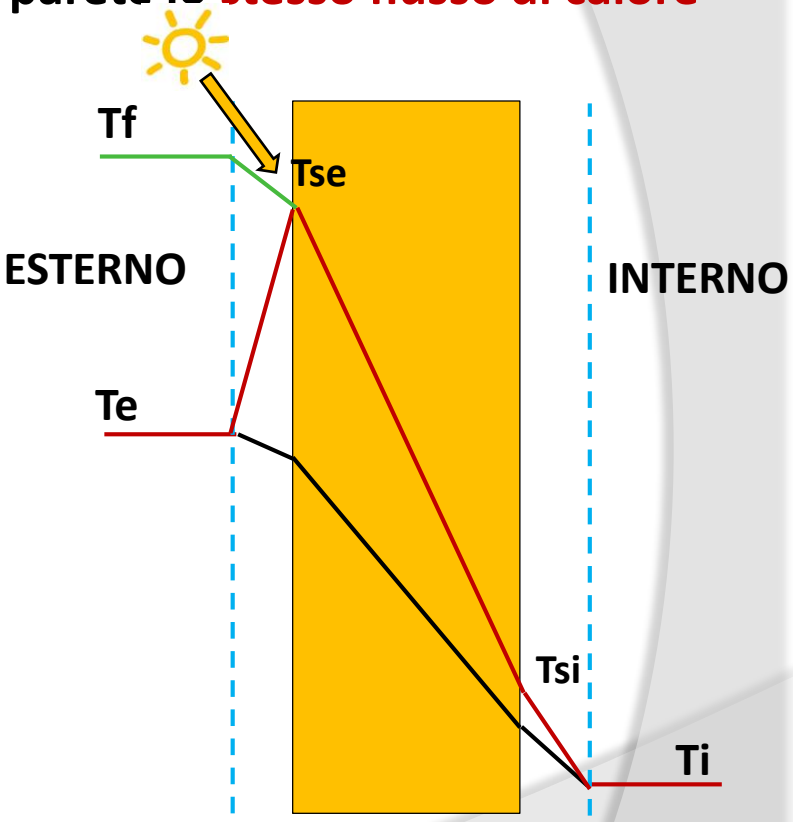
T_e = Temperatura esterna [K] o [°C]

F_{sh} = Fattore di ombreggiamento (shading) [adim]

a_{sol} = Assorbività solare della parete [adim]

$I_{sol,p}$ = Irraggiamento proiettato sulla superficie [W/m^2]

$R_{s,est}$ = Resist. term. strato superficiale esterno [m^{2}K/W]



LEGENDA

Linea nera = andamento **senza sole**

Linea rossa = andamento **effettivo con sole**

Linea verde = andamento **fittizio con sole**

Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti opache

TEMPERATURA FITTIZIA AL SOLE (TEMPERATURA ARIA-SOLE): DIMOSTRAZIONE

- Il flusso solare incidente si suddivide in una parte che viene trasmessa all'interno e un'altra che viene dispersa all'esterno:

$$q_{tot} = q_e + q_i$$

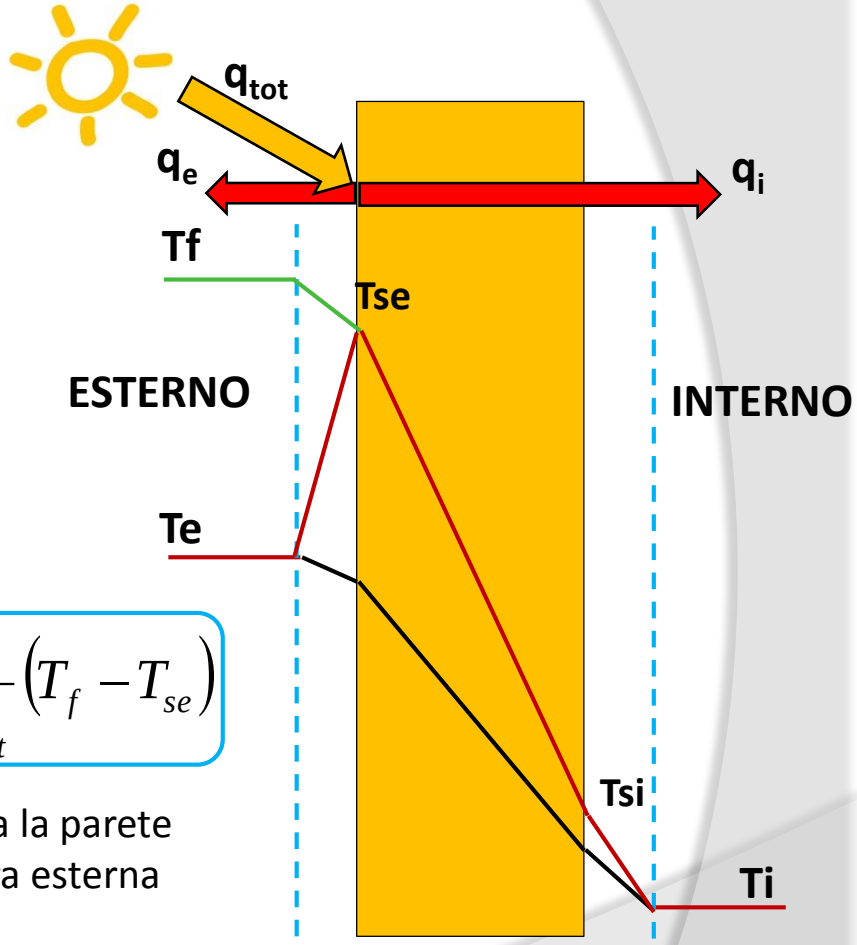
..dove:

$$\begin{cases} q_{tot} = F_{sh} a_{sol} I_{sol,p} A & [W] \\ q_e = \dfrac{A}{R_{s,est}} \left(T_{se} - T_e\right) & [W] \\ q_i = \dfrac{A}{R_{tot} - R_{s,est}} \left(T_{se} - T_i\right) & [W] \end{cases} = \frac{A}{R_{s,est}} \left(T_f - T_{se}\right)$$

Si considera che il calore Qi che attraversa la parete non derivi dal sole ma da una temperatura esterna fittizia Tf.

..risolvendo il sistema rispetto a Tf si ottiene:

$$T_f = T_e + F_{sh} a_{sol} I_{sol,p} R_{s,est}$$



LEGENDA

Linea nera = andamento **senza sole**

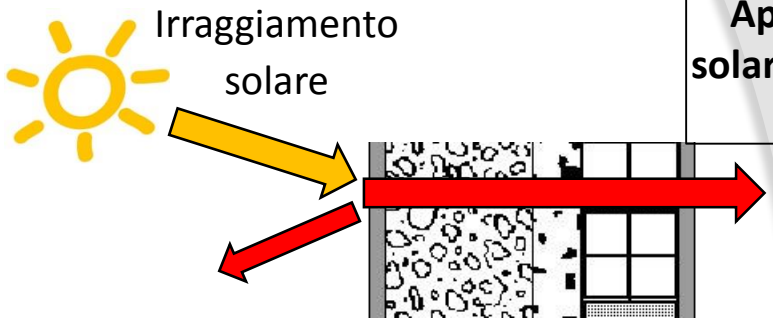
Linea rossa = andamento **effettivo con sole**

Linea verde = andamento **fittizio con sole**

Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DELL' APPORTO SOLARE SU PARETI OPACHE

Calcolare la potenza termica che fluisce nella parete in figura con:



$q_{sol,o}$ Apporto solare opaco [W]

$I_{sol,p}$ = 700 W/m² (tabelle UNI 10349)

A =10m²

U =0,545 W/m²K (calcolo precedente)

$R_{s,est}$ = 0,13 m²K/W (tabella precedente)

a = 0,3 (pareti chiare, tabelle)

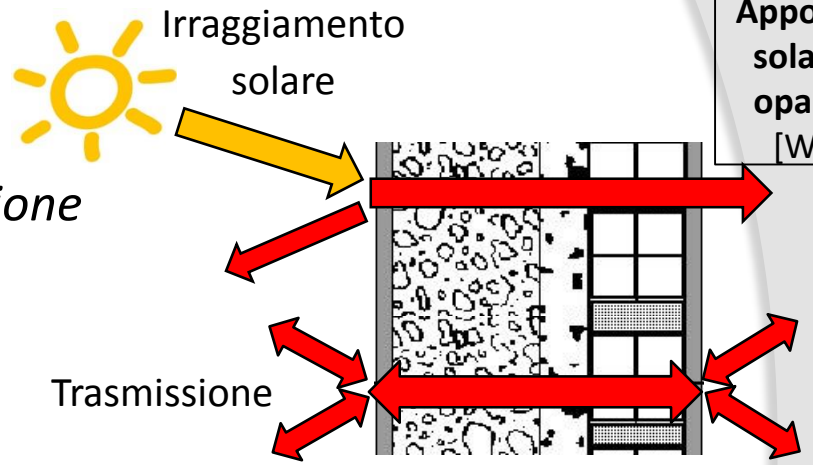
F_{sh} = 1,0 (nessuno schermo solare)

$$q_{sol,o} = F_{sh} a_{sol} R_{s,est} U A I_{sol,p} = 1 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}13 \cdot 0{,}545 \cdot 10 \cdot 700 = 149 W$$

Flussi termici complessivi attraverso le pareti opache

ESEMPIO DI CALCOLO DEL CARICO TERMICO COMPLESSIVO

Calcolare la potenza termica TOTALE che fluisce nella parete opaca in figura.



$q_{sol,o}$
Apporto solare opaco
[W]

q_{tr}
Scambio per trasmissione
[W]

Modalità 1:

Calcolo separato degli scambi per trasmissione e degli apporti solari, poi somma dei due:

$$q_{tot,o} = q_{tr} + q_{sol,o} = 149 + 109 = 258W$$

Modalità 2:

Calcolo unico mediante la temperatura fittizia al sole:

$T_e = 40°C$

$T_i = 20°C$

$$T_f = T_e + F_{sh} a_{sol} I_{sol,p} R_{s,est} = 40 + 1 \cdot 0{,}3 \cdot 700 \cdot 0{,}13 = 67{,}3°C$$

$$q_{tot,o} = AU\left(T_f - T_i\right) = 10 \cdot 0{,}545 \cdot \left(67{,}3 - 20\right) = 258W$$

Involucro edilizio

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO

- Dal punto di vista termico l'involucro si suddivide in:
  - **Pareti opache** (murature e solai)
  - **Pareti vetrate** (infissi)

Pareti opache



Pareti vetrate

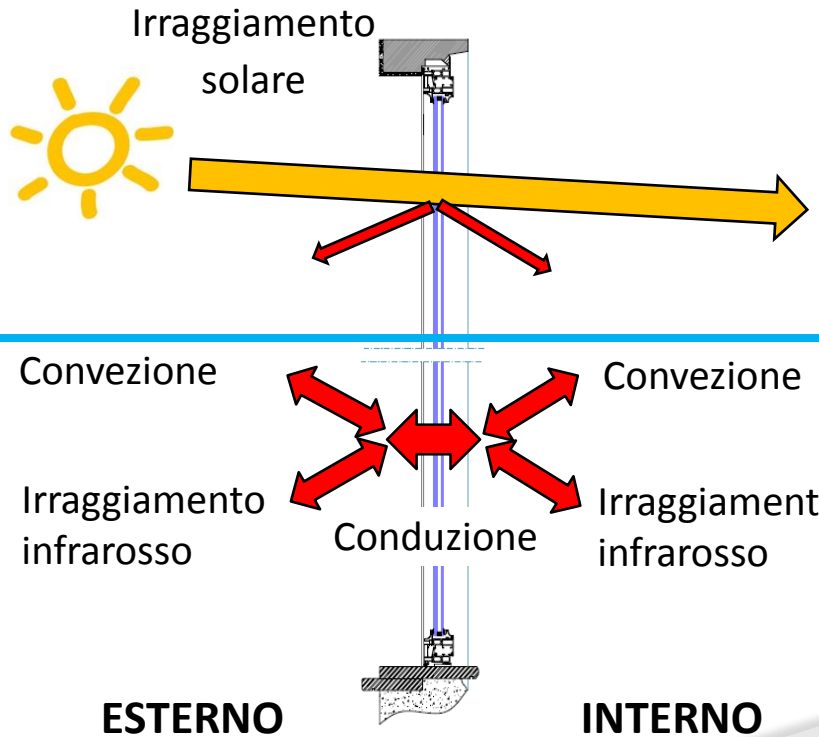


Flussi di calore attraverso le pareti vetrate

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO DELLE PARETI VETRATE

Ai fini del calcolo i vari **meccanismi di trasmissione** del calore si raggruppano in:

- **Scambio termico per trasmissione**
- **Apporti solari** (sia su superficie opaca che trasparente)



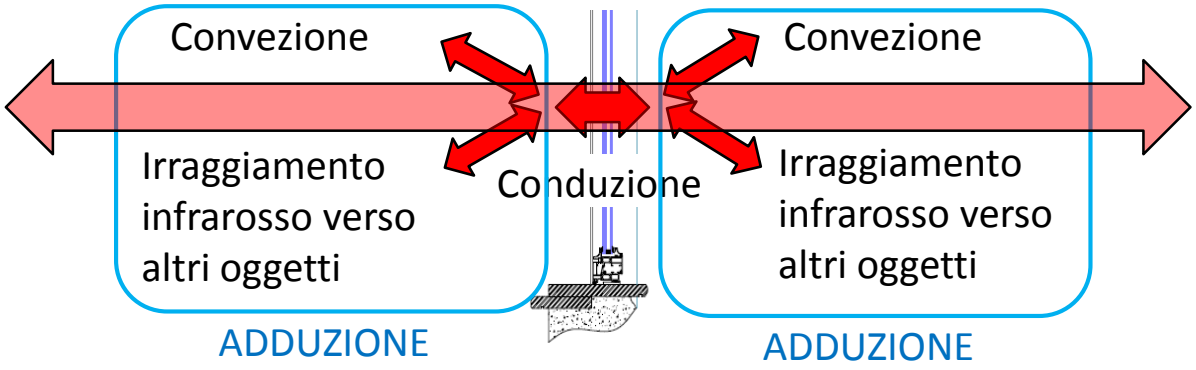
qsol
Apporto solare
[W]

qtr
Scambio per trasmissione
[W]

Flussi termici per trasmissione attraverso le pareti vetrate

SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

- **Come per le pareti opache, i singoli meccanismi di scambio termico** vengono inclusi in un unico flusso di calore che è lo **scambio per trasmissione**.



q_{tr}
Scambio per trasmissione
[W]

- **Calcolo della potenza termica che fluisce per trasmissione**:

$$q_{tr} = H_{tr}\Delta T = AU_{eq}\Delta T$$

q_{tr} = Potenza termica scambiata per trasmissione [W]

H_{tr} = Coeff. di scambio termico per trasmiss. [W/K]

U_{eq} = Trasmittanza termica dell'infisso [W/m²K] = media pesata della Ut trasparente e Uo opaca (telaio).

A_{tot} = Area lorda della parete vetrata [m²] = somma della At trasparente e Ao opaca (telaio).

ΔT = Differenza di temperatura aria esterna – interna [K]

..dove:

$$U_{eq} = \frac{A_t U_t + A_o U_o}{A_{tot}}$$

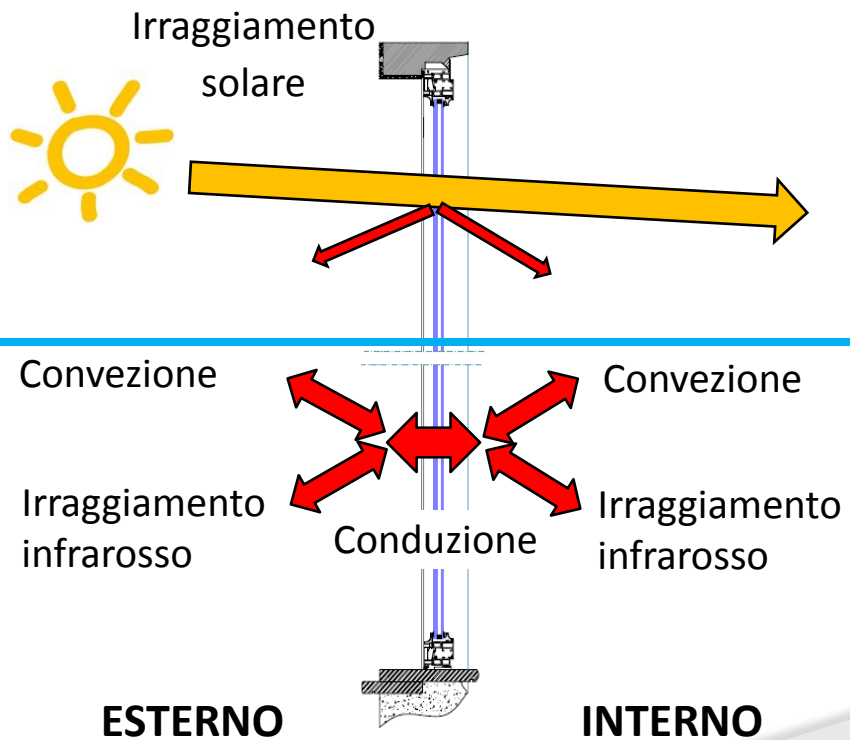
- **IPOTESI DI BASE = STAZIONARIETA'!! (no accumulo di calore nella parete)**

Flussi di calore attraverso le pareti vetrate

MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO DELLE PARETI VETRATE

Ai fini del calcolo i vari **meccanismi di trasmissione** del calore si raggruppano in:

- **Scambio termico per trasmissione**
- **Apporti solari** (sia su superficie opaca che trasparente)



q_{sol}
Apporto solare
[W]

q_{tr}
Scambio per trasmissione
[W]

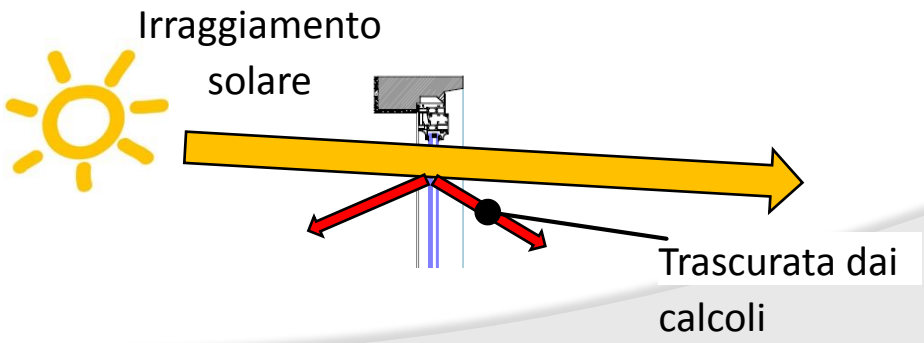
Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti vetrate

APPORTO SOLARE DELLE PARETI VETRATE

- Per le superfici vetrate sono presenti **due componenti**:
  1. **Irraggiamento sulle superfici opache dell'infisso (telaio)**.
     Funziona esattamente come per le pareti opache, con la differenza che si utilizzano i dati relativi al telaio. Riferirsi a quanto detto per le pareti opache.

  2. **Irraggiamento sulle superfici trasparenti dell'infisso (vetratura)**.
     Si calcola come spiegato nella prossima slide.

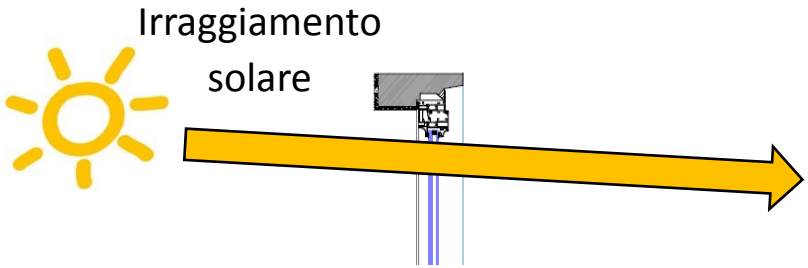
- Normalmente **l'apporto solare trasparente** (n°2) **è preponderante** rispetto a quello opaco (n°1) che quindi viene spesso trascurato nei calcoli.



Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti vetrate

APPORTO SOLARE SULLE SUPERFICI TRASPARENTI

- L'**apporto solare trasparente** (detto anche diretto) si calcola come segue.



$q_{sol,t}$
Apporto solare trasparente [W]

- **Calcolo della potenza termica che fluisce all'interno**:

$$q_{sol,t} = F_{sh}\left(1 - F_F\right) g A I_{sol,p}$$

..dove:

$$g = t + a\frac{U}{h_e}$$

$q_{sol,t}$ = Pot. term. solare portata all'interno dai comp. trasp. [W]
$\bar{I}_{sol,p}$ = Irraggiamento proiettato sulla superficie [W/m^2]
A = Area lorda della finestra[m^2]
g = Coeff. di guadagno solare del vetro [adim]
F_F = Fattore di telaio (frame) [adim]
F_{sh} = Fattore di ombreggiamento (shading) [adim]
t; a = Trasmissività e assorbività solare del vetro [adim]
U; h_e = Trasmittanza e adduttanza esterna del vetro [W/m^{2}K]

- **IPOTESI DI BASE = STAZIONARIETA'!! (no accumulo di calore nella parete)**

Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti vetrate

APPORTO SOLARE DELLE PARETI VETRATE

- Tabella con i dati caratteristici delle vetrature.

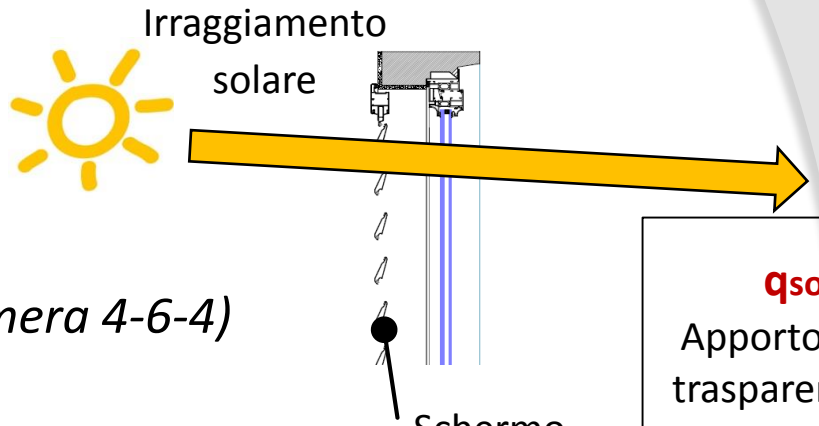
Tipo	Colore	Spessori e proprietà [mm]	Caratteristiche energetiche						Caratteristiche luminose		
			t	r	a	g	C_s	U_g	t	r	**Resa colore**
Singolo	chiaro	4	0,87	0,08	0,05	0,88	1,01	5,8	0,91	0,08	99%
	grigio	4	0,57	0,06	0,37	0,66	0,76	5,8	0,55	0,06	97%
	verde	4	0,53	0,06	0,41	0,63	0,72	5,8	0,79	0,07	92%
Doppio	chiaro-chiaro	4+16 argon+4	0,77	0.14	0.09	0,80	0.92	2,6	0,83	0,15	99%
	chiaro-grigio	4+16 argon+4	0.50	0.08	0.42	0.56	0.64	2.6	0.50	0.08	96%
	grigio-chiaro	4+16 argon+4	0.50	0.12	0.38	0.72	0.83	2.6	0.50	0.13	96%
	grigio-grigio	4+16 argon+4	0.34	0.08	0.58	0.51	0.59	2.6	0.31	0.08	94%
	chiaro-verde	4+16 argon+4	0.47	0.13	0.40	0.71	0.81	2.6	0.72	0.14	91%
	chiaro-chiaro	4+16 argon+b.e.+4	0,66	0.19	0.15	0,74	0.85	1.3	0.81	0.13	99%
	chiaro-grigio	4+b.e.+16 argon+4	0,36	0.27	0.37	0,56	0.65	1.1	0.49	0.11	96%
	chiaro-verde	4+b.e.+16 argon+4	0,39	0.27	0.34	0,58	0.67	1.1	0.70	0.12	96%
	chiaro-chiaro	4+c.s.+16 argon+4	0,17	0.21	0.62	0,24	0.27	2.4	0.21	0.22	98%
	chiaro-grigio	4+c.s.+16 argon+4	0,11	0.21	0.68	0,22	0.25	2.4	0.12	0.21	95%
	chiaro-verde	4+c.s.+16 argon+4	0,11	0.29	0.60	0,21	0.24	2.4	0.17	0.33	84%
	chiaro-chiaro	4+c.s.+16 argon+b.e.+4	0,15	0.21	0.64	0,20	0.23	1.3	0.20	0.21	98%
Triplo	chiaro-chiaro-chiaro	4+14+4+14+4	0.68	0.19	0.13	0.73	0.84	1.7	0.76	0.21	98%
	grigio-grigio-grigio	4+14+4+14+4	0.20	0.09	0.72	0.41	0.47	1.7	0.17	0.08	91%
	verde-verde-verde	4+14+4+14+4	0.23	0.09	0.68	0.40	0.46	1.7	0.50	0.15	78%
	chiaro-chiaro-chiaro	4+14+4+14+b.e.+4	0.58	0.22	0.20	0.64	0.74	1.0	0.74	0.19	98%
	chiaro-chiaro-chiaro	4+c.s.+14+4+14+4	0.16	0.21	0.63	0.21	0.24	1.6	0.19	0.22	98%
	chiaro-chiaro-chiaro	4+c.s.+14+4+14+b.e.+4	0.14	0.21	0.65	0.18	0.21	1.0	0.19	0.22	97%

b.e.= basso emissivo; c.s.= controllo solare

Flussi termici per irraggiamento attraverso le pareti vetrate

ESEMPIO DI CALCOLO DELL'APPORTO SOLARE SU PARETI VETRATE

Calcolare la potenza termica per irraggiamento che fluisce nella parete in figura con:



$I_{sol,p}$ = 700 W/m² (tabelle UNI 10349)

A =10m²

U =3,20 W/m²K (valore tipico vetrocamera 4-6-4)

g = 0,85 (tabelle letteratura)

$F_F = A_{telaio}/A = 0,2$

F_{sh} = 0,5 (tabelle letteratura)

$$q_{sol,t} = F_{sh}(1-F_F)gAI_{sol,p} = 0,5\cdot(1-0,2)\cdot 0,85\cdot 10\cdot 700 = 2380\,W$$

Trasmissione del calore negli edifici

ANALISI DEGLI SCAMBI TERMICI

Per conoscere il comportamento energetico del sistema-edificio occorre **studiare i singoli flussi termici** scambiati con l'esterno oppure generati all'interno:

1. **Flussi di calore attraverso l'involucro**:
   - **pareti opache**
   - **pareti vetrate**
   - **ponti termici**
2. **Flussi di calore per ventilazione e infiltrazioni**
3. **Apporti interni**

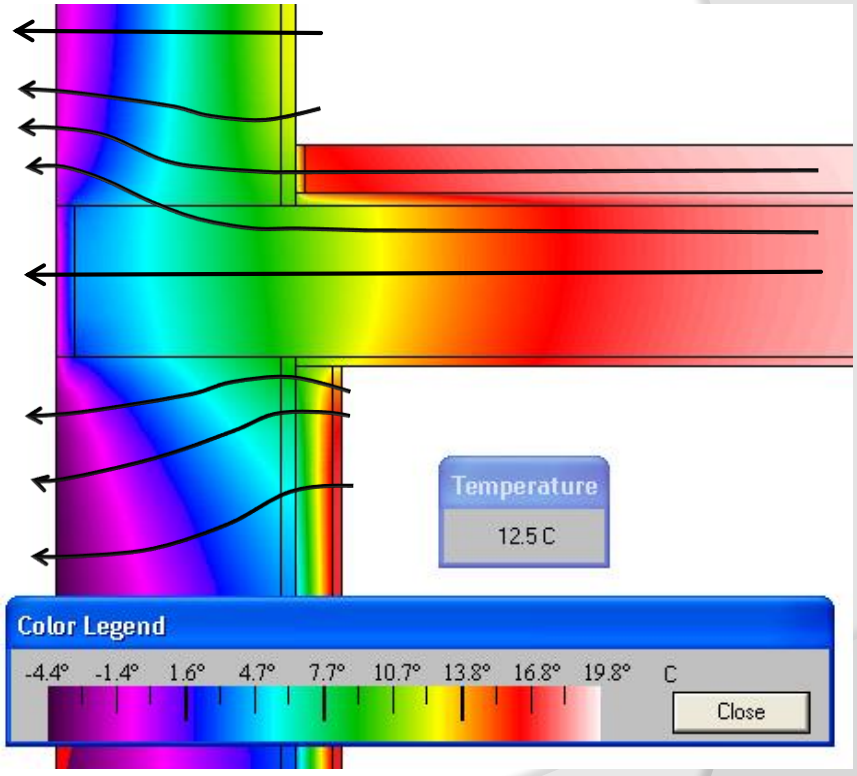
Flussi di calore da ponti termici

PONTI TERMICI

- Il ponte termico consiste in una **configurazione strutturale o geometrica** che produce una **deviazione del flusso termico dalla condizione monodimensionale** (fin qui studiata).

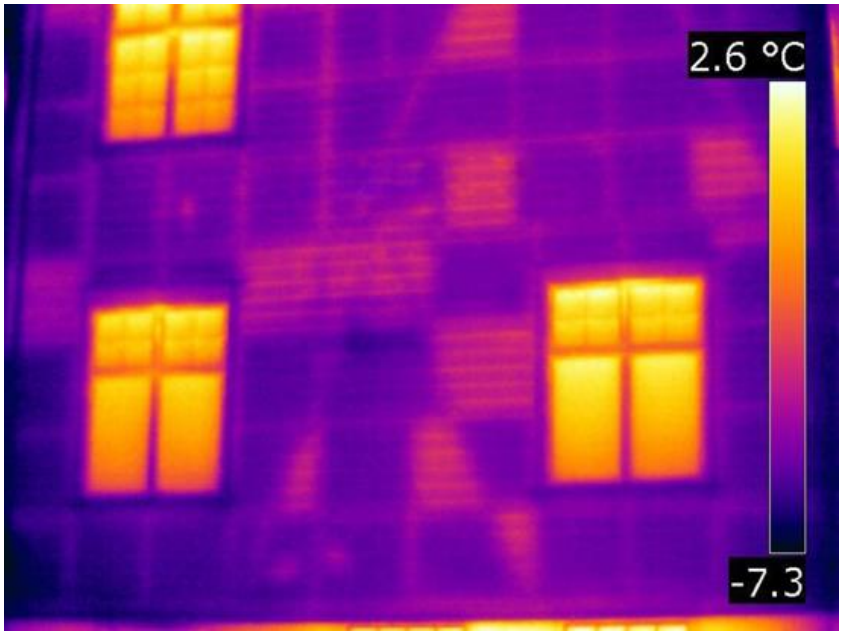
- L'effetto è una variazione del flusso termico trasmesso rispetto al caso monodimensionale, ossia una **variazione della trasmittanza effettiva**.

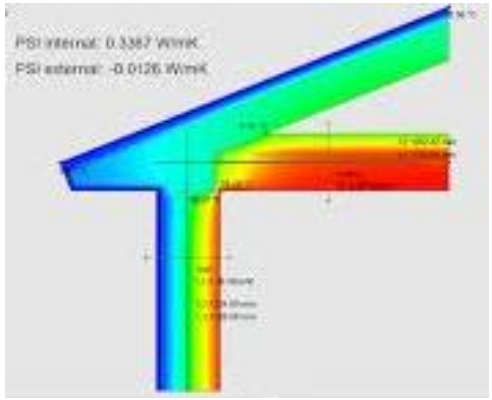
- **Gli scambi di calore in presenza di ponti termici sono sempre superiori a quelli in loro assenza**.



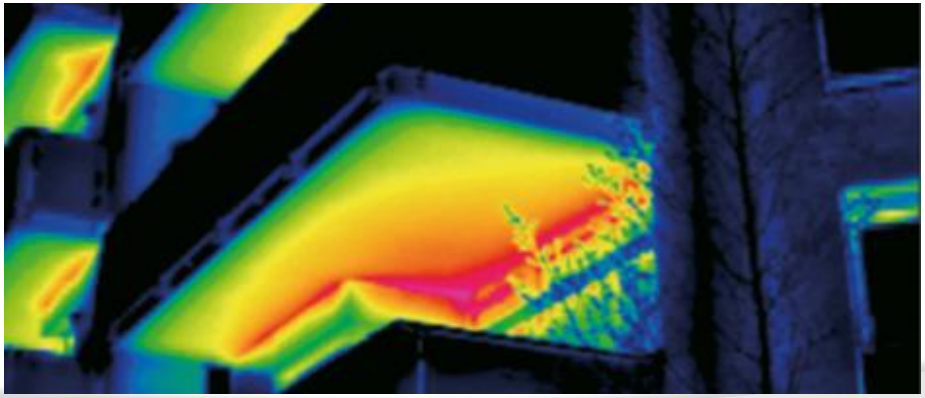
Flussi di calore da ponti termici

ESEMPI DI PONTI TERMICI









Flussi di calore da ponti termici

CLASSIFICAZIONE DEI PONTI TERMICI

- In base alle **cause**:
  1. **disomogeneità materica**;
     1. variazione del materiale costruttivo (es. pilastro in c.a. su parete in laterizio, trave in c.a. su solaio in latero-cemento, affiancamento di materiali diversi, interruzione dell'isolamento, ecc).
  2. **disomogeneità geometrica:**
     1. variazioni di spessore (es. nicchie, cavedi);
     2. differenza tra l'area disperdente esterna ed interna (es. spigoli).

- In base alla **geometria del flusso**:
  1. **lineari** (flusso bidimensionale);
  2. **puntuali** (flusso tridimensionale).

Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO DEI PONTI TERMICI

- Nella zona del **ponte termico cadono le ipotesi** di mono-dimensionalità perciò **non valgono le formule di trasmissione termica viste fin qui**.

- Ci sono **tre possibilità di calcolo** (a complessità decrescente):
  1. **soluzione analitica o numerica dell'eq. generale della conduzione** per configurazioni bidimensionali e/o tridimensionali (norma EN ISO 10211:2008);
  2. calcolo consueto dei **flussi termici monodimensionali con l'aggiunta di correzioni** dovute ai ponti termici (**atlante dei ponti termici** norma UNI EN ISO 14683);
  3. calcolo consueto dei **flussi termici monodimensionali con l'aggiunta di un incremento percentuale forfettario** dovuto ai ponti termici in relazione alla tipologia edilizia (norma UNI TS 11300-1).

- Verranno analizzate di seguito le modalità 2 e 3.

Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO MEDIANTE ATLANTE DEI PONTI TERMICI (norma UNI EN ISO 14683)

- **Il procedimento** da seguire è il seguente:
  1. **individuazione** dei ponti termici;
  2. **calcolo della trasmittanza del ponte termico** in base alle **formule sotto riportate** e alle **tipologie standardizzate** riportate in normativa;
  3. **calcolo del flusso di calore** dovuto al ponte termico da sommare al flusso monodimensionale della parete.

$$q_{pt} = H_{pt} \Delta T$$

q_{pt} = Potenza termica aggiuntiva per ponti termici [W]

H_{pt} = Coeff. di scambio termico ponti termici [W/K]

...dove:

$$H_{pt} = \sum_k \Psi_k l_k + \sum_j \chi_j$$

Ψ_k = **Trasmittanza lineica** ponte termico lineare k-esimo (si leggi "psi") **[W/mK]**

l_k = **Lunghezza** ponte termico lineare k-esimo [m]

χ_j = **Trasmittanza puntuale** ponte termico puntuale j-esimo (si legge "chi") **[W/K]**

Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO MEDIANTE ATLANTE DEI PONTI TERMICI (norma UNI EN ISO 14683)

- **La normativa non prende in considerazione il calcolo dei ponti termici puntuali** poiché si considera che siano **in gran parte trascurabili** (esempio: spigoli all'incrocio tra 3 pareti).
- **Nel caso in cui non siano trascurabili** devono **essere considerati all'interno dei valori di conduciblità termica dei singoli materiali**. Ad esempio la norma UNI 10351 introduce dei fattori correttivi per materiali la cui posa tende a creare ponti termici puntuali (in questo caso: i perni di fissaggio delle lastre isolanti):

Materie plastiche cellulari

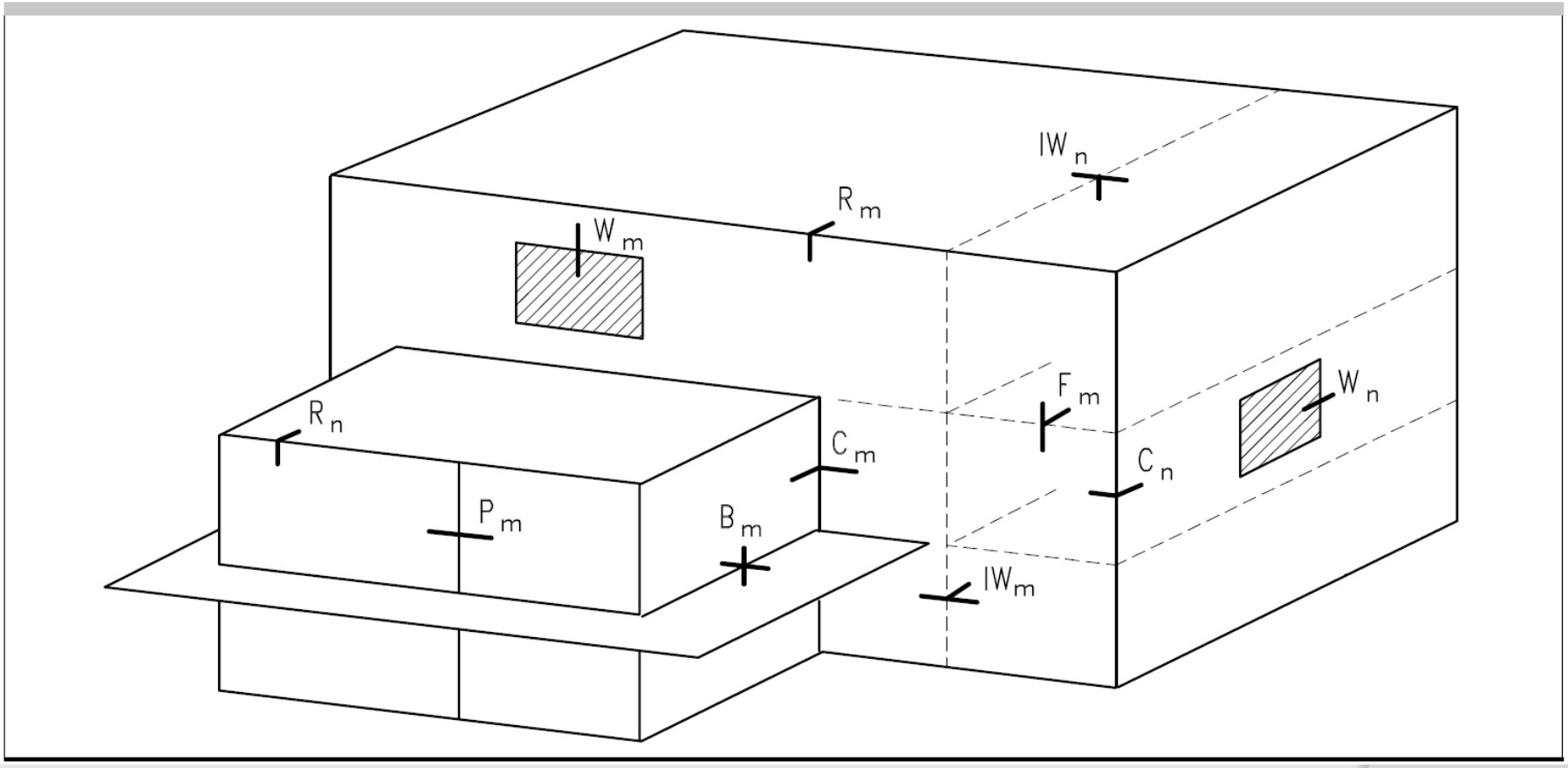
Le conduttività di riferimento sono valide per materiali prodotti da non meno di 100 d (giorni). Per temperature medie comprese tra 270 e 320 K la conduttività delle materie plastiche cellulari aumenta da 0,4 a 0,5% / K al crescere della temperatura media del materiale. Sul valore di *m* le tolleranze di spessore riferite a lastre di 10 cm di spessore, incidono dall'1 al 3%; l'effetto dell'installazione per incollaggio accostamento, incastro o battentatura, ecc. incide dall'1 al 3%, per montaggi che impiegano staffe o altri sistemi che introducono ponti termici, maggiorare i dati di calcolo almeno del 5%. Per montaggi contro il terreno maggiorare i dati di calcolo dal 10 al 25%[4]. Per i materiali leggeri le resistenze termiche specifiche non sono rigorosamente additive; ricalcolare la resistenza termica specifica totale di ciascun manufatto o di ciascun isolamento composto da più strati sovrapposti di resistenza termica specifica nota. Qualora sia fornita, per un determinato materiale, una correlazione tra la conduttività a 100 d dalla produzione e la conduttività ad un diverso numero di giorni dalla produzione, si possono ricalcolare i valori di *m*.

Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO MEDIANTE ATLANTE DEI PONTI TERMICI (norma UNI EN ISO 14683)

- Per quanto riguarda i **ponti termici lineari** **la norma fornisce un'immagine di guida per individuarli**:

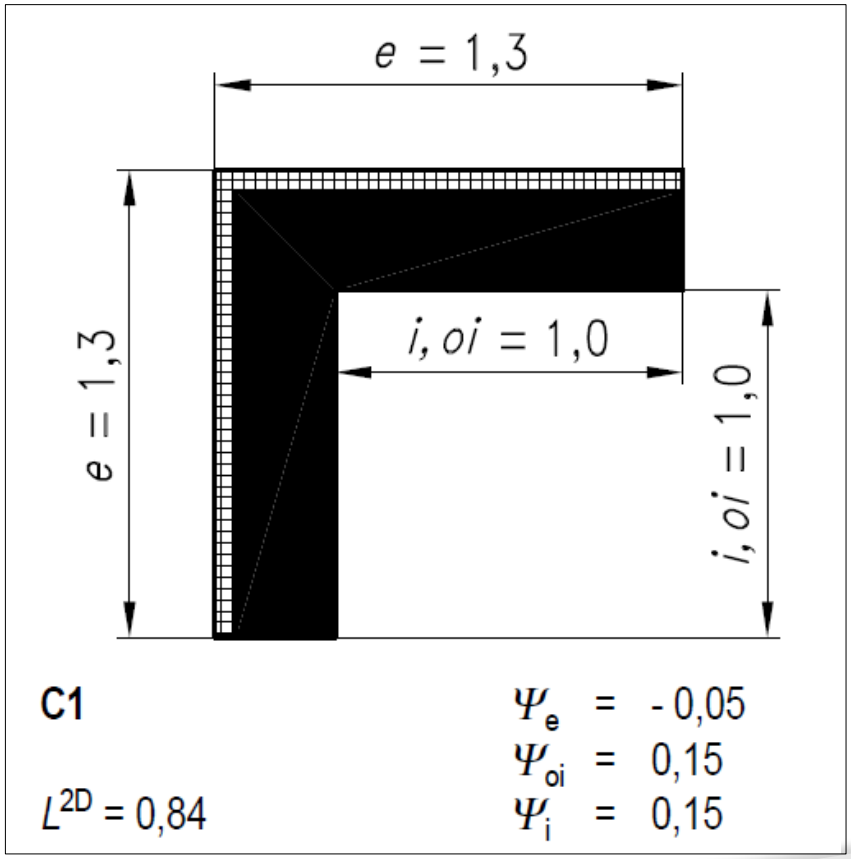
figura 1 **Edificio che mostra la posizione e le tipologie di ponti termici che si verificano di frequente in un edificio in accordo con lo schema riportato nel prospetto 2**



Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO MEDIANTE ATLANTE DEI PONTI TERMICI (norma UNI EN ISO 14683)

- **Per ogni tipologia di ponte termico** la norma fornisce un **disegno esplicativo** ed i valori dei **parametri di scambio termico**.
- Nella figura seguente l'esempio di un ponte termico dovuto ad uno spigolo.



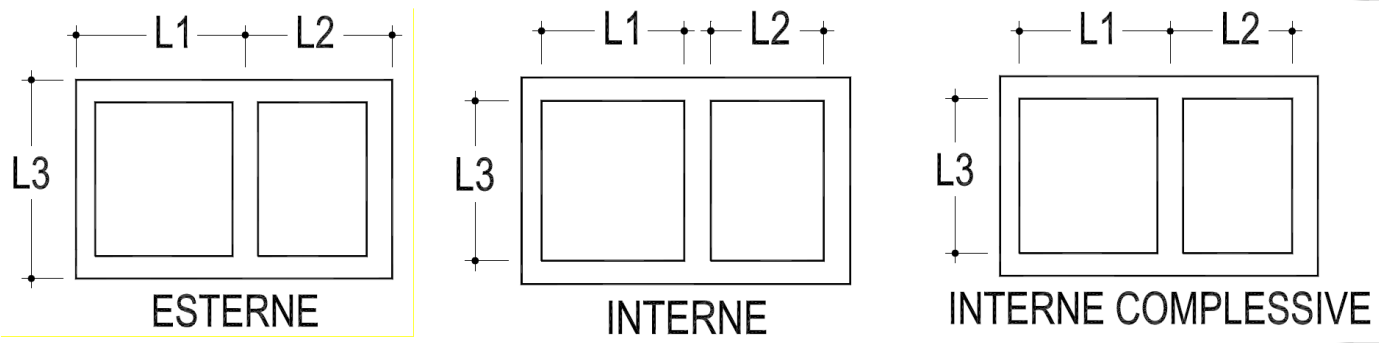
...dove:

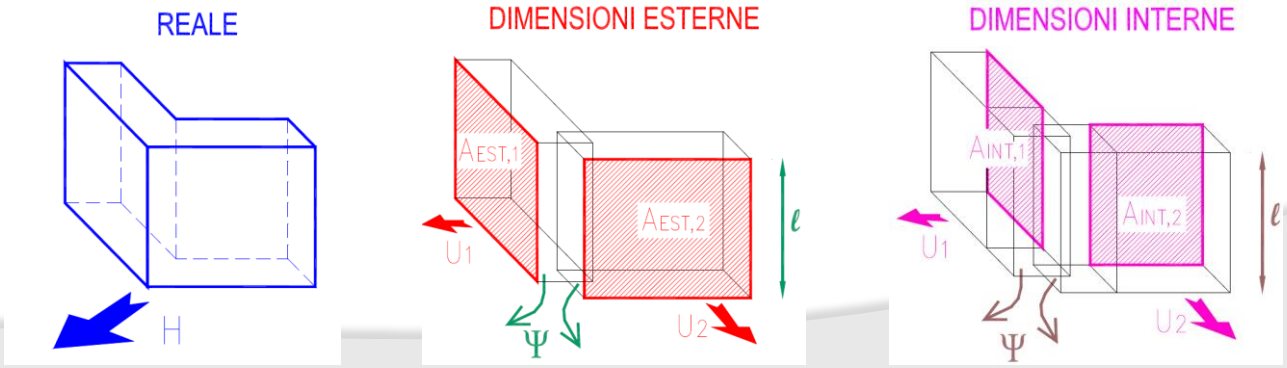
- $\mathbf{L^{2D}}$ = Coeff. scambio termico bidimensionale della struttura ($=H_{mono} + H_{pt}$) ;
- $\mathbf{\Psi_e}$ = Trasm. lineica ponte termico basato su dim. esterne;
- $\mathbf{\Psi_{oi}}$ = Trasm. lineica ponte termico basato su dim. totali interne;
- $\mathbf{\Psi_i}$ = Trasm. lineica ponte termico basato su dim. interne;

Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO MEDIANTE ATLANTE DEI PONTI TERMICI (norma UNI EN ISO 14683)

- La norma prevede l'utilizzo di **3 sistemi di definizione delle dimensioni**:
  - **Interne**: misurate tra le superfici interne finite (escluse partizioni interne);
  - **Interne totali**: misurate tra le superfici interne finite (incluse partizioni interne);
  - **Esterne**: misurate tra le superfici esterne finite dell'edificio.





Flussi di calore da ponti termici

CALCOLO MEDIANTE INCREMENTO PERCENTUALE FORFETTARIO (norma UNI/TS 11300)

- La norma UNI EN ISO 14683 forniva la seguente tabella con le **maggiorazioni percentuali da applicare al flusso termico monodimensionale** per tenere in considerazione i ponti termici:

Maggiorazioni percentuali relative alla presenza dei ponti termici [%]

Descrizione della struttura	Maggiorazione[11)]
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) senza aggetti/balconi e ponti termici corretti	5
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) con aggetti/balconi	15
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

- Le maggiorazioni si applicano alle dispersioni della parete opaca e tengono conto anche dei ponti termici relativi ai serramenti.
- Con la **nuova norma UNI/TS 11300:2014 non è più possibile utilizzare questo metodo di calcolo** per la certificazione energetica.

Flussi termici per trasmissione verso locali non climatizzati

SCAMBIO TERMICO VERSO LOCALI NON CLIMATIZZATI

- Nel caso in cui **il generico componente edilizio confini** non con l'esterno ma **con locali non climatizzati** (esempio: vano scale, vano ascensore, garage, magazzino, ecc), **il procedimento è il seguente**:
  - **Si calcola la trasmittanza del componente come di consueto**, inserendo i valori appropriati delle resistenze termiche liminari.
  - **Si calcola lo scambio termico Q=HΔT** considerando che la temperatura dello spazio non climatizzato sarà diversa da quella esterna.
  - **Se tale temperatura non è nota** si può usare la **seguente formula alternativa** che utilizza il solito ΔT esterno-interno e introduce un **coefficiente riduttivo b_{tr}**:

$$q_{tr,nc} = AUb_{tr}\Delta T$$

$$H_{tr,nc} = AUb_{tr}$$

$q_{tr,nc}$ = Potenza termica scambiata per trasmissione verso locale non climatizzato [W]

$H_{tr,nc}$ = Coeff. di scambio termico per trasmiss. con locali non climatizzati [W/K]

b_{tr} = Fattore di riduzione del salto termico dovuto allo spazio non climatizzato [adim], tabellato nella norma UNI TS 11300-1:2014

ΔT = Differenza di temperatura aria esterna – interna [K]

Flussi termici per trasmissione verso locali non climatizzati

SCAMBIO TERMICO VERSO LOCALI NON CLIMATIZZATI

b_{tr} = Fattore di riduzione del ΔT esterno dovuto allo spazio non climatizzato [adim] (Norma UNI TS 11300-1:2014)

Fattore di correzione $b_{tr,x}$

Ambiente confinante	$b_{tr,x}$
Ambiente	
- con una parete esterna	0,4
- senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne	0,5
- con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne (per esempio autorimesse)	0,6
- con tre pareti esterne (per esempio vani scala esterni)	0,8
Piano interrato o seminterrato	
- senza finestre o serramenti esterni	0,5
- con finestre o serramenti esterni	0,8
Sottotetto	
- tasso di ventilazione del sottotetto elevato (per esempio tetti ricoperti con tegole o altri materiali di copertura discontinua) senza rivestimento con feltro o assito	1,0
- altro tetto non isolato	0,9
- tetto isolato	0,7
Aree interne di circolazione (senza muri esterni e con tasso di ricambio d'aria minore di 0,5 h^{-1})	0,0
Aree interne di circolazione liberamente ventilate (rapporto tra l'area delle aperture e volume dell'ambiente maggiore di 0,005 m^2/m^3)	1,0

Trasmissione del calore negli edifici

ANALISI DEGLI SCAMBI TERMICI

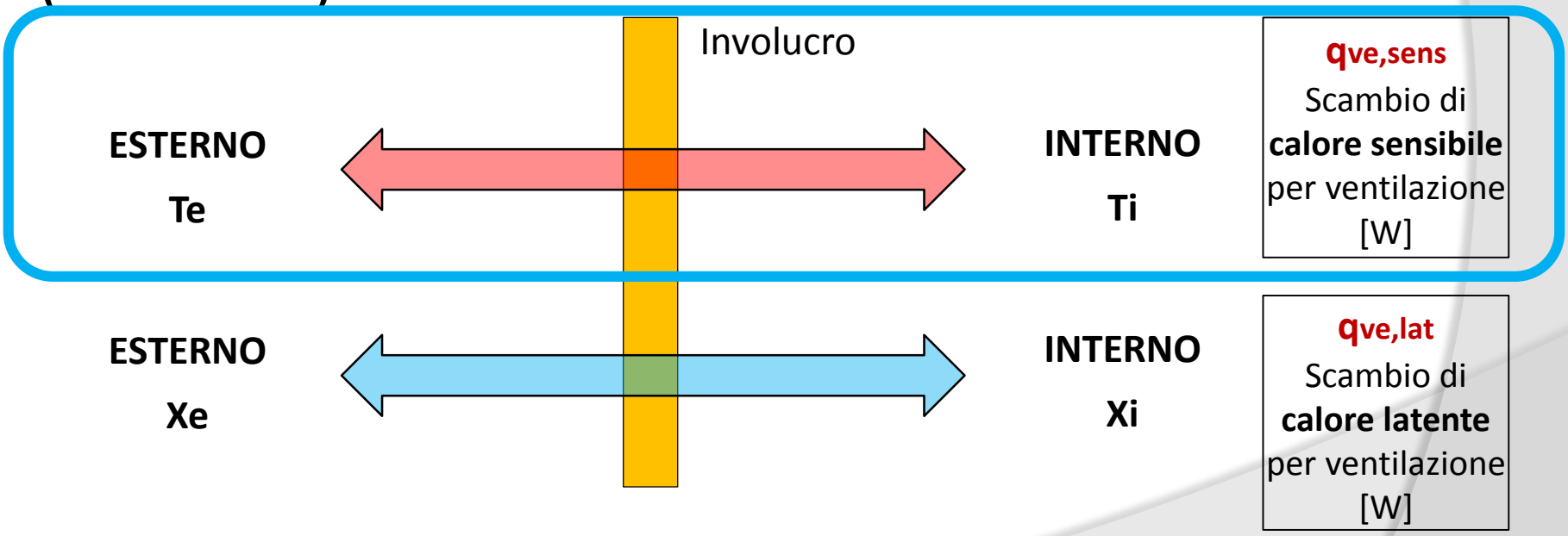
Per conoscere il comportamento energetico del sistema-edificio occorre **studiare i singoli flussi termici** scambiati con l'esterno oppure generati all'interno:

1. **Flussi di calore attraverso l'involucro**:
   - **pareti opache**
   - **pareti vetrate**
   - **ponti termici**
2. **Flussi di calore per ventilazione e infiltrazioni**
3. **Apporti interni**

Flussi termici per ventilazione ed infiltrazioni

SCAMBIO TERMICO SENSIBILE E LATENTE

- **Scambio di massa ed energia** tra l'aria interna e quella esterna.
  - **Ventilazione** = scambio intenzionale
  - **Infiltrazioni** = scambio non intenzionale
- Lo scambio di massa implica anche uno scambio del vapore disciolto nell'aria, perciò si crea un doppio scambio, **sia termico (calore sensibile) che di vapore (calore latente).**

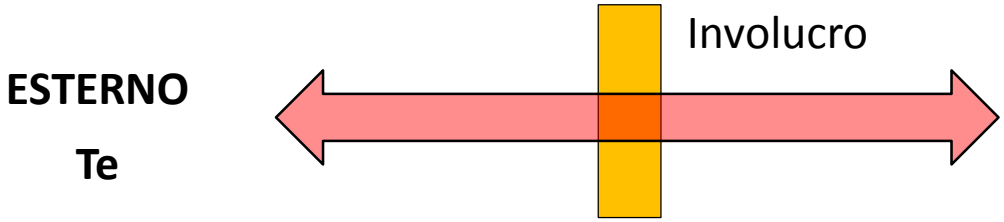


- **Al momento viene affrontato solo il calcolo del flusso sensibile.** Lo studio del calore latente verrà effettuato nelle lezioni di psicrometria.

Flussi termici per ventilazione ed infiltrazioni

SCAMBIO TERMICO SENSIBILE

- **Scambio termico sensibile** per ventilazione ed infiltrazioni:



qve,sens
Scambio di **calore sensibile** per ventilazione [W]

- **Calcolo della potenza termica sensibile**:

$$q_{ve,sens} = \rho c_p g_{ve} \Delta T$$

$q_{ve,sens}$ = Potenza sensibile scambiata per ventilazione [W]
ρ = Densità dell'aria ≈ 1,2 kg/m^3
c_p = Calore specifico a pressione costante ≈ 1000 J/kgK
g_{ve} = Portata d'aria esterna [m^3/s]
ΔT = Differenza di temperatura aria esterna - interna [K]

..dove:

$$g_{ve} = \frac{nV}{3600}$$

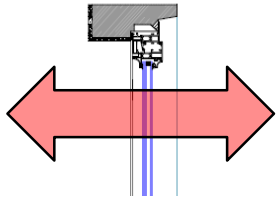
n = Numero ricambi d'aria ambiente ogni ora [1/h]
V = Volume dell'ambiente[m^3]
3600 = Numero di secondi in ogni ora

- Questa formula può essere usata con sufficiente accuratezza **sia in regime stazionario che dinamico** poiché l'inerzia termica dell'aria è trascurabile.

Flussi termici per ventilazione ed infiltrazioni

ESEMPIO DI CALCOLO DELLO SCAMBIO TERMICO SENSIBILE PER VENTILAZIONE

Calcolare la potenza termica legata al ricambio d'aria ambiente:



q_{ve_sens}
Scambio di **calore sensibile** per ventilazione [W]

$\rho c_p = 1200\ J/m^3K$ *(valori standard)*

$\Delta T = 20K$

$n = 0{,}5$ *ricambi/ora (valore tipico per abitazioni)*

$V = 50\ m^3$ *(una stanza)*

$$g_{ve} = \frac{nV}{3600} = \frac{0{,}5 \cdot 50}{3600} = 6{,}9 \cdot 10^{-3} m^3 / s$$

$$q_{ve} = \rho c_p g_{ve} \Delta T = 1200 \cdot 6{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 165{,}6 W$$

Trasmissione del calore negli edifici

ANALISI DEGLI SCAMBI TERMICI

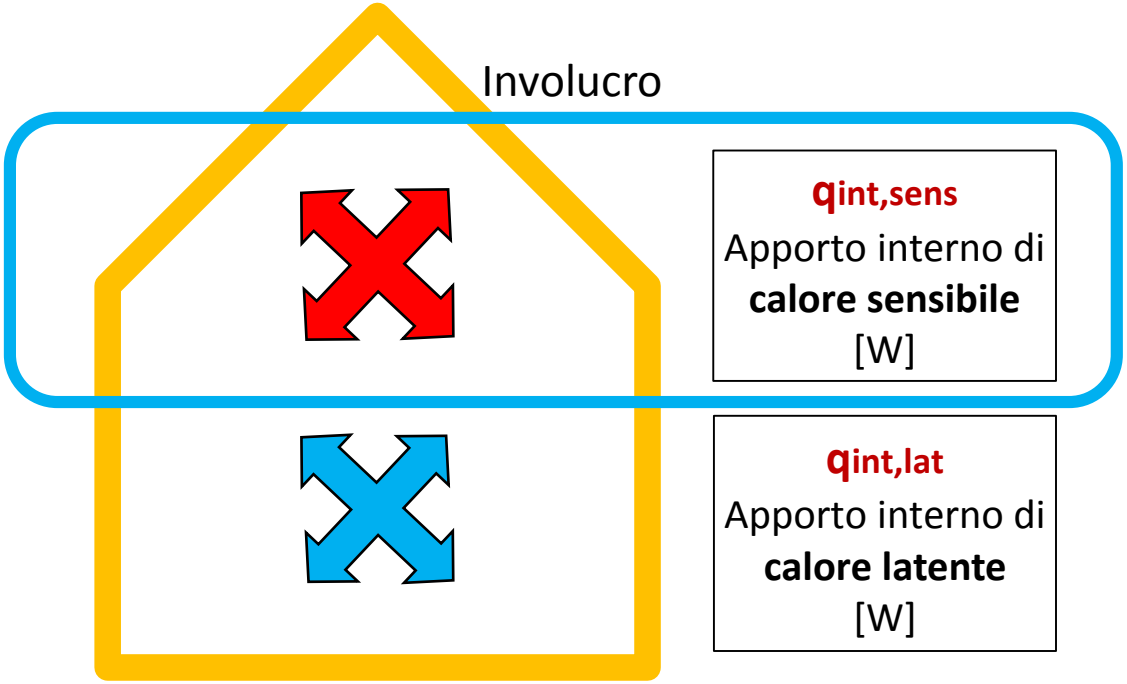
Per conoscere il comportamento energetico del sistema-edificio occorre **studiare i singoli flussi termici** scambiati con l'esterno oppure generati all'interno:

1. **Flussi di calore attraverso l'involucro**:
   - **pareti opache**
   - **pareti vetrate**
   - **ponti termici**
2. **Flussi di calore per ventilazione e infiltrazioni**
3. **Apporti interni**

Flussi termici per apporti interni

APPORTI SENSIBILI E LATENTI

- **Gli apporti interni sono flussi termici** (**calore sensibile**) **e di vapore** (**calore latente**) **prodotti da sorgenti interne agli ambienti** (esempi: persone, apparecchiature, illuminazione, utilizzo di acqua calda, perdite termiche degli impianti, ecc).

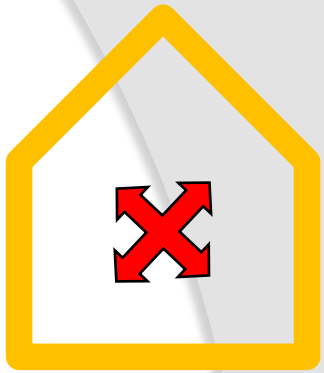


- **Al momento viene affrontato il calcolo del solo flusso sensibile.** Lo studio del calore latente verrà effettuato nelle lezioni di psicrometria.

Flussi termici per apporti interni

APPORTI INTERNI SENSIBILI

- **Gli apporti interni sensibili sono "iniezioni termiche" in ambiente dovute a corpi che disperdono calore in modo non intenzionale** (esempi: persone, apparecchiature, illuminazione, utilizzo di acqua calda, perdite termiche degli impianti, ecc).



qint,sens
Apporto interno di **calore sensibile** [W]

- **Calcolo della potenza termica sensibile per apporti interni**:

$$q_{\text{int},sens} = \sum_{k=1}^{N} q_{k,sens}$$

$q_{\text{int},sens}$ = **Potenza sensibile per apporti interni [W]**

$q_{k,sens}$ = Potenza sensibile del singolo apporto [W]

- Questa formula può essere usata con sufficiente accuratezza **sia in regime stazionario che dinamico solo per gli apporti che riscaldano direttamente l'aria ambiente** (tramite moti convettivi). Per gli altri è necessario un calcolo che tenga conto dell'inerzia termica delle strutture.

Trasmissione del calore negli edifici

CONCLUSIONI

Lo studio dei singoli flussi è completo:

1. **Flussi di calore attraverso l'involucro**:
   - **pareti opache**
   - **pareti vetrate**
   - **ponti termici**
2. **Flussi di calore per ventilazione e infiltrazioni**
3. **Apporti interni**



..e ora?

A questo punto occorre **combinare gli scambi termici calcolati per determinare il comportamento complessivo dell'edificio**.

GRAZIE DELL' ATTENZIONE

Ing. Marco Cecconi

marco.cecconi@ingenergia.it



IngEnergia

Condivisione della ricerca
sull'efficienza energetica