



# Corso Impianti Termotecnici e Riqualificazione Energetica

## Strutture non omogenee

maggio 2021



## Programma

- Strutture non omogenee
- Reti resistive equivalent
- Calcolo della resistenza
- Calcolo della trasmittanza equivalente
- esempio



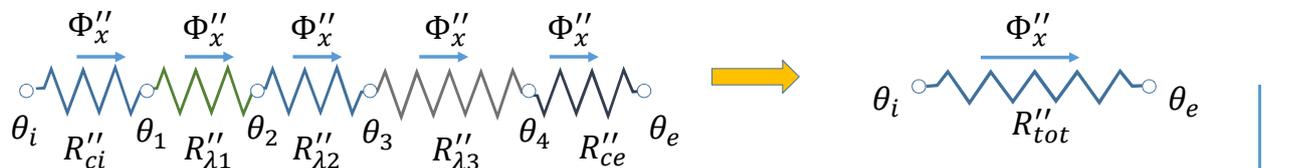


## Reti equivalenti, parete composta

- Pareti multistrato
- Risolvo con rete equivalente

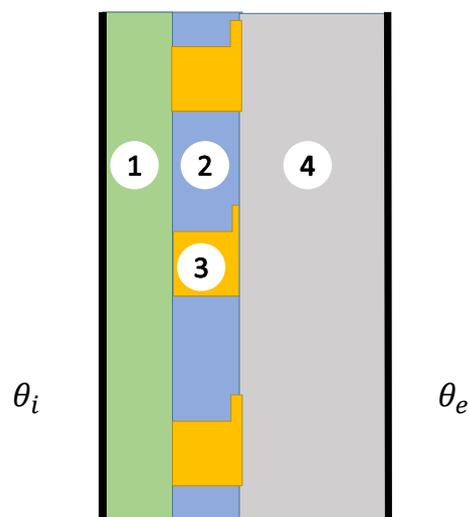
$$\Phi_x'' = \frac{\theta_i - \theta_e}{R_{tot}''}$$

$$R_{tot}'' = R_{ci} + \sum_j R_{\lambda,j} + R_{ce}$$



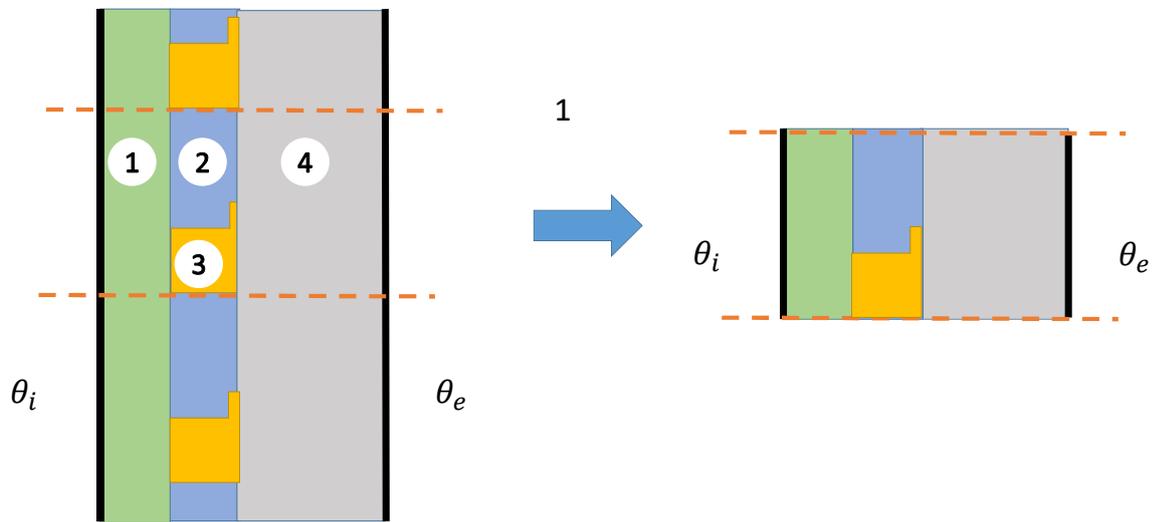
## Caso di strato non omogeneo

- Situazione con materiale disomogeneo
- Caratteristiche dei materiali differenti
- Situazione molto comune
- Esempio: montanti con isolamento interno

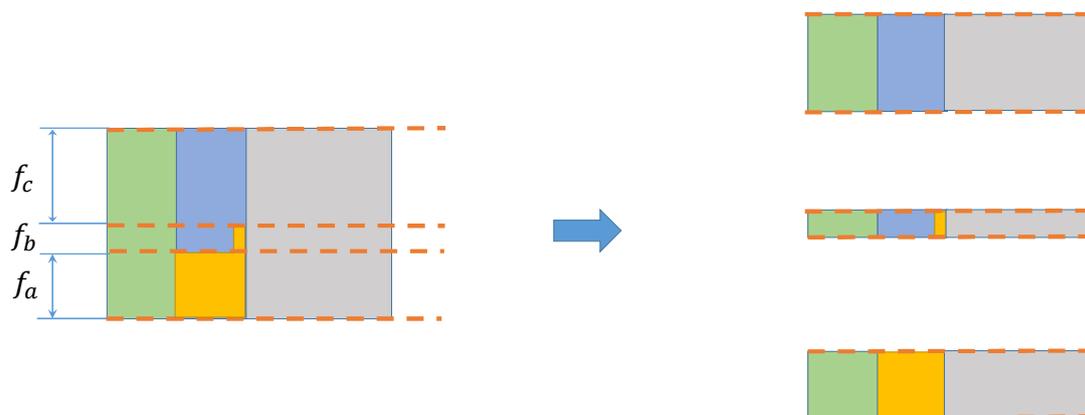




## Modulo ripetitivo

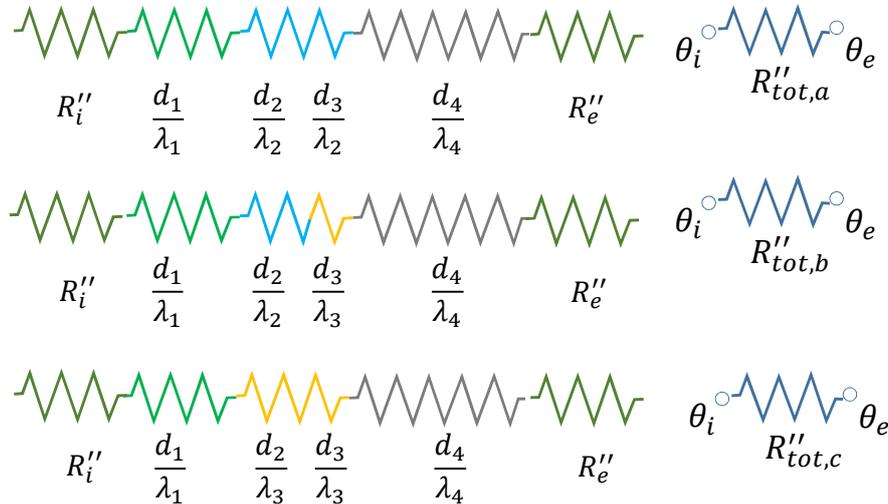
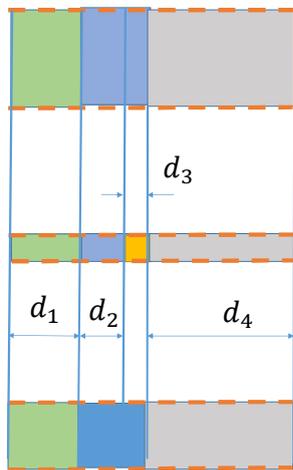


## Limite superiore della resistenza



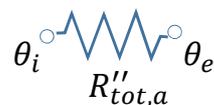


## Strutture non omogenee

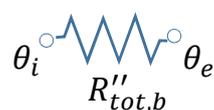


## Limite superiore della resistenza

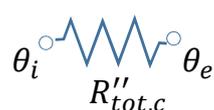
$$R''_{tot,a} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_2} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_e}$$



$$R''_{tot,b} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_e}$$



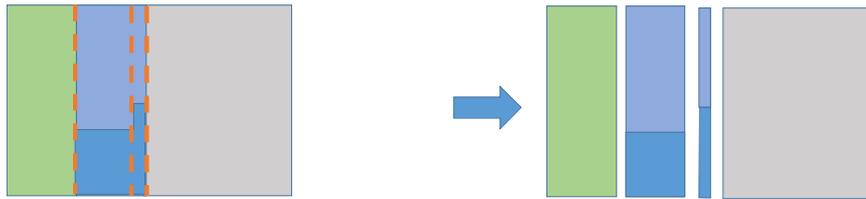
$$R''_{tot,c} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_3} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_e}$$



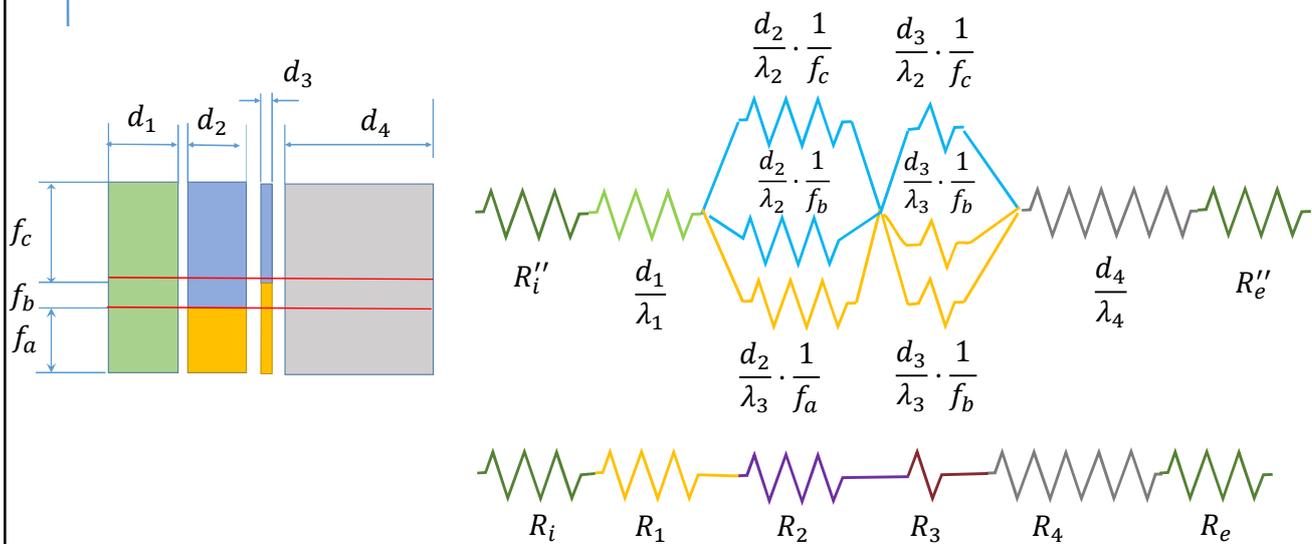
$$\frac{1}{R''_{tot,sup}} = \frac{f_a}{R''_{tot,a}} + \frac{f_b}{R''_{tot,b}} + \frac{f_c}{R''_{tot,c}}$$



## Limite inferiore della resistenza



## Limite Inferiore





## Limite Inferiore

$$R_1 = \left( \frac{1}{d_1/\lambda_1} \right)^{-1}$$

$$R_2 = \left( \frac{f_c}{d_2/\lambda_2} + \frac{f_b}{d_2/\lambda_2} + \frac{f_a}{d_2/\lambda_3} \right)^{-1}$$

$$R_3 = \left( \frac{f_c}{d_3/\lambda_2} + \frac{f_b}{d_3/\lambda_3} + \frac{f_a}{d_3/\lambda_3} \right)^{-1}$$

$$R_4 = \left( \frac{1}{d_4/\lambda_4} \right)^{-1}$$

$$R_{tot,inf} = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_e$$

$$R_{tot} = \frac{R_{tot,inf} + R_{tot,sup}}{2}$$



## Esempio di calcolo

$$d_1 = 0,0125 \text{ m}; d_2 = 0,03 \text{ m}; d_3 = 0,32 \text{ m}$$

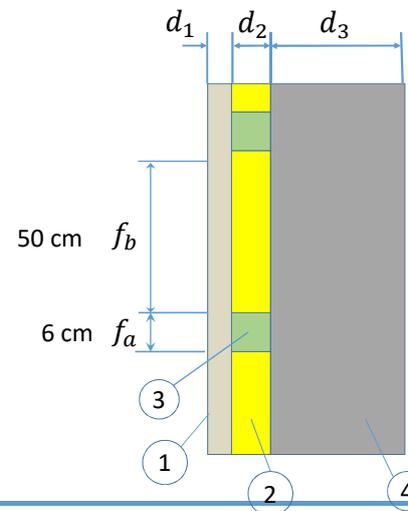
$$\lambda_1 = 0,2, \lambda_2 = 0,032, \lambda_3 = 0,12, \lambda_4 = 0,8 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$f_a = \frac{6}{56} = 0,107; f_b = \frac{50}{56} = 0,893$$

$$R_{tot,a} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_3} + \frac{d_3}{\lambda_4} + R_{se} = 1,612 \frac{m^2 K}{W}$$

$$R_{tot,b} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_4} + R_{se} = 2,758 \frac{m^2 K}{W}$$

$$R_{tot,sup} = \left( \frac{f_a}{R_{tot,a}} + \frac{f_b}{R_{tot,b}} \right)^{-1} = 2,562 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$





## Esempio di calcolo

$$f_a = \frac{6}{56} = 0,107; f_b = \frac{50}{56} = 0,893$$

$$R_{tot,1} = \frac{d_1}{\lambda_1} = 0,625 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{tot,2} = \left( \frac{f_a}{\lambda_3} + \frac{f_b}{\lambda_2} \right)^{-1} = 1,207 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

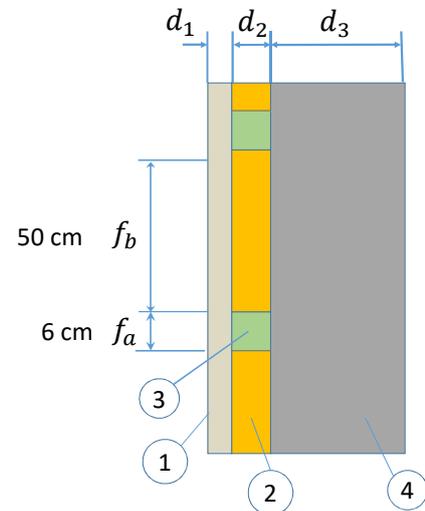
$$R_{tot,3} = \frac{d_3}{\lambda_4} = 0,400 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{tot,inf} = R_{si} + R_{tot,1} + R_{tot,2} + R_{tot,3} + R_{se} = 2,402 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{tot} = \frac{R_{tot,sup} + R_{tot,inf}}{2} = 2,482 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = 0,403 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad U_{1d} = \frac{1}{R_{tot,b}} = 0,363 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U\% = \frac{U_{1d} - U}{U} \cdot 100 = -9,93\%$$



## Intercapedine d'aria

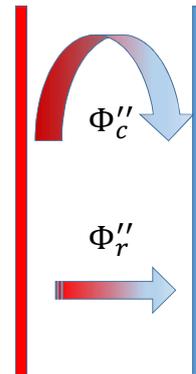
- Nelle strutture edilizie si incontrano intercapedini sia chiuse che aperte
- Intercapedini chiuse
  - Pareti a cassa vuota
  - Isolamenti termici interni ed esterni
  - Vetrate doppie o triple (con altri gas)
- Intercapedini aperte
  - Sottotetti
  - Isolamenti ventilati





## Calcolo della trasmittanza

- Lo scambio termico avviene sia per convezione che per irraggiamento
- Lo scambio per convezione è lineare
- Lo scambio per irraggiamento non è lineare
- Lo scambio per irraggiamento è linearizzabile

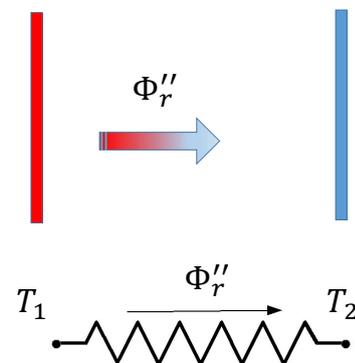


## Scambio radiativo

- Geometria semplice: pareti piane indefinite
- Il flusso termico specifico si calcola come

$$\Phi_r'' = \sigma_0 \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

- Il flusso dipende dall'emissività delle superfici



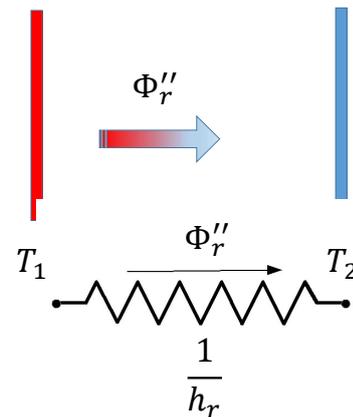


## Linearizzazione dello scambio radiativo

- Il termine non lineare è dato dalla differenza delle temperature alla quarta
- Le temperature sono espresse in [K]
- La differenza delle temperature è piccola

$$\begin{aligned}(T_1^4 - T_2^4) &= (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1^2 - T_2^2) = \\ &= (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1 - T_2) \\ &\cong 2 \cdot T_m^2 \cdot 2 \cdot T_m \cdot (\theta_1 - \theta_2) = 4 \cdot T_m^3 \cdot (\theta_1 - \theta_2)\end{aligned}$$

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \text{ [K]}$$



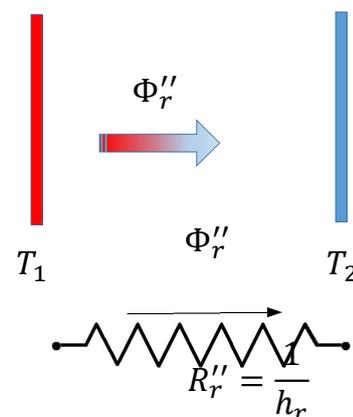
## Linearizzazione dello scambio radiativo

$$\phi_r'' = \sigma_0 \cdot 4 \cdot T_m^3 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\phi_r'' = h_r \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\Phi_r'' = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_r''}$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 \quad \downarrow \quad h_r \quad \downarrow \quad R_r'' \quad \uparrow \quad \Phi_r'' \quad \downarrow$$

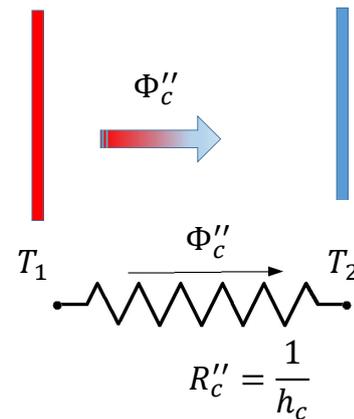




## Scambio termico accoppiato

- Il coefficiente convettivo si ricava da tabelle

$\Delta T \leq 5 K$	
Direzione	$h_a [W/(m^2 \cdot K)]$
Orizzontale	1,25
Ascendente	1,95
Discendente	$0,12 \cdot d^{-0,44}$
$\Delta T > 5 K$	
Direzione	$h_a [W/(m^2 \cdot K)]$
Orizzontale	$0,73 \cdot \Delta T^{\frac{1}{3}}$
Ascendente	$1,14 \cdot \Delta T^{\frac{1}{3}}$
Discendente	$0,09 \cdot \Delta T^{0,187} \cdot d^{-0,44}$



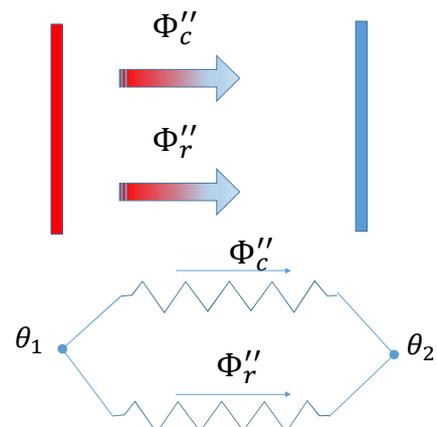
## Scambio termico convettivo e radiativo

- Considero entrambe le modalità

$$\Phi''_g = (h_a + h_r) \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\phi''_g = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{R_g}$$

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r}$$





## Esempio di calcolo

- $\theta_1 = 19\text{ }^\circ\text{C}$
  - $\theta_2 = 15\text{ }^\circ\text{C}$
  - $T_m = 290,15\text{ K}$
  - $\varepsilon_1 = 0,9$
  - $\varepsilon_2 = 0,95$
  - $h_c = 1,25\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
  - $h_r = 4,76\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
  - $h = h_c + h_r = 6,01\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
  - $\Phi = h \cdot (E_{n1} - E_{n2}) = 24,04\text{ W}/\text{m}^2$
- $\theta_1 = 19\text{ }^\circ\text{C}$
  - $\theta_2 = 15\text{ }^\circ\text{C}$
  - $T_m = 290,15\text{ K}$
  - $\varepsilon_1 = 0,9$
  - $\varepsilon_2 = 0,1$
  - $h_c = 1,25\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
  - $h_r = 0,548\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
  - $h = h_c + h_r = 1,797\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
  - $\Phi = h \cdot (E_{n1} - E_{n2}) = 7,19\text{ W}/\text{m}^2$

