



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E MECCANICA  
Corso di Laurea in Ingegneria Civile

## CONFRONTO PRESTAZIONALE TRA DIVERSE SOLUZIONI EDILIZIE

*Analisi termo igrometrica di alcuni pacchetti strutturali composti da differenti materiali.*

SUPERVISORE  
Rossano Albatici

LAUREANDO  
Nicola Meoli 186100

---

Anno accademico 2020/21

ciao

ciao

# ciao

ciao ciaooo

Calcolo della temperatura per ogni strato a partire dalla temperatura interna

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{\text{int.}} - \vartheta_{\text{est.}}$$

$$\vartheta^{(1)} = \vartheta_{\text{int.}}$$

$$\vartheta^{(k)} = \vartheta_{\text{int.}} - \frac{\Delta\vartheta}{R_{\text{tot}}} \left( R_{\text{s,int.}} + \sum_{i=1}^k R^{(i)} \right)$$

$$\vartheta^{(N)} = \vartheta_{\text{est.}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Calcolo della temperatura per ogni strato a partire dalla temperatura interna

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{\text{int.}} - \vartheta_{\text{est.}}$$

$$\vartheta^{(1)} = \vartheta_{\text{int.}}$$

$$\vartheta^{(k)} = \vartheta_{\text{int.}} - \frac{\Delta\vartheta}{R_{\text{tot}}} \left( R_{\text{s,int.}} + \sum_{i=1}^k R^{(i)} \right)$$

$$\vartheta^{(N)} = \vartheta_{\text{est.}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ciao

# Confronto verifica condensa interstizionale

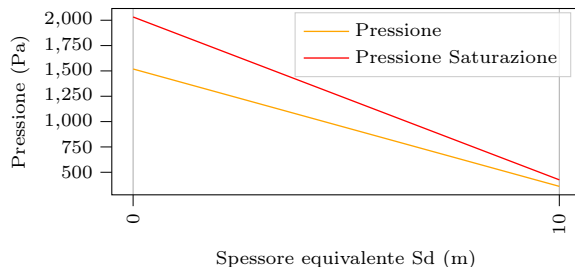
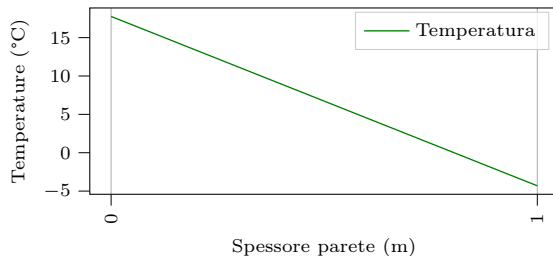
Parete solo mattone pieno (0a)

Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [—]
Mattone pieno	1,0	0,78	10,0

# Confronto verifica condensa interstiziale

## Parete solo mattone pieno (0a)

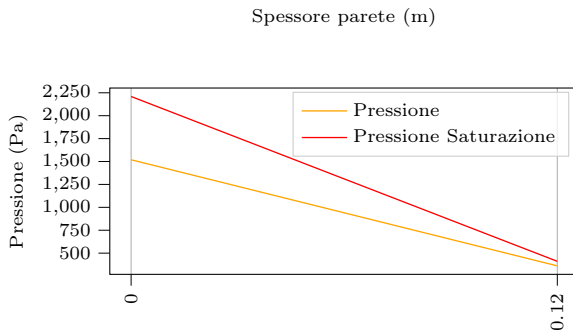
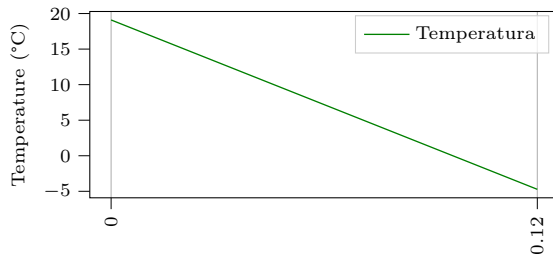
Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [—]
Mattone pieno	1,0	0,78	10,0



# Confronto verifica condensa interstiziale

## Parete solo isolante (0b)

Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Isolante VentirockDuo	0,12	0,035	1,0



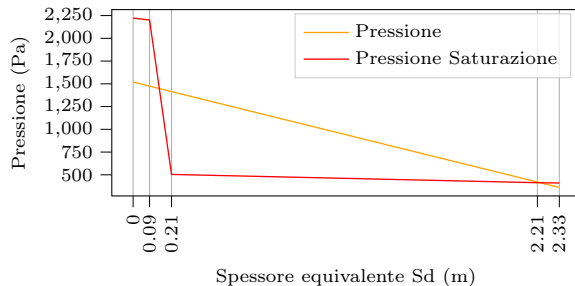
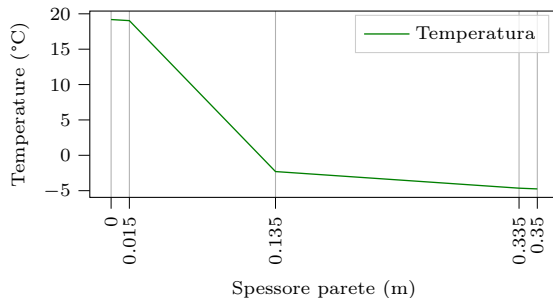
Spessore equivalente Sd (m)



# Confronto verifica condensa interstiziale

Parete in laterizio con isolante interno (1a)

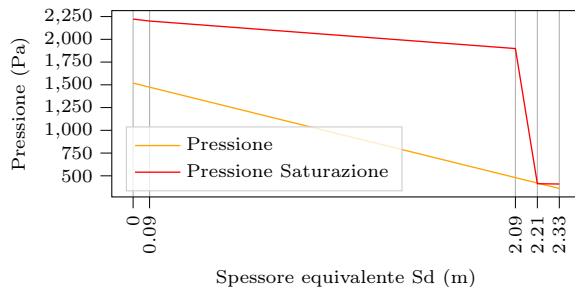
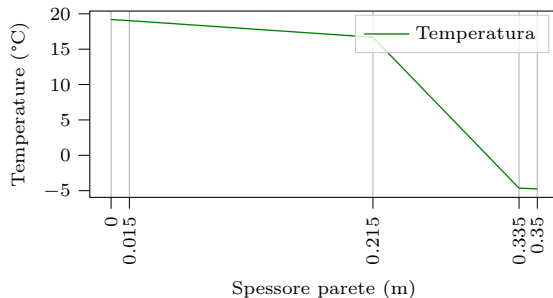
Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Intonaco	0,015	0,600	6,0
Isolante VentirockDuo	0,120	0,035	1,0
Laterizio semipieno	0,200	0,530	10,0
Intonaco	0,015	0,900	8,0



# Confronto verifica condensa interstiziale

## Parete in laterizio con isolante esterno (1b)

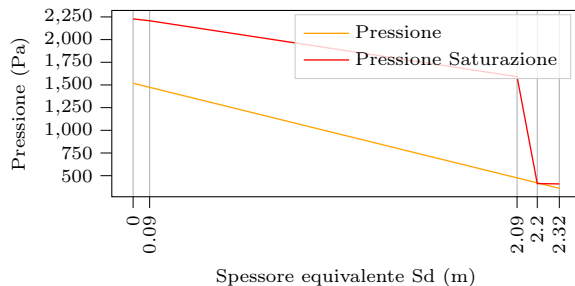
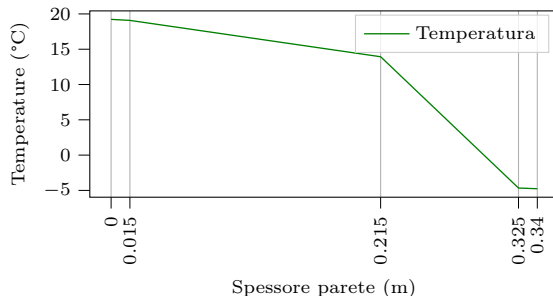
Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Intonaco	0,015	0,600	6,0
Laterizio semipieno	0,200	0,530	10,0
Isolante VentirockDuo	0,120	0,035	1,0
Intonaco	0,015	0,900	8,0



# Confronto verifica condensa interstizionale

## Parete in muratura Poroton con isolante esterno (2a)

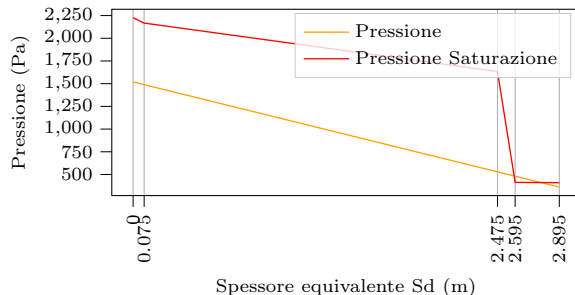
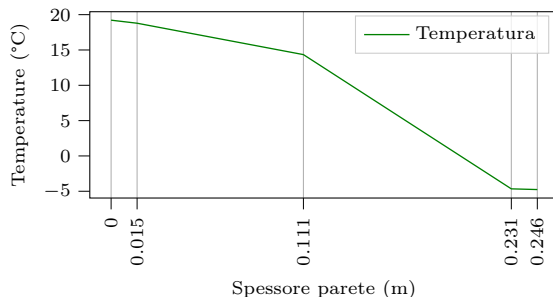
Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Intonaco	0,015	0,600	6,0
Laterizio Poroton	0,200	0,230	10,0
Isolante VentirockDuo	0,110	0,035	1,0
Intonaco	0,015	0,900	8,0



# Confronto verifica condensa interstiziale

Parete in X-LAM con isolante bassa densità (3a)

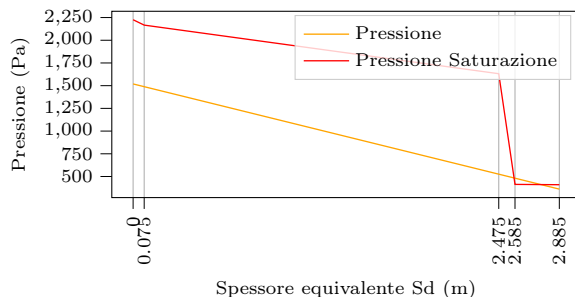
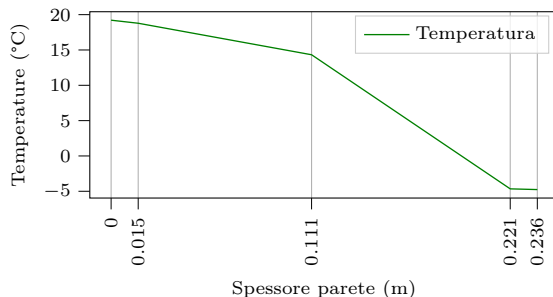
Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Gessofibra	0,015	0,210	5,0
X-LAM KLH	0,096	0,130	25,0
Isolante bassa densità	0,120	0,038	1,0
Intonaco calce	0,015	0,900	20,0



# Confronto verifica condensa interstiziale

Parete in X-LAM con isolante bassa densità lana di roccia (3b)

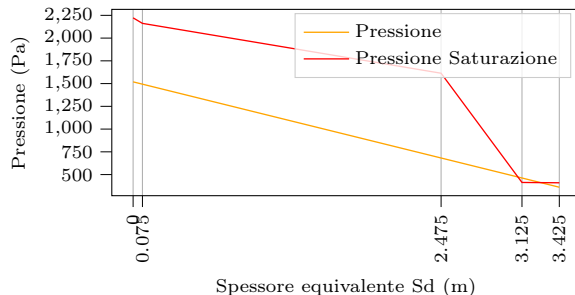
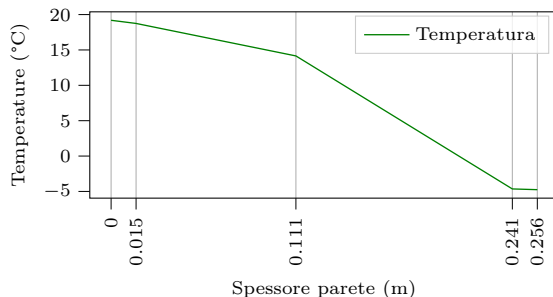
Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Gessofibra	0,015	0,210	5,0
X-LAM KLH	0,096	0,130	25,0
Isolante VentirockDuo	0,110	0,035	1,0
Intonaco calce	0,015	0,900	20,0



# Confronto verifica condensa interstiziale

Parete in X-LAM con isolante alta densità fibra di legno (3c)

Strati	Spessori $s$ [m]	Conducibilità termica $\lambda$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Permeabilità al vapore $\mu$ [-]
Gessofibra	0,015	0,210	5,0
X-LAM KLH	0,096	0,130	25,0
Isolante alta densità	0,130	0,043	5,0
Intonaco calce	0,015	0,900	20,0



# Confronto

## Parete solo mattone pieno (0a)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [-]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Mattone pieno	1,0	1700,0	940,0	1700,0	0,116	8,631	1598,0	4,88	1116,4

$$\text{Massa superficiale totale } M_s = 1700,0 \text{ kg m}^{-2}$$

$$\text{Sfasamento } \Delta\tau = 8,43 \text{ h}$$

$$\text{Fattore di attenuazione } fd = 0,002$$

$$\text{Trasmittanza termica periodica } Y_{12} = 0,001 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica interna } Y_{11} = 4,601 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica esterna } Y_{22} = 7,338 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Capacità termica periodica interna } k_1 = 63,28 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

# Confronto

## Parete solo isolante (0b)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [–]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Isolante VentirockDuo	0,12	70,0	1030,0	8,4	0,116	1,039	8,7	4,85	50,2

Massa superficiale totale  $M_s = 8,4 \text{ kg m}^{-2}$

Sfasamento  $\Delta\tau = 1,49 \text{ h}$

Fattore di attenuazione  $fd = 0,97$

Trasmittanza termica periodica  $Y_{12} = 0,27 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica interna  $Y_{11} = 0,364 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica esterna  $Y_{22} = 0,373 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Capacità termica periodica interna  $k_1 = 4,1 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$



# Confronto

## Parete in laterizio con isolante interno (1a)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [—]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Intonaco	0,015	1500,0	1000,0	22,5	0,105	0,143	22,5	4,00	948,7
Isolante VentirockDuo	0,120	70,0	1030,0	8,4	0,116	1,039	8,7	4,85	50,2
Laterizio semipieno	0,200	1000,0	840,0	200,0	0,132	1,518	168,0	6,31	667,2
Intonaco	0,015	1800,0	1000,0	27,0	0,117	0,128	27,0	5,00	1272,8

Massa superficiale totale  $M_s = 257,9 \text{ kg m}^{-2}$

Sfasamento  $\Delta\tau = 9,09 \text{ h}$

Fattore di attenuazione  $fd = 0,352$

Trasmittanza termica periodica  $Y_{12} = 0,088 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica interna  $Y_{11} = 1,744 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica esterna  $Y_{22} = 5,991 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Capacità termica periodica interna  $k_1 = 25,09 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

# Confronto

## Parete in laterizio con isolante esterno (1b)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [—]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Intonaco	0,015	1500,0	1000,0	22,5	0,105	0,143	22,5	4,00	948,7
Laterizio semipieno	0,200	1000,0	840,0	200,0	0,132	1,518	168,0	6,31	667,2
Isolante VentirockDuo	0,120	70,0	1030,0	8,4	0,116	1,039	8,7	4,85	50,2
Intonaco	0,015	1800,0	1000,0	27,0	0,117	0,128	27,0	5,00	1272,8

Massa superficiale totale  $M_s = 257,9 \text{ kg m}^{-2}$

Sfasamento  $\Delta\tau = 9,44 \text{ h}$

Fattore di attenuazione  $fd = 0,252$

Trasmittanza termica periodica  $Y_{12} = 0,063 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica interna  $Y_{11} = 3,925 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica esterna  $Y_{22} = 2,157 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Capacità termica periodica interna  $k_1 = 54,82 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

# Confronto

## Parete in muratura Poroton con isolante esterno (2a)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [—]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Intonaco	0,015	1500,0	1000,0	22,5	0,105	0,143	22,5	4,00	948,7
Laterizio Poroton	0,200	860,0	840,0	172,0	0,094	2,137	144,5	3,18	407,6
Isolante VentirockDuo	0,110	70,0	1030,0	7,7	0,116	0,952	7,9	4,85	50,2
Intonaco	0,015	1800,0	1000,0	27,0	0,117	0,128	27,0	5,00	1272,8

$$\text{Massa superficiale totale } M_s = 229,2 \text{ kg m}^{-2}$$

$$\text{Sfasamento } \Delta\tau = 11,25 \text{ h}$$

$$\text{Fattore di attenuazione } fd = 0,182$$

$$\text{Trasmittanza termica periodica } Y_{12} = 0,043 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica interna } Y_{11} = 3,171 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica esterna } Y_{22} = 2,154 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Capacità termica periodica interna } k_1 = 44,15 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

# Confronto

## Parete in X-LAM con isolante bassa densità (3a)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [-]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Gessofibra	0,015	1150,0	1100,0	17,25	0,068	0,222	19,0	1,66	515,4
X-LAM KLH	0,096	500,0	1600,0	48,00	0,067	1,436	76,8	1,62	322,5
Isolante bassa densità	0,120	50,0	2100,0	6,00	0,100	1,203	12,6	3,62	63,2
Intonaco calce	0,015	1800,0	1000,0	27,00	0,117	0,128	27,0	5,00	1272,8

Massa superficiale totale  $M_s = 98,25 \text{ kg m}^{-2}$

Sfasamento  $\Delta\tau = 9,33 \text{ h}$

Fattore di attenuazione  $fd = 0,334$

Trasmittanza termica periodica  $Y_{12} = 0,08 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica interna  $Y_{11} = 2,651 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Ammettanza termica esterna  $Y_{22} = 2,257 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Capacità termica periodica interna  $k_1 = 37,56 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

# Confronto

## Parete in X-LAM con isolante bassa densità lana di roccia (3b)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [—]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Gessofibra	0,015	1150,0	1100,0	17,25	0,068	0,222	19,0	1,66	515,4
X-LAM KLH	0,096	500,0	1600,0	48,00	0,067	1,436	76,8	1,62	322,5
Isolante VentirockDuo	0,110	70,0	1030,0	7,70	0,116	0,952	7,9	4,85	50,2
Intonaco calce	0,015	1800,0	1000,0	27,00	0,117	0,128	27,0	5,00	1272,8

$$\text{Massa superficiale totale } M_s = 99,95 \text{ kg m}^{-2}$$

$$\text{Sfasamento } \Delta\tau = 8,58 \text{ h}$$

$$\text{Fattore di attenuazione } fd = 0,356$$

$$\text{Trasmittanza termica periodica } Y_{12} = 0,086 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica interna } Y_{11} = 2,659 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica esterna } Y_{22} = 2,161 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Capacità termica periodica interna } k_1 = 37,71 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

# Confronto

## Parete in X-LAM con isolante alta densità fibra di legno (3c)

Strati	Spessori [m]	Densità [kg m <sup>-3</sup> ]	Calore specifico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massa superficiale [kg m <sup>-2</sup> ]	Profondità di penetrazione $\delta$ [m]	Rapporto $\xi$ [-]	Capacità termica areica [kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Diffusività termica [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Effusività Termica [W s <sup>0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Gessofibra	0,015	1150,0	1100,0	17,25	0,068	0,222	19,0	1,66	515,4
X-LAM KLH	0,096	500,0	1600,0	48,00	0,067	1,436	76,8	1,62	322,5
Isolante alta densità Naturalia Diffuterm	0,130	190,0	2100,0	24,70	0,054	2,388	51,9	1,08	131,0
Intonaco calce	0,015	1800,0	1000,0	27,00	0,117	0,128	27,0	5,00	1272,8

$$\text{Massa superficiale totale } M_s = 116,95 \text{ kg m}^{-2}$$

$$\text{Sfasamento } \Delta\tau = 13,78 \text{ h}$$

$$\text{Fattore di attenuazione } fd = 0,177$$

$$\text{Trasmittanza termica periodica } Y_{12} = 0,044 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica interna } Y_{11} = 2,613 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ammettanza termica esterna } Y_{22} = 2,73 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Capacità termica periodica interna } k_1 = 36,21 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

# Confronto totale

...che fuoriesce dallo schermo

Spessore [m]

Resistenza [ $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ ]

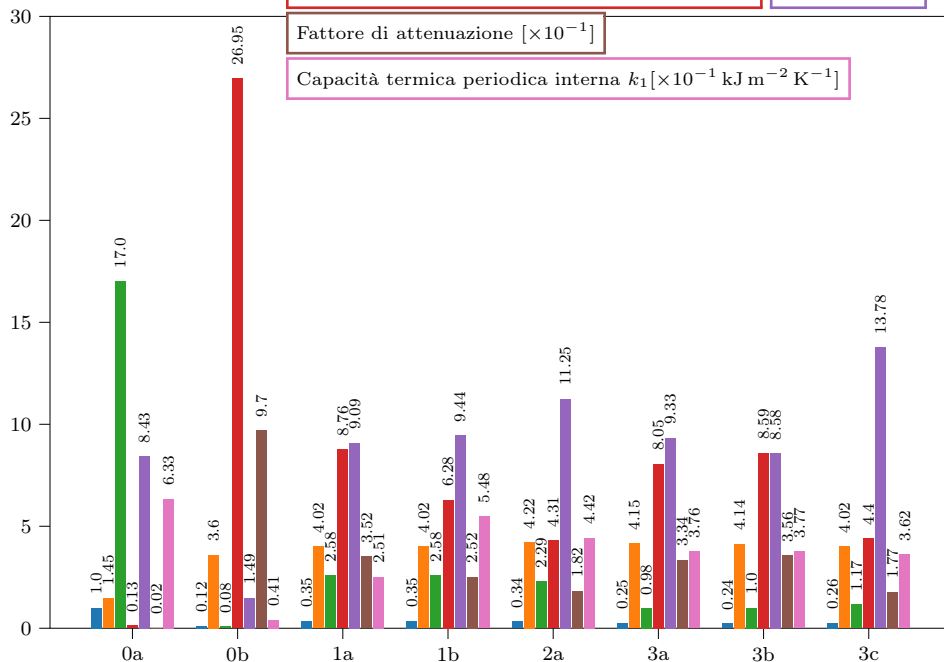
Massa superficiale [ $\times 10^2 \text{ kg m}^{-2}$ ]

Trasmittanza termica periodica  $Y_{12} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$

Sfasamento [h]

Fattore di attenuazione [ $\times 10^{-1}$ ]

Capacità termica periodica interna  $k_1 [\times 10^{-1} \text{ kJ m}^{-2} \text{K}^{-1}]$



# Confronto totale

...senza le prime due pareti

Spessore [m]

Resistenza [ $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ ]

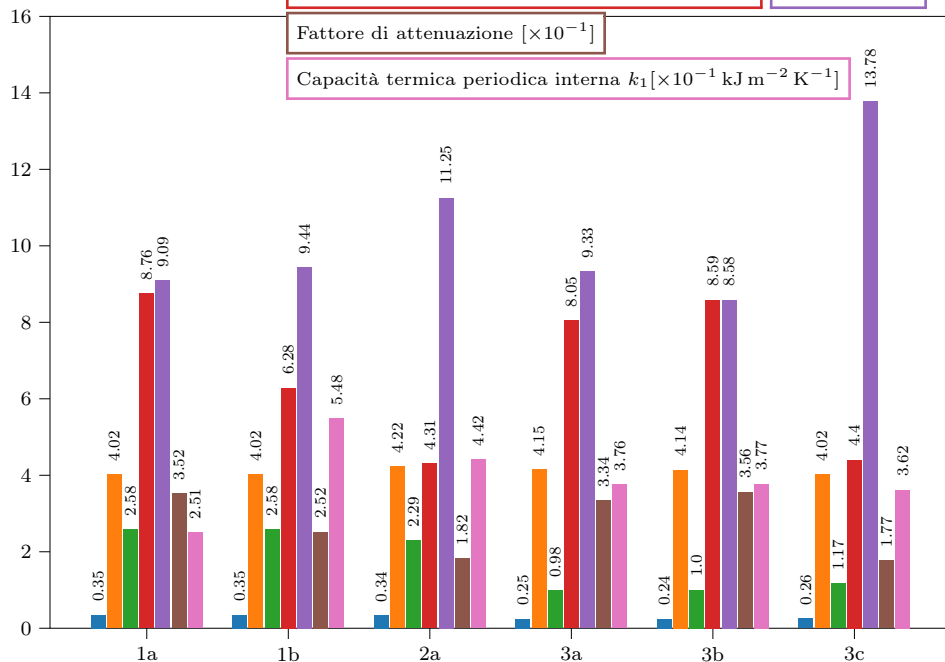
Massa superficiale [ $\times 10^2 \text{kg m}^{-2}$ ]

Trasmittanza termica periodica  $Y_{12}[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$

Sfasamento [h]

Fattore di attenuazione [ $\times 10^{-1}$ ]

Capacità termica periodica interna  $k_1[\times 10^{-1} \text{kJ m}^{-2} \text{K}^{-1}]$





## Problemi aperti

Un numero pari  $> 2$  è sempre la somma di due primi?

## Un esempio

2 è un numero primo

## Un errore

$0 = 1$