



ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI CAGLIARI

Commissione Energia e Impianti tecnologici

Corso di aggiornamento

**EFFICIENZA ENERGETICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTI.
L'INVOLUCRO E GLI IMPIANTI TECNOLOGICI IN EDILIZIA**

Cagliari – 16 – 23 – 30 Settembre – 7 Ottobre 2008

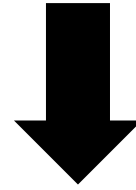
Aula Magna Facoltà di Ingegneria

“CALCOLO DELLE TRASMITTANZE E VERIFICA IGROMETRICA DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI DI UN EDIFICIO”

Relatore: ing. Italo STAGNO

-Fisica Tecnica – Facoltà di Ingegneria e Architettura – CAGLIARI-
stagno@unica.it

Il 16 dicembre 2002 il parlamento europeo ed il consiglio dell'unione europea adottano la direttiva 2002/91/CE



L'obiettivo è Promuovere il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici

L'attuazione della direttiva 2002/91/CE per l'Italia

**DECRETO LEGISLATIVO
19 agosto 2005, n.192**

Integrato da DLgs 29 Dicembre 2006, n.311

a far data dal 2 Febbraio 2007

UNA DELLE VERIFICHE CHE IL D.L. 311/06 CI IMPONE E' RELATIVA AL

CALCOLO DELLA TRASMITTANZA

DI PROGETTO, CHE DEVE ESSERE INFERIORE ALLA
TRASMITTANZA LIMITE così come previsto dal Comma
1 punto C e **Comma 6 punto d** dell'Allegato I il quale
impone che:

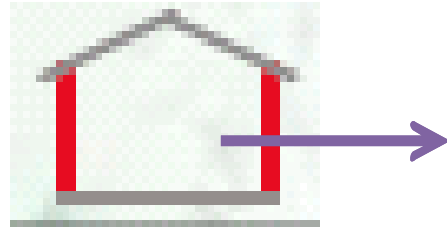
**Trasmittanza U di strutture opache e
trasparenti**

**Verificare che i valori di U dell'edificio siano inferiori ai
limiti stabiliti ai punti, 2, 3 e 4 dell'allegato C
(maggiorati del 30%)**

L'Italia è stata suddivisa in zone climatiche



Tabella 2.1 cap.2 - Allegato C

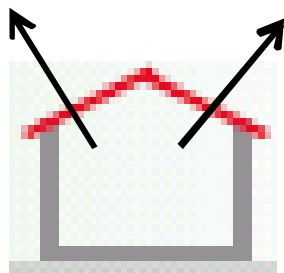


DISPERSIONI

Tabella 2.1 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture verticali opache espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dal 1 Gennaio 2006	Dal 1 Gennaio 2008	Dal 1 Gennaio 2010
	U	U	U
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Tabelle 3.1 cap.3 - Allegato C

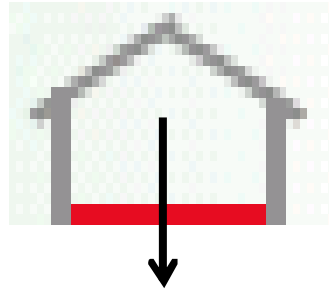


DISPERSIONI

Tabella 3.1 Valori limite della trasmittanza termica **U** delle strutture opache orizzontali e inclinate di copertura espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dal 1 Gennaio 2006	Dal 1 Gennaio 2008	Dal 1 Gennaio 2010
	U	U	U
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

Tabelle 3.2 cap.3 - Allegato C

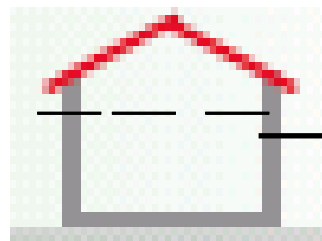


DISPERSIONI

Tabella 3.2 Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dal 1 Gennaio 2006	Dal 1 Gennaio 2008	Dal 1 Gennaio 2010
	U	U	U
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

Tabella 4.a cap.4 - Allegato C

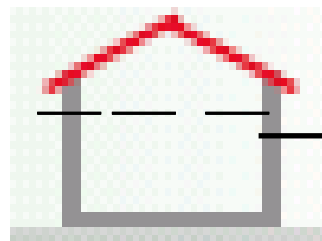


DISPERSIONI

Valori limite della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dal 1 Gennaio 2006	Dal 1 Gennaio 2008	Dal 1 Gennaio 2010
	U	U	U
A	5,5	5,0	4,6
B	4,0	3,6	3,0
C	3,3	3,0	2,6
D	3,1	2,8	2,4
E	2,8	2,5	2,2
F	2,4	2,2	2,0

Tabella 4.b cap.4 - Allegato C

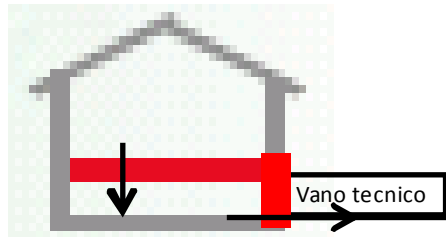


DISPERSIONI

Valori limite della trasmittanza termica U dei vetri espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dal 1 Gennaio 2006 U	Dal 1 Gennaio 2008 U	Dal 1 Gennaio 2010 U
A	5,0	4,5	3,7
B	4,0	3,4	2,7
C	3,0	2,3	2,1
D	2,6	2,1	1,9
E	2,4	1,9	1,7
F	2,3	1,7	1,3

ALLEGATO "I" comma 7



DISPERSIONI

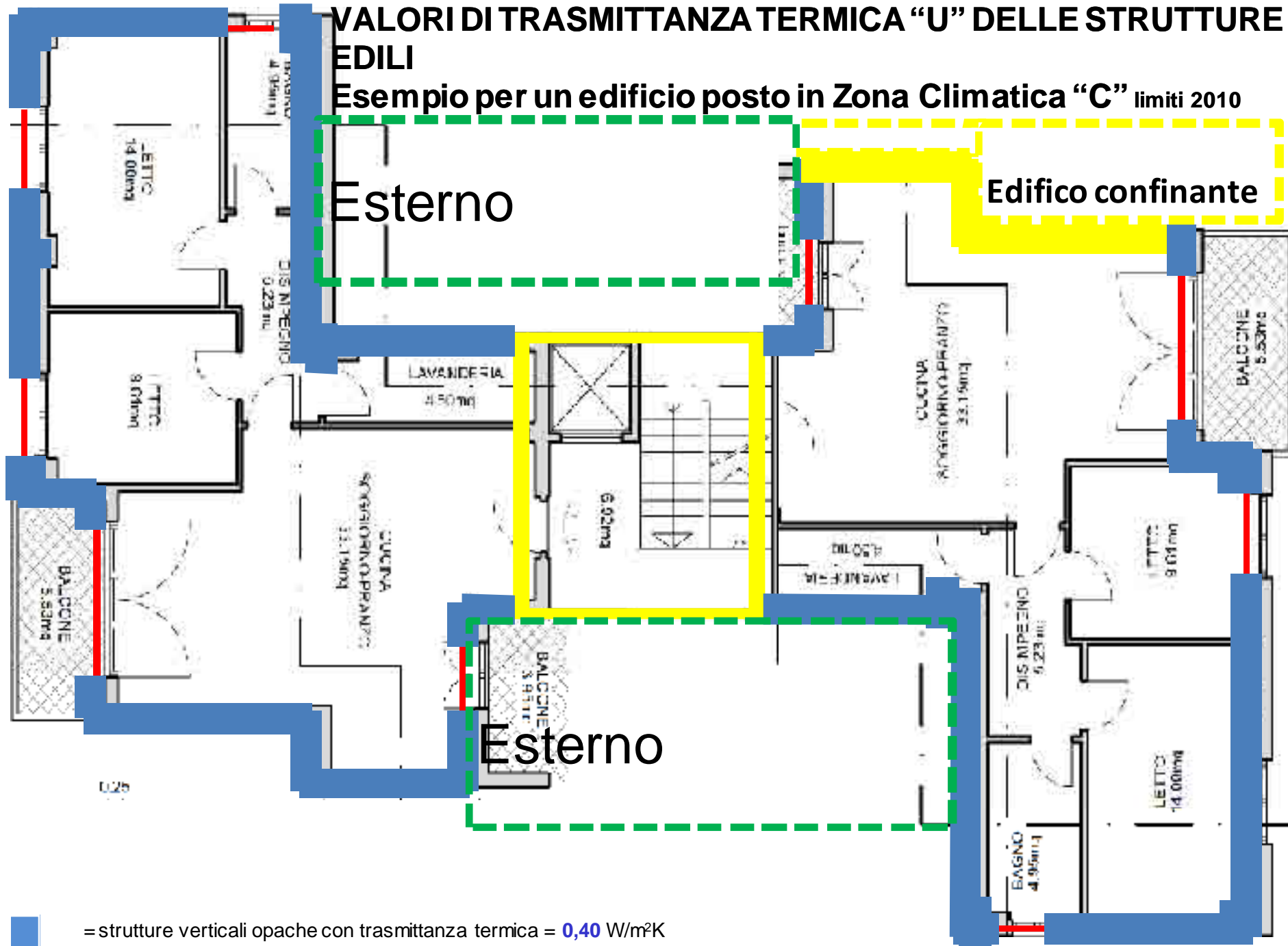
Nelle zone climatiche C,D,E ed F, ad eccezione degli edifici in categoria E.8, le strutture di separazione tra edifici od unità immobiliari confinanti riscaldate




$$U < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Tale limite è da rispettare anche per le strutture che delimitano verso l'ambiente esterno gli ambienti non dotati di riscaldamento.

VALORI DI TRASMITTANZA TERMICA "U" DELLE STRUTTURE EDILI

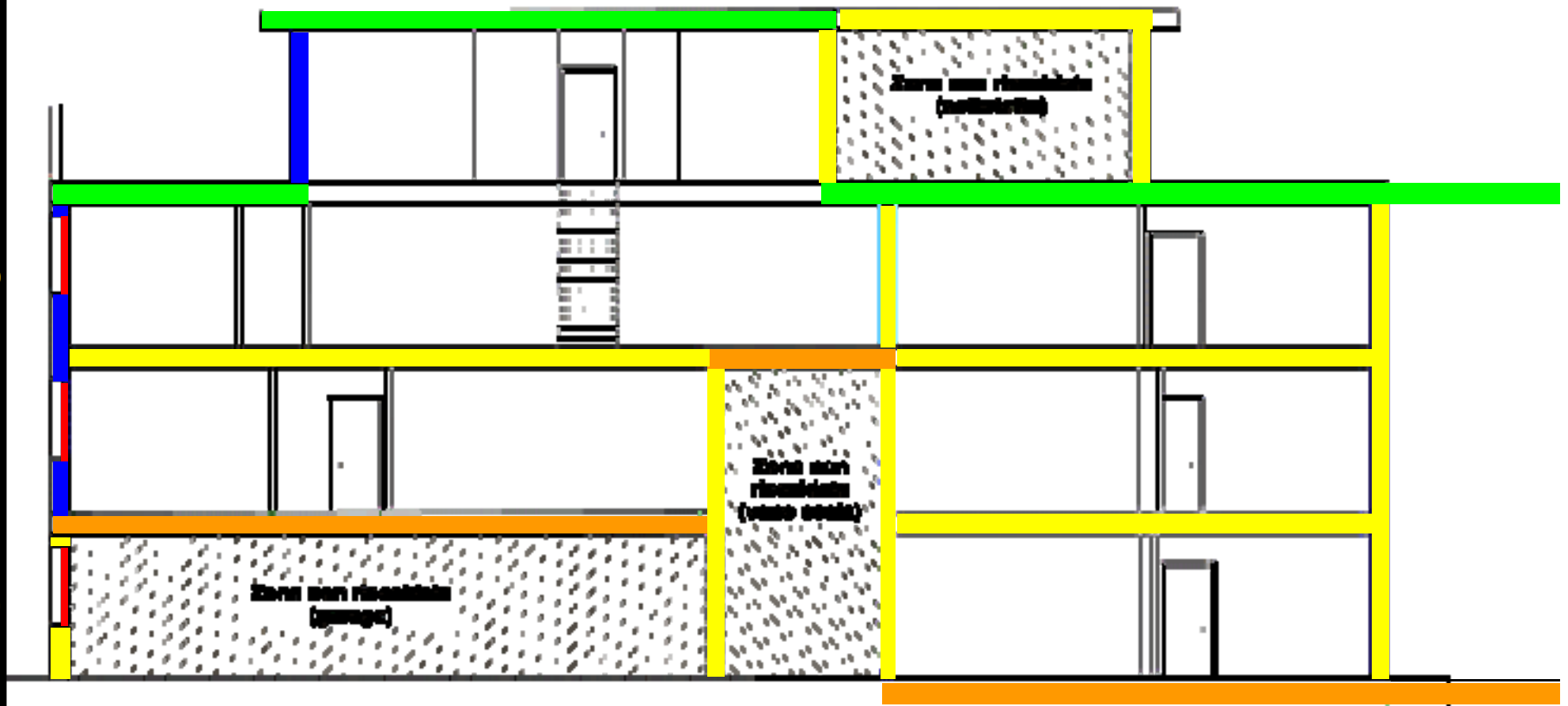
Esempio per un edificio posto in Zona Climatica "C" limiti 2010



-  = strutture verticali opache con trasmittanza termica = **0,40** W/m²K
-  = strutture verticali ed orizzontali divisorie tra edifici adiacenti riscaldati, unità immobiliari confinanti riscaldate o incidenti sull'esterno da ambienti non riscaldati con trasmittanza termica = **0,80** W/m²K
-  = chiusure trasparenti con infissi trasmittanza termica = **2,60** W/m²K e trasmittanza termica elemento vetrato = 2,40 W/m²K

VALORI DI TRASMITTANZA TERMICA "U" DELLE STRUTTURE EDILI

Esempio per un edificio posto in Zona Climatica "C" Limite 2010



= strutture opache orizzontali di copertura opache con tramittanza termica = **0,38** W/m²K

= strutture opache orizzontali di pavimento opache con tramittanza termica = **0,42** W/m²K

= strutture opache verticali con tramittanza termica = **0,40** W/m²K

= strutture verticali ed orizzontali divisorie tra edifici adiacenti riscaldati, unità immobiliari confinanti riscaldate o incidenti sull'esterno da ambienti non riscaldati con tramittanza termica = **0,80** W/m²K

= chiusure trasparenti con infissi tramittanza termica = **2,60** W/m²K e tramittanza termica elemento vetrato = 2,1 W/m²K

Trasmittanza

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_n \frac{S_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

Dove:

α_i = coefficiente di adduzione interno;

α_e = coefficiente di adduzione esterno;

S = spessore dello strato considerato in metri;

λ = conducibilità dello strato considerato.

Trasmittanza “formula più generale”

$$U = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_n \frac{s_n}{\lambda_n} + \sum_n \frac{1}{C_n} + \sum_m r_{a,m} + \frac{1}{\alpha_e}$$

Dove:

α_i = coefficiente di adduzione interno; UNI 6946

α_e = coefficiente di adduzione esterno; UNI 6946

S = spessore dello strato considerato in metri;

λ = conducibilità dello strato considerato; UNI 10351

C = conduttanza dello strato considerato;

r = resistenza dell'intercapedine d'aria considerata.

Resistenza termica totale

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_n \frac{s_n}{\lambda_n} + \sum_n \frac{1}{C_n} + \sum_m r_{a,m} + \frac{1}{\alpha_e}$$

Dove:

α_i = coefficiente di adduzione interno;

α_e = coefficiente di adduzione esterno;

S = spessore dello strato considerato in metri;

λ = conducibilità dello strato considerato;

C = conduttanza dello strato considerato;

r = resistenza dell'intercapedine d'aria considerata.

Si definisce:

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

TRASMITTANZA DELLA STRUTTURA CONSIDERATA

Le sue unità dimensionali sono W/m^2K

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

RESISTENZA TERMICA DELLA STRUTTURA CONSIDERATA

Le sue unità dimensionali sono m^2K/W

Flusso di calore:

$$\frac{Q}{\tau} = q = A \cdot U \cdot (T_1 - T_2)$$

Energia fluita attraverso la parete considerata nell'unità di tempo
Joule/tempo in altre parole potenza istantanea dispersa Watt.

Dove:

Q = energia dispersa o fluita attraverso la parete [J];

τ = tempo in secondi;

q = potenza istantanea dispersa attraverso la parete;

A = area della parete considerata [m²];

U = trasmittanza della parete considerata [W/m²K];

T₁ = Temperatura maggiore;

T₂ = Temperatura minore;

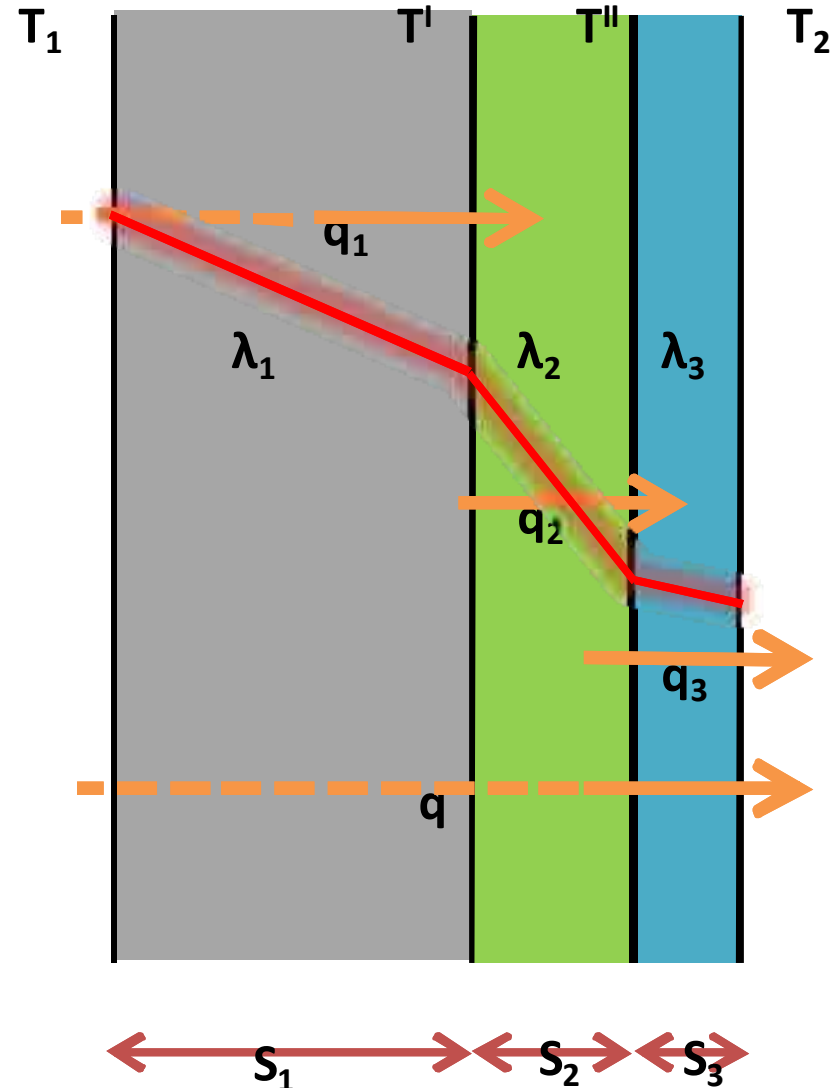
In regime stazionario il flusso che passa attraverso i vari strati è lo stesso:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q$$

$$1) \quad q_1 = \frac{Q_1}{\tau} = \frac{(T_1 - T^I)}{S_1} \cdot \lambda_1$$

$$2) \quad q_2 = \frac{\lambda_2}{S_2} \cdot (T^I - T^{II})$$

$$3) \quad q_3 = \frac{\lambda_3}{S_3} \cdot (T^{II} - T_2)$$



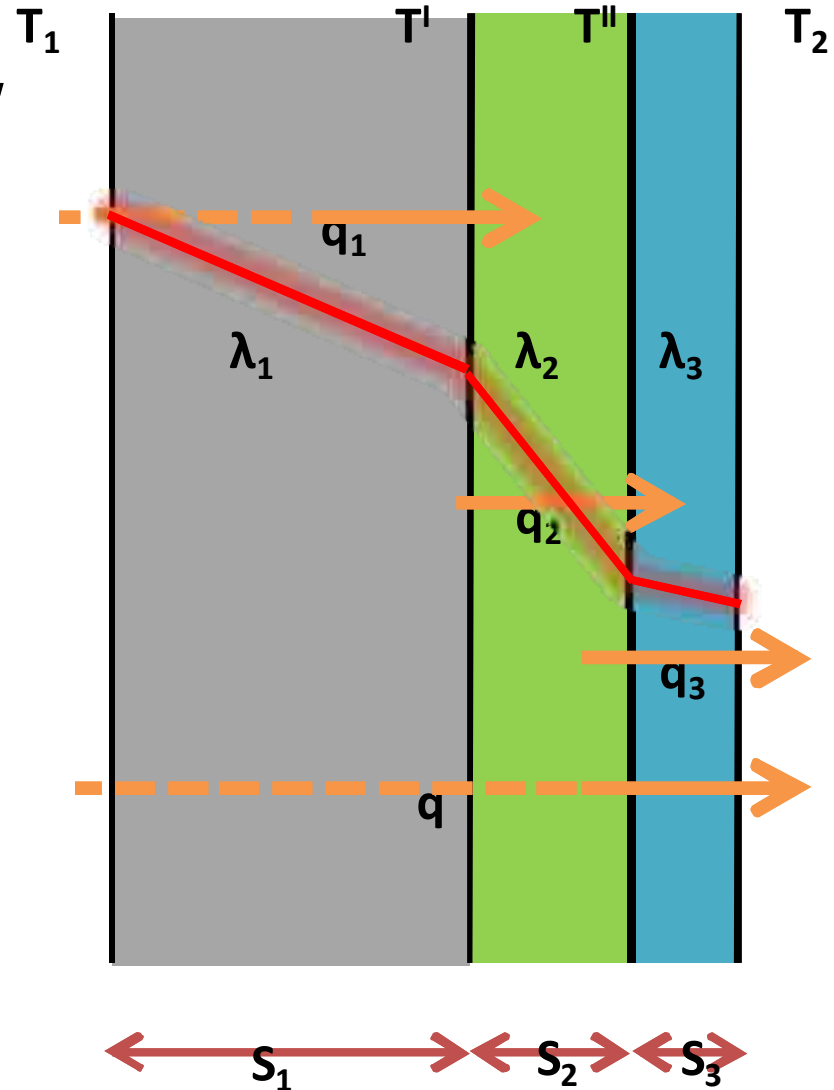
Sulla base di questa uguaglianza possiamo anche scrivere:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q$$

$$1) \quad q \cdot \frac{s_1}{\lambda_1} = T_1 - T^I$$

$$2) \quad q \cdot \frac{s_2}{\lambda_2} = T^I - T^{II}$$

$$3) \quad q \cdot \frac{s_3}{\lambda_3} = T^{II} - T_2$$



PROFILO DELLE TEMPERATURE

Profilo delle temperature

Flusso totale disperso dalla parete

$$q = A \cdot U \cdot (T_i - T_e) = A \cdot \frac{1}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e)$$

Flusso disperso dai singoli strati

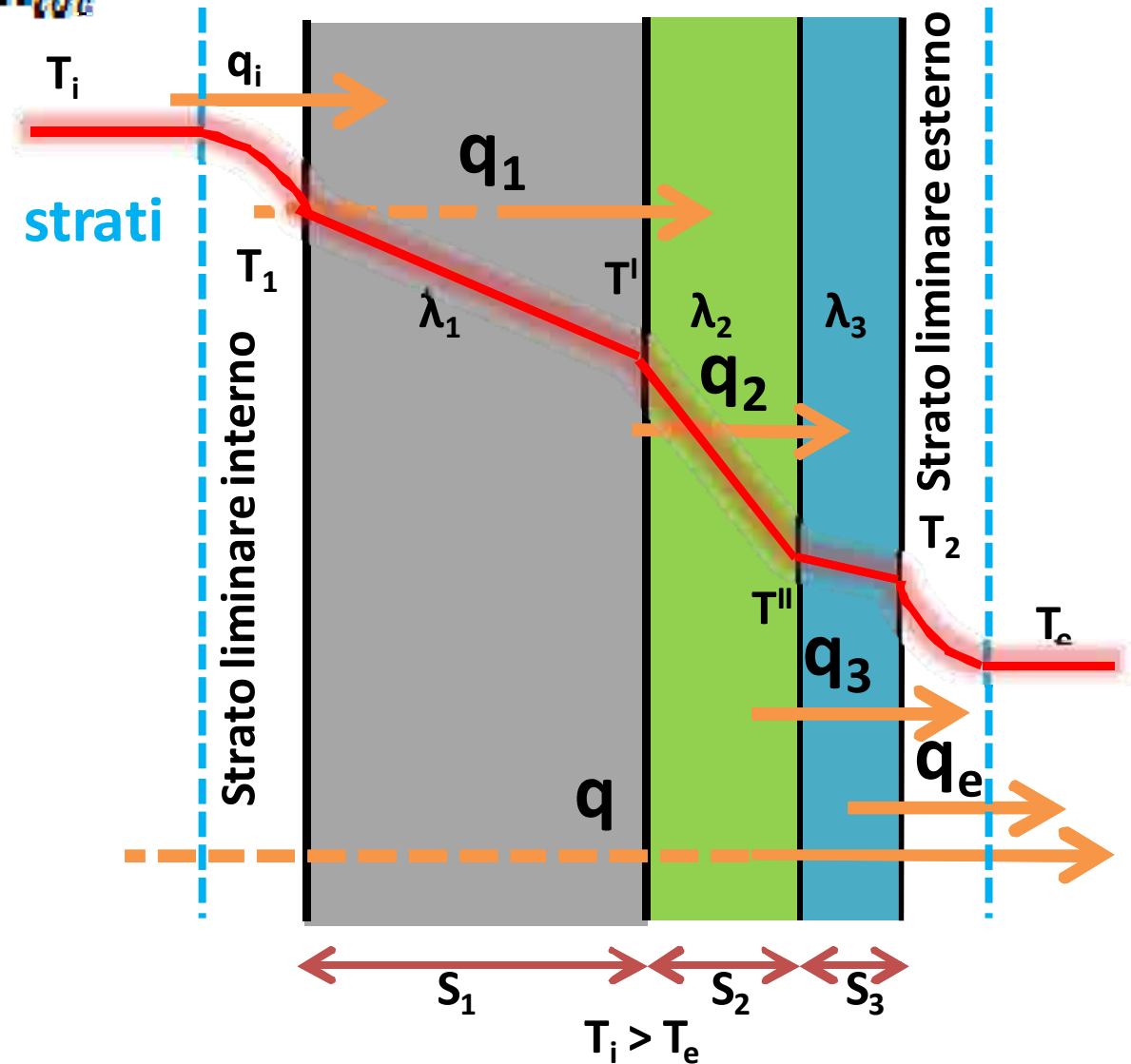
$$q_t = A \cdot \frac{1}{R_t} \cdot (T_i - T_1)$$

$$q_1 = A \cdot \frac{1}{R_1} \cdot (T_1 - T^I)$$

$$q_2 = A \cdot \frac{1}{R_2} \cdot (T^I - T^{II})$$

$$q_3 = A \cdot \frac{1}{R_3} \cdot (T^{II} - T_2)$$

$$q_e = A \cdot \frac{1}{R_e} \cdot (T_2 - T_e)$$



TRACCIAMO IL PROFILO DELLE TEMPERATURE

Essendo i Flussi dei singoli strati uguali a flusso totale scriviamo:

$$q_t = q_1 = q_2 = q_3 = q_e = q$$

Uguagliando e risolvendo
l'equazioni precedenti

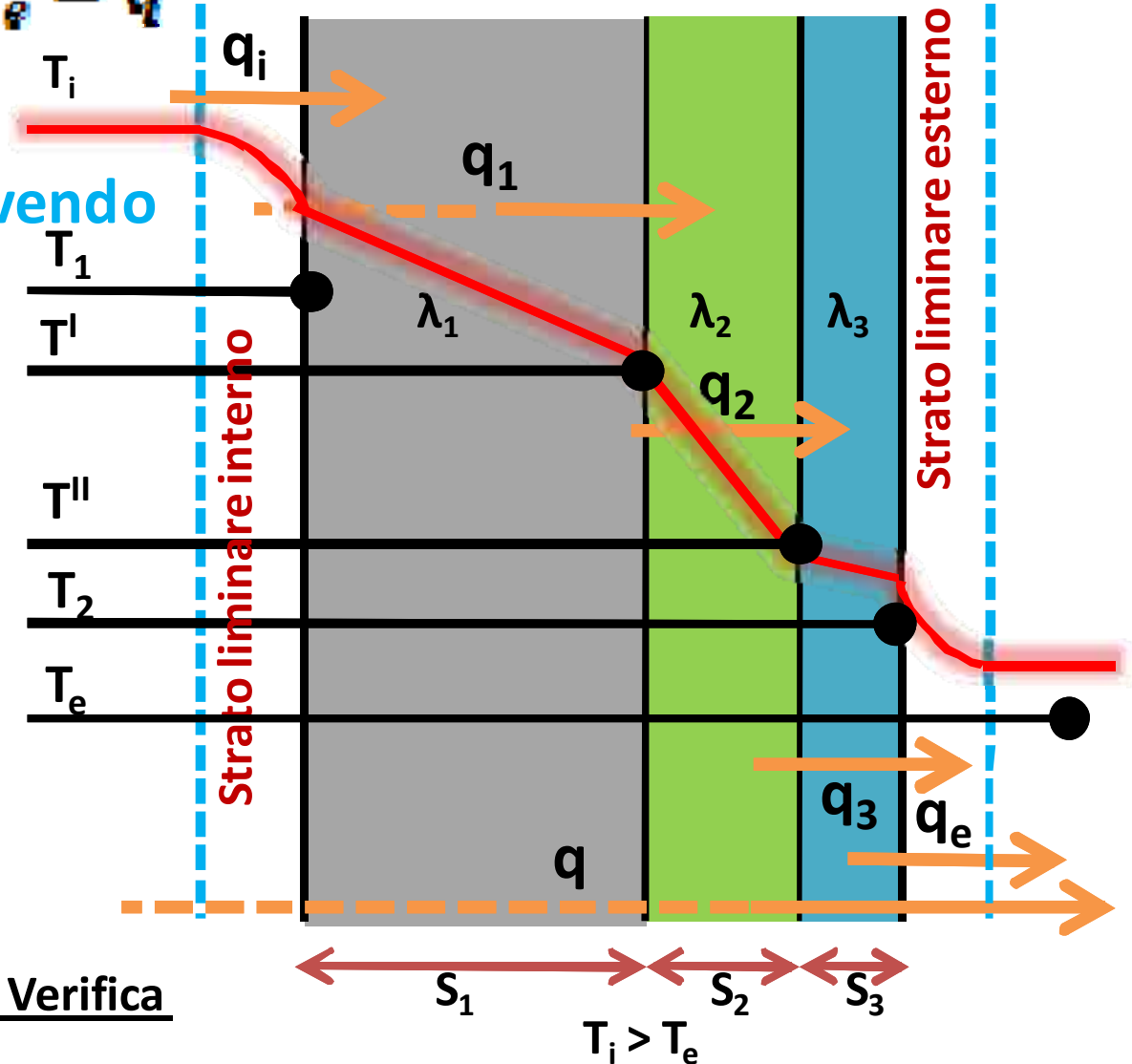
$$T_1 = T_t - \frac{R_t}{R_{tot}} \cdot (T_t - T_e)$$

$$T^I = T_1 - \frac{R_1}{R_{tot}} \cdot (T_t - T_e)$$

$$T^{II} = T^I - \frac{R_2}{R_{tot}} \cdot (T_t - T_e)$$

$$T_2 = T^{II} - \frac{R_3}{R_{tot}} \cdot (T_t - T_e)$$

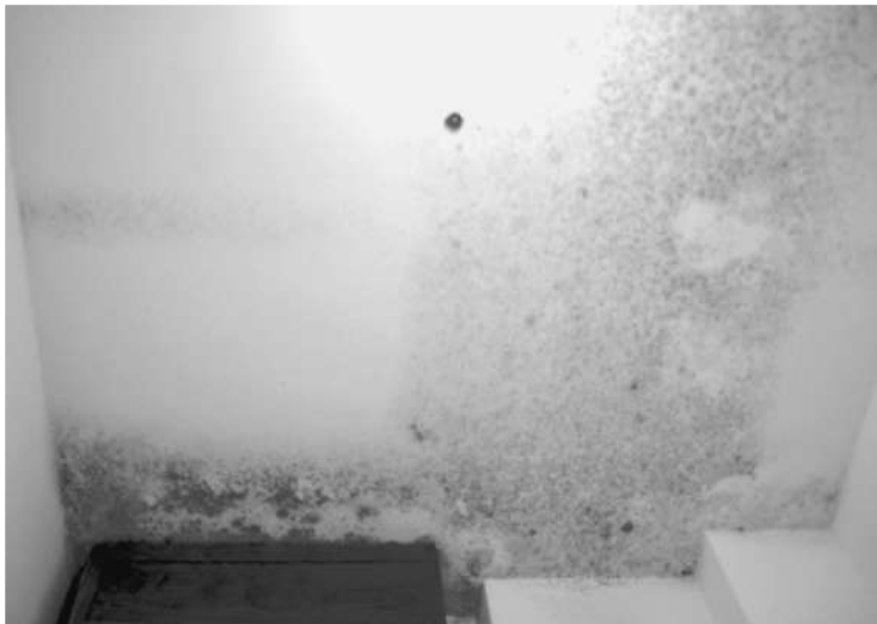
$$T_e = T_2 - \frac{R_e}{R_{tot}} \cdot (T_t - T_e)$$



La Condensa

All'interno degli edifici si ha sempre una produzione di vapore che si aggiunge alla quantità presente nell'aria umida nelle condizioni termoigrometriche in cui si trova. Tali sorgenti possono essere, ad esempio, le stesse persone che producono mediamente circa 30 g/h di vapore in condizioni di attività normale.

LA CONDENSA SUPERFICIALE SI FORMA QUANDO LA TEMPERATURA DELLA PARETE E' MINORE DELLA TEMPERATURA DI RUGIADA DELL'ARIA UMIDA



Comma 8 Allegato I D.Lgs 311/06

Condensa pareti opache Verificare l'assenza di condensa superficiale e che la condensa interstiziale non sia superiore alla qualità rievaporabile. In mancanza di dati si assume:

$$T_{\text{interna}} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Umidità interna} = 65\%$$

DIAGRAMMA PSICROMETRICO ASHRAE

Umidità specifica X (g/Kg)



Diagramma Psicrometrico
Unità SI
Temperatura da 0°C a +50°C
Pressione 101,325 kPa

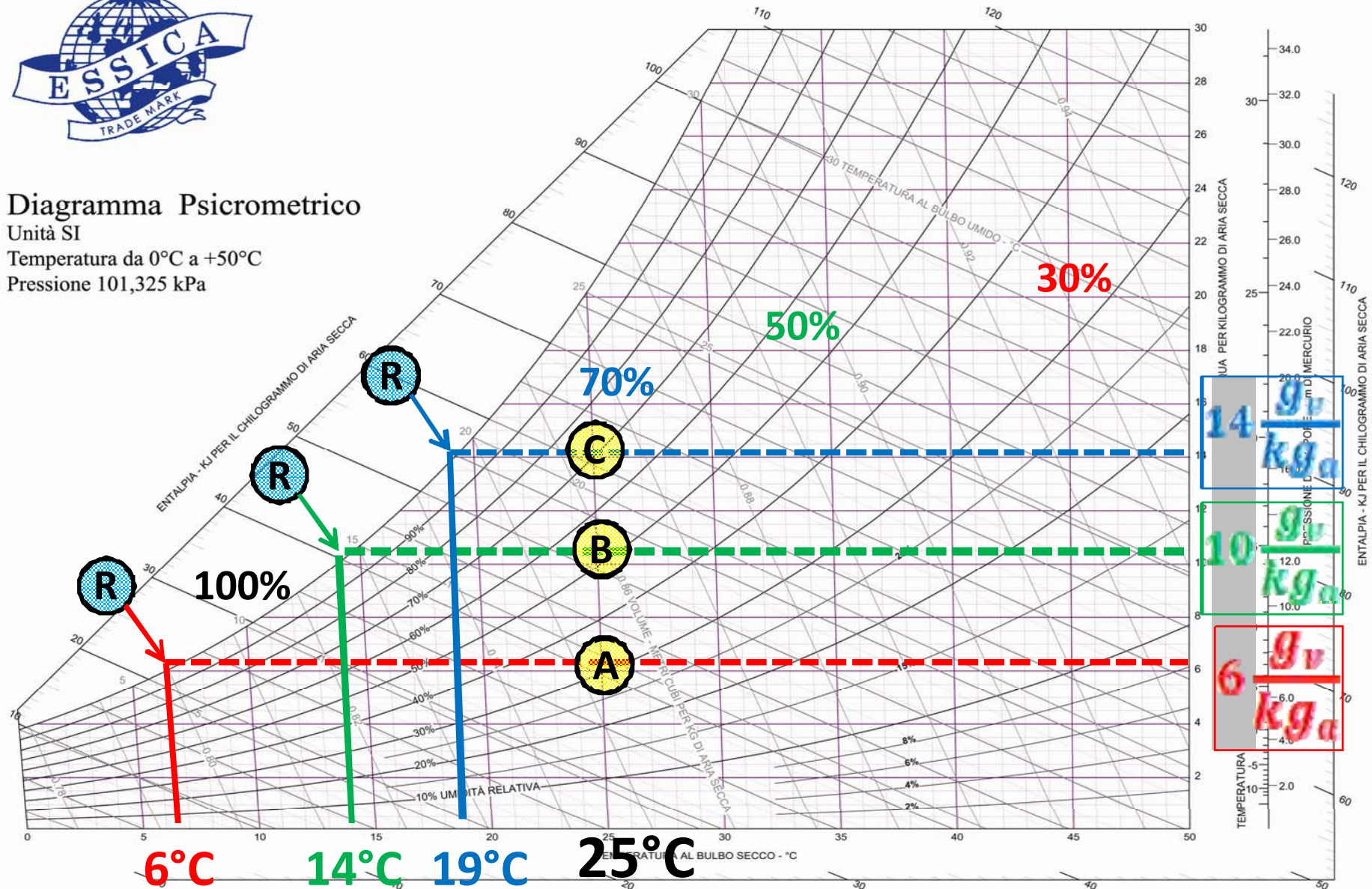
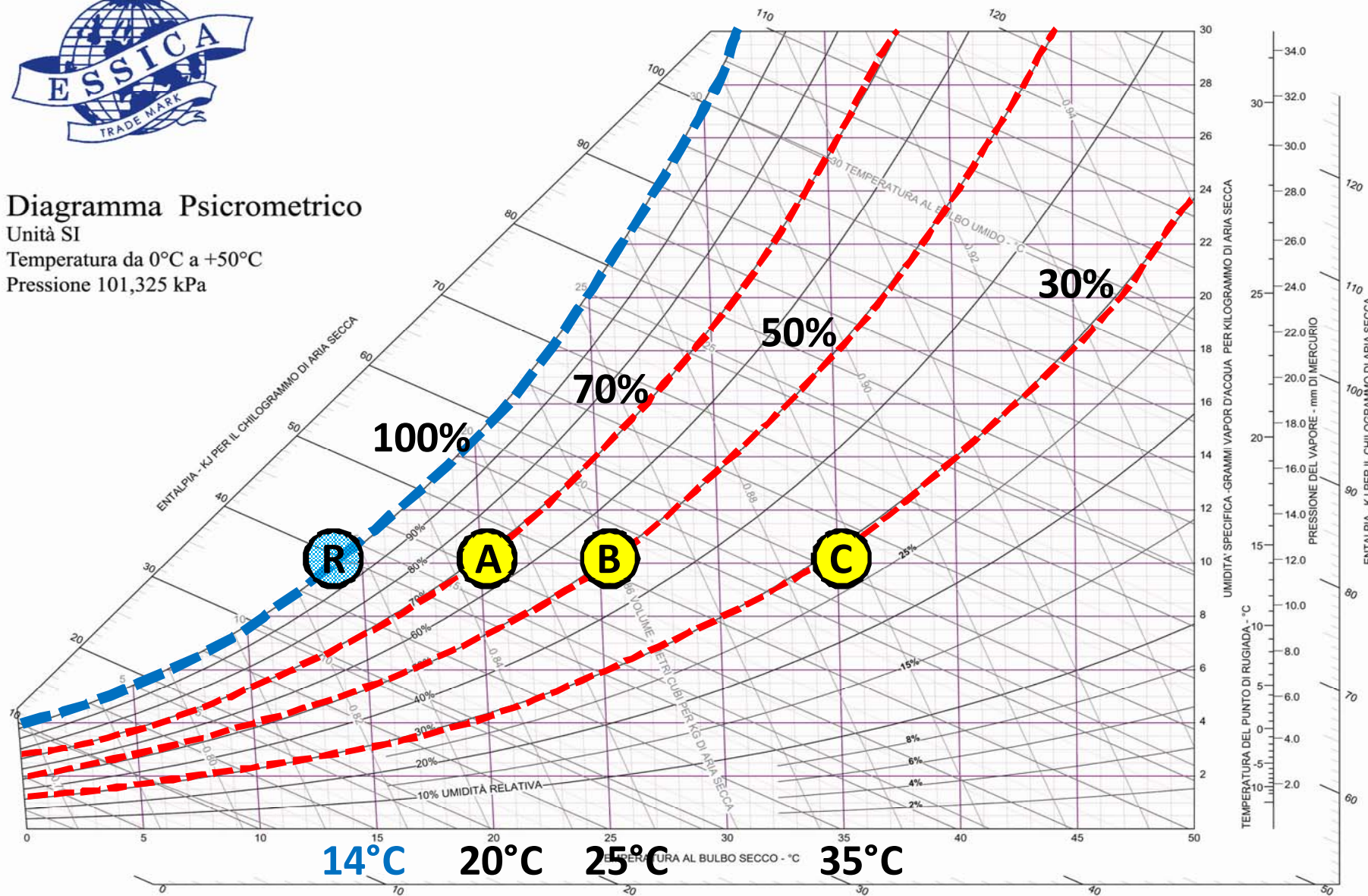


DIAGRAMMA PSICROMETRICO ASHRAE

Umidità relativa U.R. (%)



Diagramma Psicrometrico
Unità SI
Temperatura da 0°C a +50°C
Pressione 101,325 kPa



Affinità per l'acqua dei materiali edilizi

La maggior parte dei materiali da costruzione ha grande affinità per le molecole d'acqua; normalmente quest'ultima si deposita sulla superfici delle pareti in opportune condizioni fisiche formando film di liquido mono e poli molecolare.

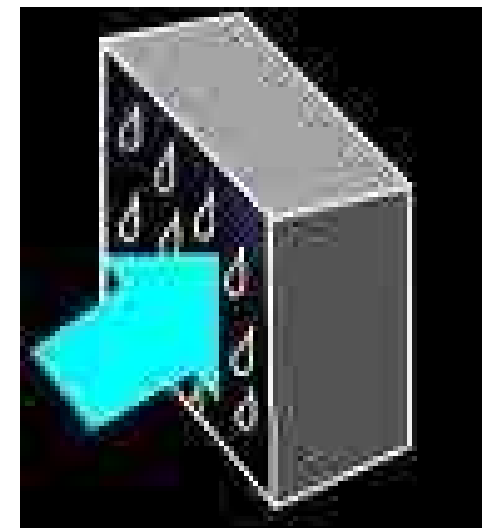
A seconda della natura del materiale l'acqua può penetrare all'interno delle strutture come liquido per capillarità e soprattutto come vapore attraverso i pori per effetto della differenza di pressione parziale che esiste tra gli ambienti separati dalla parete.

Condensazione

Il fenomeno più pericoloso e al quale quindi va prestata la massima attenzione è quello della condensazione che è opportuno distinguere in visibile o superficiale e nascosta.

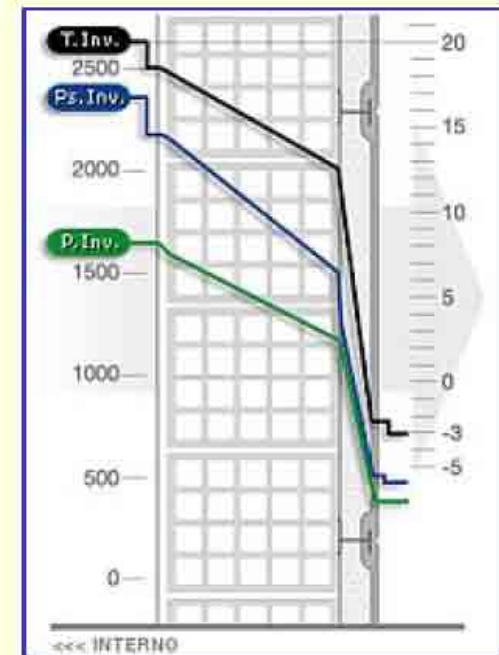
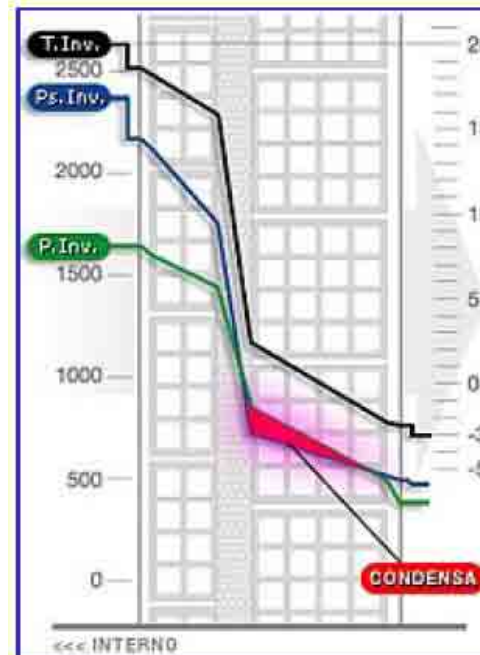
Condensazione Visibile

Tale fenomeno si può evitare solo se si aumenta la temperatura superficiale della parete isolandola ulteriormente oppure riscaldando la superficie ad esempio con l'irraggiamento diretto di un corpo scaldante o facendola lambire da una corrente d'aria; un intervento di natura diversa anche se ho messo in termini impiantistici potrebbe essere quello di deumidificare l'ambiente. In ogni caso occorre comunque facilitare al massimo lo scambio termico tra aria e parete.



Condensazione Nascosta

La condensazione nascosta è quella che si ha quando il vapore, migrando nei pori della parete, attraversa zone a temperatura più bassa di quella di rugiada, condensando come liquido. Oltre alle alterazioni chimiche dovuti all'acqua alle quali si è già fatto cenno sopra, nella stagione invernale si possono avere temperature tali per cui il liquido solidifica come ghiaccio, aumentando di volume e provocando di conseguenza anche alterazioni meccaniche, cricche, fessure, sgretolamenti..



Metodo di calcolo

Legge di Fick

La legge di Fick afferma che la portata di massa di vapore che si diffonde in un materiale poroso in una certa direzione, in condizioni stazionarie, è proporzionale al gradiente di pressione parziale ed all'area della superficie nella direzione normale a quella considerata, attraverso un coefficiente dipendente dal materiale, chiamato coefficiente di diffusione o permeabilità

$$g = \frac{p_a - p_b}{\frac{1}{\beta'_a} + \frac{s}{\delta} + \frac{1}{\beta'_b}}$$

Dove:

g (kg/m²s) = portata di vapore diffuso per unità di area di parete;

p_a , p_b (Pa) = pressioni parziali del vapor d'acqua nei due ambienti separati dalla parete;

δ (kg m/N s = (kg/m s Pa) permeabilità del materiale che compone la parete;

S = Spessore dello strato considerato in metri.

β' = coefficiente limite di diffusione (**trascurabili**).

Metodo di calcolo "definizioni"

Resistenza alla diffusione del vapore

$$r_{dm} = \frac{S}{\delta_m}$$

Dove:

δ_m (kg m/N s) = (kg/m s Pa) permeabilità del materiale che compone la parete;
S = Spessore dello strato considerato in metri.

Resistenza alla diffusione del vapore di pareti multistrato

$$Z_{tot,v} = \sum_{l=1}^n r_{dm,l} = \sum_{l=1}^n \frac{S_l}{\delta_{m,l}}$$

Metodo di calcolo "definizioni"

L'inverso della Resistenza alla diffusione del vapore si definisce Permeanza

$$P = \left(\frac{1}{\beta'_a} + \sum_{n=1}^N \frac{s_n}{\delta_n} + \frac{1}{\beta'_b} \right)^{-1}$$

Permeanza (formula semplificata).

$$P = \left(\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\delta_{m,i}} \right)^{-1}$$

Metodo di calcolo “pressione di vapore di saturazione”

La pressione di vapore di saturazione può essere espressa in funzione della temperatura con la seguente formula

$$P_{vs} = 611.85 e^{\left(\frac{17.502 \cdot t}{240.9 + t}\right)}$$

Dove:

P_{vs} = pressione del vapore di saturazione espressa in [Pa];

t = temperatura dell'aria espressa in [°C].

Pressione di vapore parziale

$$P_v = P_{vs} \cdot \varphi$$

Dove:

P_v = pressione del vapore parziale espressa in [Pa];

P_{vs} = pressione del vapore di saturazione espressa in [Pa];

φ = umidità relativa espressa in [%].

Metodo Grafico “LA VERIFICA DI GLASER”

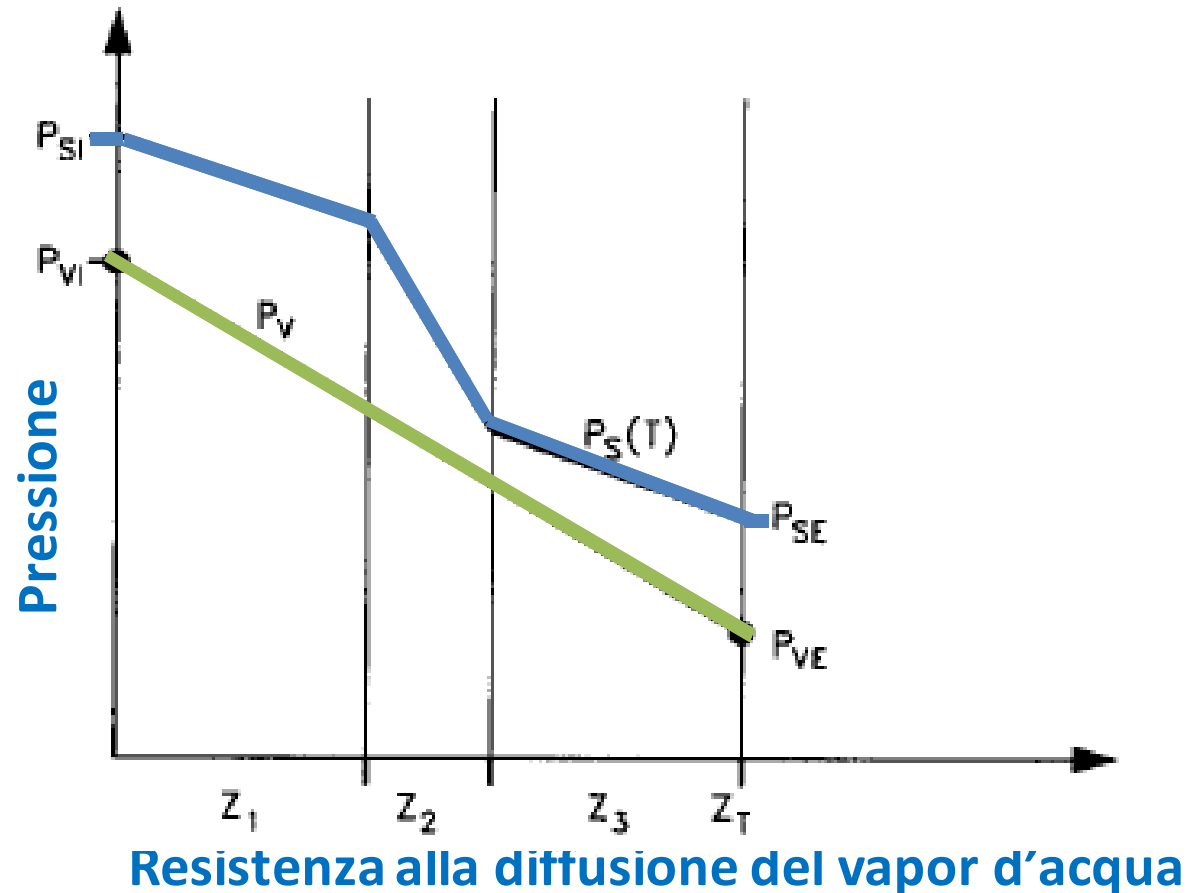
Per la verifica della diffusione del vapore attraverso le pareti si utilizza il metodo di *Glaser*. Esso si basa su alcune ipotesi semplificative, e in particolare:

1. Il regime si suppone *stazionario*;
2. Il modello è *monodimensionale*;
3. Si suppone che il vapore sia trasportato solamente per diffusione.

Di solito si trascurano le resistenze al trasporto convettivo del vapore in corrispondenza delle interfacce pareti interne e/o esterne e l'aria e pertanto si pongono p'_{vi} e p'_{ve} pari alle pressioni parziali del vapore all'interno e all'esterno dell'ambiente.

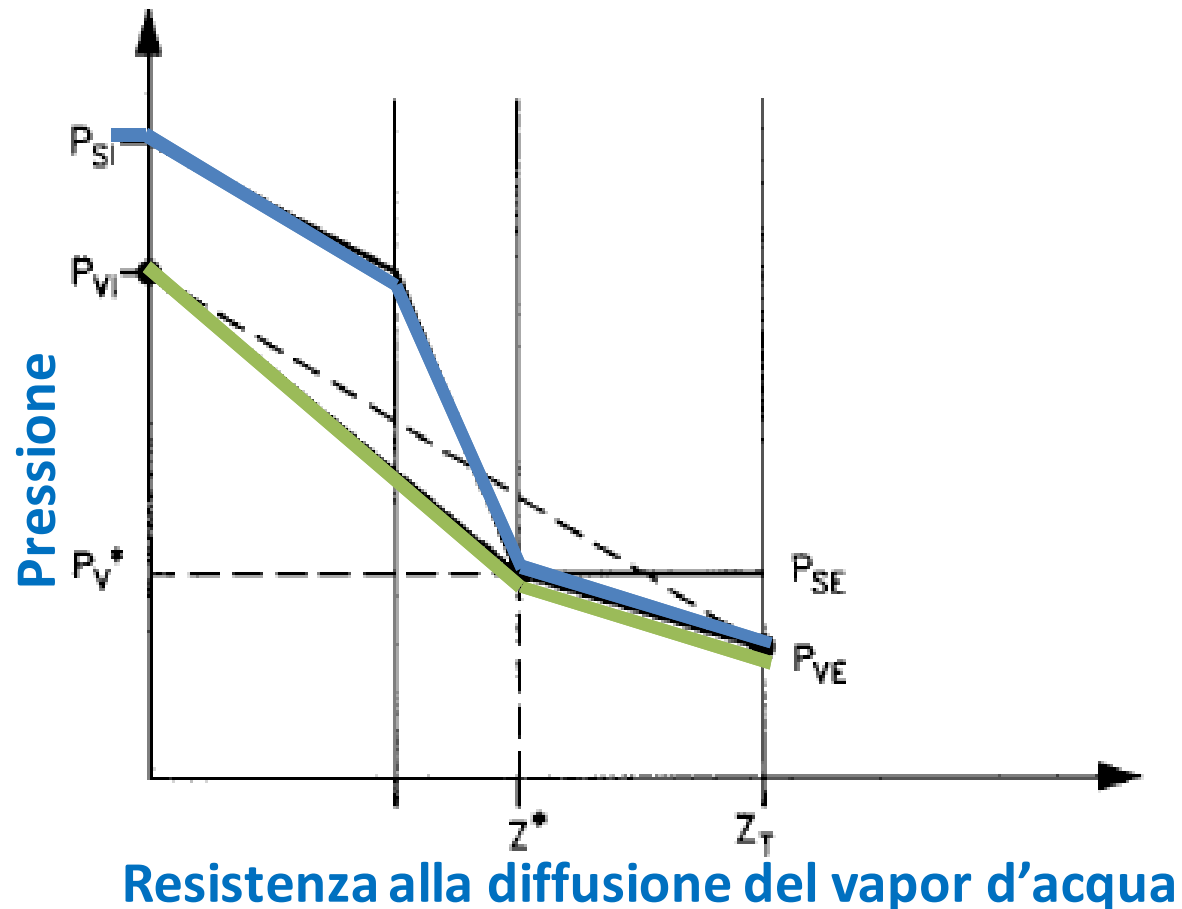
Metodo Grafico "LA VERIFICA DI GLASER"

Se non si ha formazione di condensa risulta $g_v = \text{costante}$ e allora l'andamento della pressione di vapore in corrispondenza dei vari strati è funzione lineare della resistenza z_T .



Metodo Grafico "LA VERIFICA DI GLASER"

Se la pressione parziale del vapore, p_v , supera la pressione di saturazione, p_s , alla temperatura corrispondente allora si ha la formazione della condensa e quindi si dovrà ridurre la portata di vapore g_v della quantità di condensa formatasi.



Metodo di calcolo “LA VERIFICA DI GLASER”

Non è necessario imporre che la condensa interna dei materiali sia nulla ma è sufficiente imporre che essa, W_c sia pari al contenuto massimo di acqua previsto per il dato materiale.

$$W_c + W_e \leq 0$$

$$W_c \leq W_{amm}$$

Dove:

W_c = Condensa interna del materiale considerato;

W_{amm} = Contenuto di acqua massimo previsto per il materiale considerato;

W_e = Quantità d'acqua vaporizzabile durante la stagione estiva.

ANALOGIA CONCETTUALE TRA IL FLUSSO DI CALORE E IL FLUSSO DI VAPORE

<i>Trasmissione del calore</i>			<i>Diffusione del vapore</i>		
<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità misura</i>	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità misura</i>
<i>trasmissione</i>	$U = 1/R_G = 1/\sum R_i$	(W/m^2K)	<i>permeanza</i>	$\Pi = 1/R_{v,t} = 1/\sum R_{v,i}$	$(g/m^2 s Pa)$
<i>conducibilità termica</i>	λ	(W/mK)	<i>permeabilità al vapore</i>	δ	$(g/m s Pa)$
<i>resistenza termica</i>	$R_i = s_i / \lambda_i$	(m^2K/W)	<i>resistenza al flusso di vapore</i>	$R_{v,i} = s_i / \delta_i$	$(m^2 s Pa/g)$
<i>differenza di temperatura</i>	ΔT	$(K) \text{ o } (^{\circ}C)$	<i>differenza di pressione</i>	Δp	(Pa)
<i>potenza termica</i>	$Q = US (\Delta T)$	(W)	<i>flusso di vapore</i>	$\Phi = \Pi S (\Delta p)$	(g/s)

Barriera al vapore

Verifica della condensa

<i>Materiale</i>	$\delta \times 10^9$	μ
<u>Calcestruzzo</u>	Kg/m h Pa	-
Magro, di sabbia e ghiaia	7	100
Armato, di sabbia e ghiaia	14	50
Di argilla espansa (1100 kg/m ³)	65	10
<u>Intonaco</u>		
Plastico, per esterno	45	15
Gesso	85	8
Cemento e sabbia	22	30
<u>Muratura</u>		
Mattoni pieni	65	10
Blocchi cementizi	75	9
Laterizio forato	85	8
Pietra naturale (2000 kg/m ³)	25	28

Barriera al vapore

Verifica della condensa

<i>Materiale</i>	$\delta \times 10^9$	μ
<u>Pannelli lignei</u>		
Legno duro compatto	14	50
Legno Compensato	3.5	200
Truciolare collato	14	50
Truciolare fortemente collato	7	100
<u>Fibre minerali</u>		
Fibra di vetro (30 kg/m ³)	330	2
Fibra di coppa di altoforno (100kg/m ³)	135	5
<u>Materie plastiche</u>		
Polistirolo espanso (30 kg/m ³)	7	100
Poliuretano espanso (40 kg/m ³)	11	60
<u>Barriere al vapore</u>		
Polietilene (s=0.1mm)	0.017	40x10 ³
Polietilene (s=0.3mm)	0.005	120x10 ³
Alluminio (s=0.025mm)	0.190x10 ⁻⁶	3.5x10 ⁹
Bitume	0.011	60x10 ³

Barriera al vapore

Schema muratura a cassetta con interposto isolante termico e relativo andamento delle temperature interne

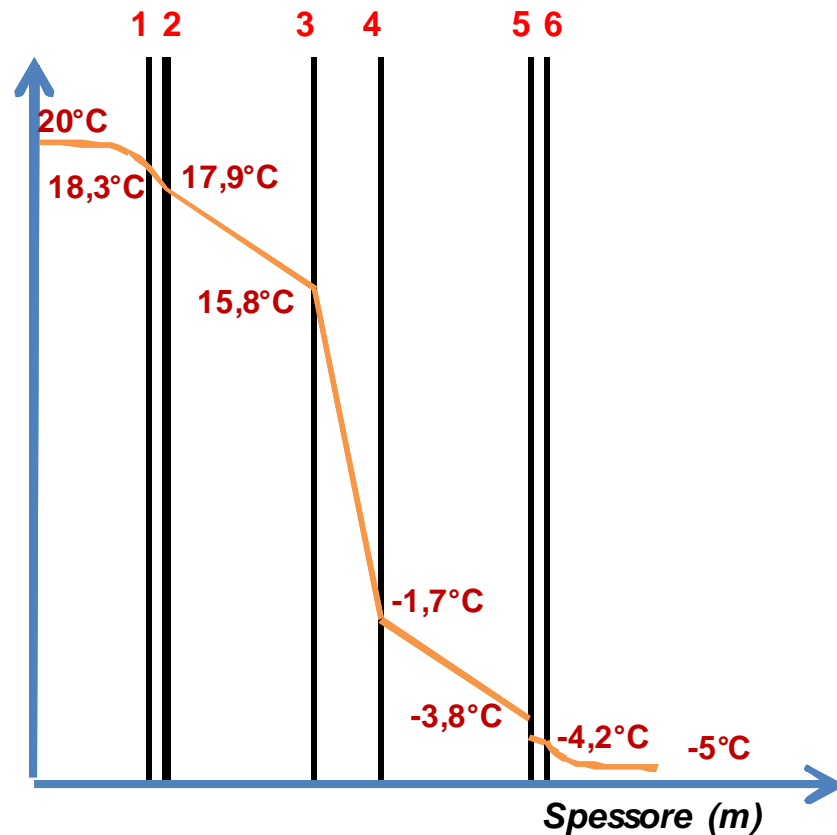
Stratigrafia:

1=Intonaco

2=Mattone pieno

3=Lana di vetro

Andamento delle temperature nella parete



Verifica della condensa

$$T_1 = T_{pi} = 20 - 14 * (1/8) = 18,3^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 18,3 - 14 * (0,02/0,80) = 17,9^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 17,9 - 14 * (0,12/0,81) = 15,8^\circ\text{C}$$

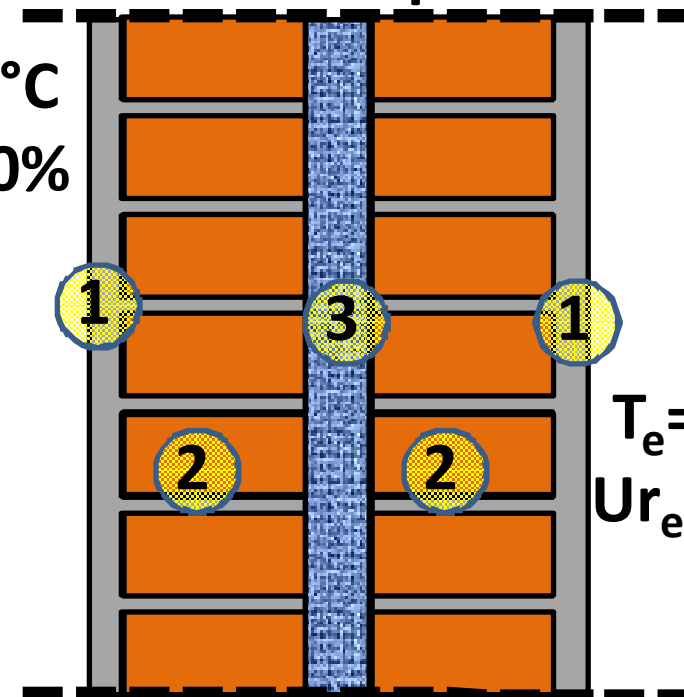
$$T_4 = 15,8 - 14 * (0,05/0,04) = -1,7^\circ\text{C}$$

$$T_5 = -1,7 - 14 * (0,12/0,81) = -3,8^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 3,8 - 14 * (0,02/0,69) = -4,2^\circ\text{C}$$

Muratura a cassetta con isolante termico interposto

$T_i = 20^\circ\text{C}$
 $U_{ri} = 50\%$



$T_e = -5^\circ\text{C}$
 $U_{re} = 80\%$

Barriera al vapore

Si calcola il valore della pressione parziale del vapore nelle condizioni di saturazione p_s in corrispondenza della superficie di ogni strato di materiale, in funzione della temperatura superficiale di ogni singolo strato utilizzando la formula:

$$p_{vs} = 611,85 e^{\left(\frac{17,502 \cdot t}{240,9+t}\right)}$$

$$T_1 = T_{pi} = 18,3 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad p_{s1} = 2103 \text{ Pa}$$

$$T_2 = 17,9 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad p_{s2} = 2049 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 15,8 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad p_{s3} = 1794 \text{ Pa}$$

$$T_4 = - 1,7 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad p_{s4} = 530 \text{ Pa}$$

$$T_5 = - 3,8 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad p_{s5} = 445 \text{ Pa}$$

$$T_6 = T_{pe} = - 4,2 \text{ °C} \quad \Rightarrow \quad p_{s6} = 429 \text{ Pa}$$

Barriera al vapore

Si calcola il valore degli spessori equivalenti di ogni singolo strato di materiale, definiti come il prodotto dello spessore reale del materiale per il corrispondente valore della resistenza al passaggio del vapore del relativo materiale, cioè: $s'_i = s_i \mu_i$

Fattore di resistenza relativo alla diffusione del vapore dato dal rapporto:

$$\mu_i = \frac{r_{v,mat}}{r_{v,ref}}$$

$$s'_{intonaco} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

$$s'_{mattoni} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

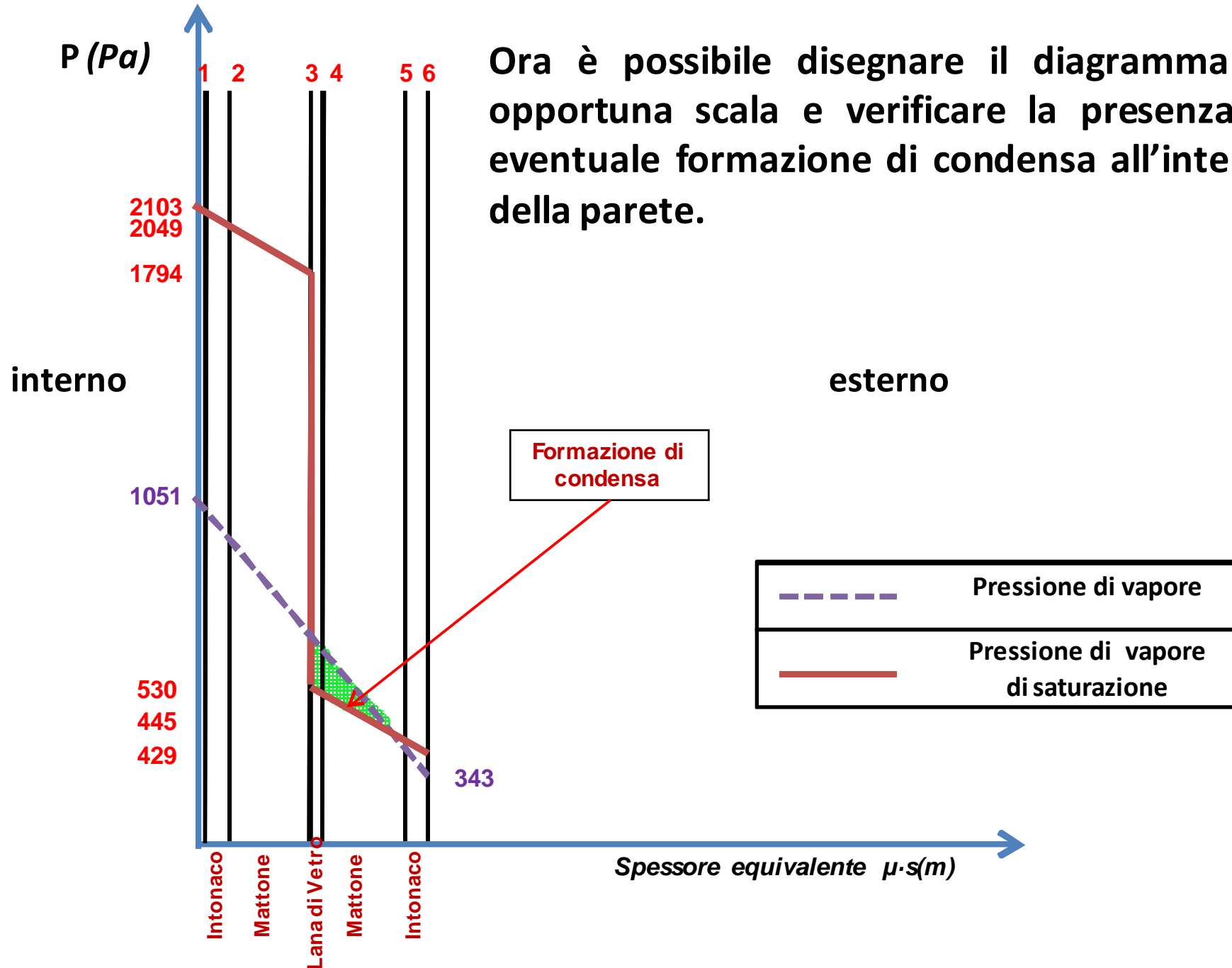
$$s'_{isolante} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ m}$$

$$s'_{mattoni} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

$$s'_{intonaco} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

Barriera al vapore

Verifica della condensa



Barriera al vapore

Utilizzo di una barriera al vapore in polietilene dello spessore di 0,1 mm posizionata sul lato caldo della parete, cioè partendo dall'interno, prima dell'isolante termico

dal punto di vista termico, tale barriera determina un apporto trascurabile avendo una resistenza termica molto bassa, per cui si può considerare inalterato il valore della trasmittanza e della potenza termica trasmessa attraverso la parete rispetto al caso iniziale descritto.

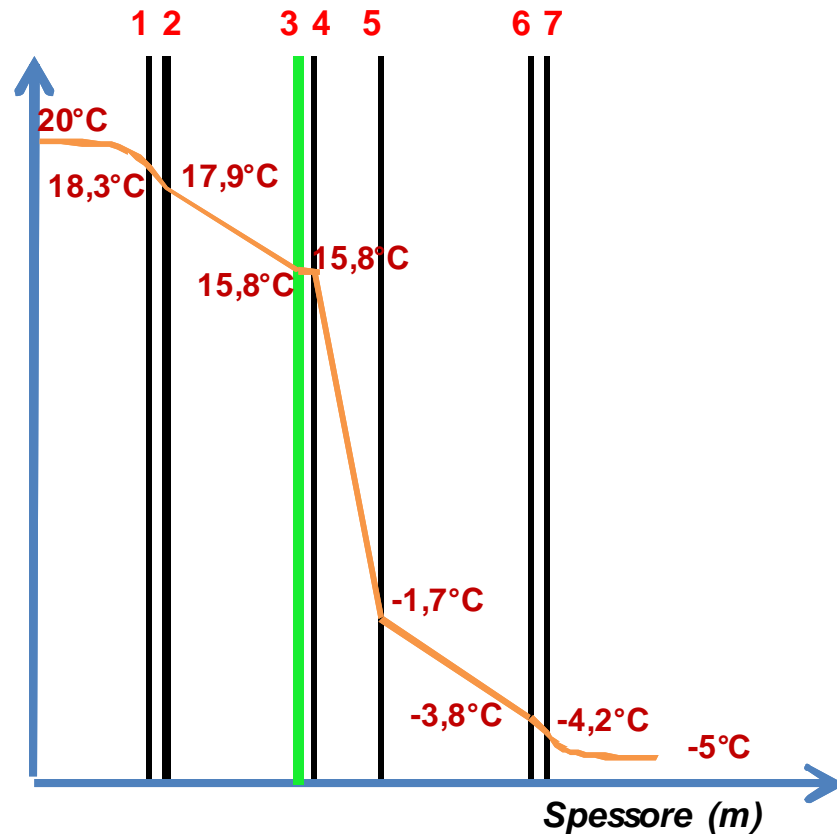
Barriera al vapore

Verifica della condensa

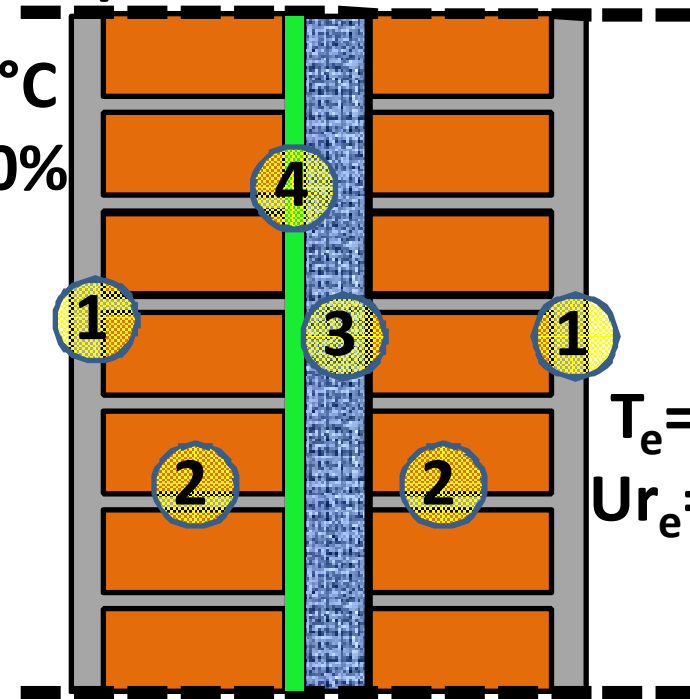
Di conseguenza rimangono invariati i valori delle temperature superficiali in corrispondenza di ogni singolo strato della parete e quindi anche l'andamento delle stesse, con l'unica differenza che si avrà uno strato di materiale in più.

Muratura a cassetta con isolante termico interposto e barriera al vapore

Andamento delle temperature nella parete



$T_i = 20^\circ\text{C}$
 $U_{r_i} = 50\%$



$T_e = -5^\circ\text{C}$
 $U_{r_e} = 80\%$

Stratigrafia: 1=Intonaco 2=Mattone pieno 3=Lana di vetro 4=Barriera al Vapore

Barriera al vapore

Rimanendo inalterato l'andamento delle temperature interne alla parete, non cambia il valore della pressione parziale del vapore nelle condizioni di saturazione p_s in corrispondenza della superficie di ogni strato di materiale, con la differenza che ora si avrà uno strato di materiale in più:

$T_1 = T_{pi} = 18,3 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s1} = 2103 \text{ Pa}$
$T_2 = 17,9 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s2} = 2049 \text{ Pa}$
$T_3 = 15,8 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s3} = 1794 \text{ Pa}$
$T_4 = 15,8 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s4} = 1794 \text{ Pa}$
$T_5 = - 1,7 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s5} = 530 \text{ Pa}$
$T_6 = - 3,8 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s6} = 445 \text{ Pa}$
$T_7 = T_{pe} = - 4,2 \text{ °C}$	\Rightarrow	$p_{s7} = 429 \text{ Pa}$

Barriera al vapore

Si calcola il valore degli spessori equivalenti di ogni singolo strato di materiale, definiti come il prodotto dello spessore reale del materiale per il corrispondente valore della resistenza al passaggio del vapore del relativo materiale, cioè $s'_i = s_i \mu_i$;

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

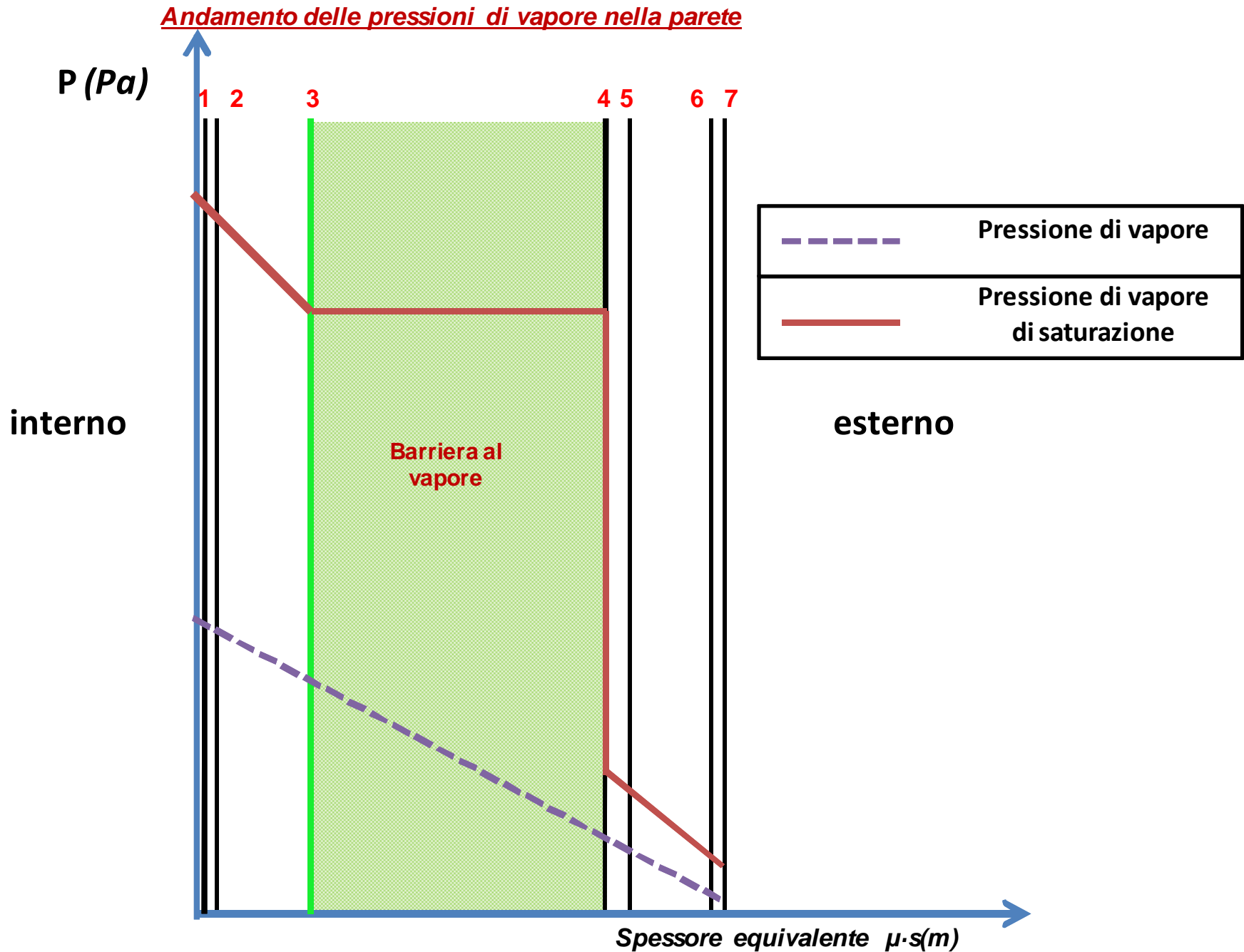
$$s'_{\text{isolante}} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ m}$$

$$s'_{\text{barriera}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^3 = 4 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

Barriera al vapore



Esempio di calcolo

Dati:

$$\lambda_1 = 1,4 \text{ W/mK}$$

$$S_1 = 2 \text{ cm}$$

$$\delta_1 = 18.75 \text{ g/m s Pa} = \delta_5$$

$$C_2 = 5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$S_2 = 8 \text{ cm}$$

$$\delta_2 = 37.5 \text{ g/m s Pa} = \delta_4$$

$$\lambda_3 = 0,035 \text{ W/mK}$$

$$S_3 = 4 \text{ cm}$$

$$\delta_3 = 3.75 \text{ g/m s Pa}$$

$$C_4 = 3,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$S_4 = 12 \text{ cm}$$

$$\lambda_5 = 1,4 \text{ W/mK}$$

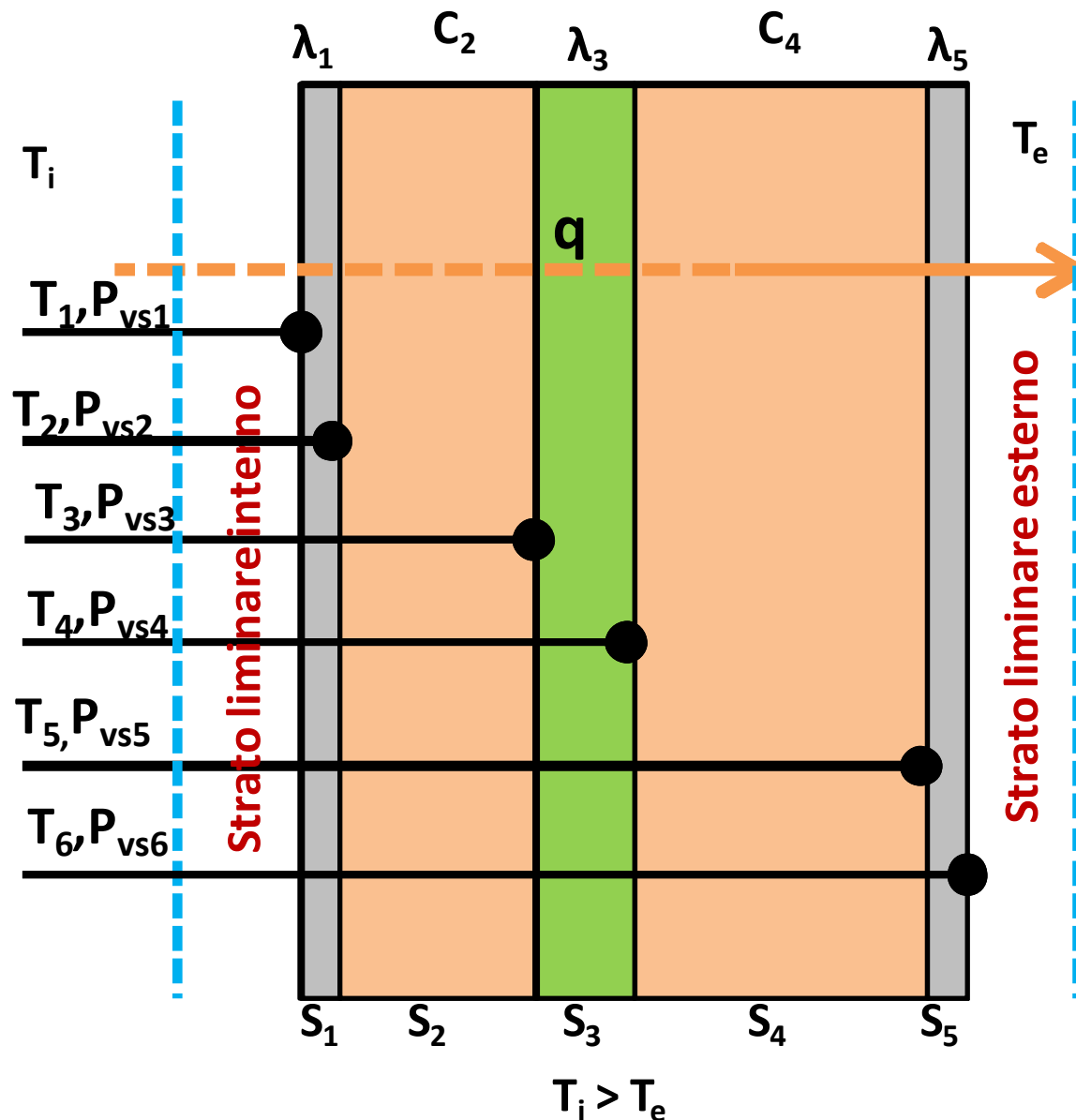
$$S_5 = 2 \text{ cm}$$

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

$$\phi_i = 65\%$$

$$T_e = 3^\circ\text{C}$$

$$\phi_e = 75\%$$



$$T_i := 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_e := 3 \text{ }^\circ\text{C} \quad S_1 := 0.02\text{m} \quad S_2 := 0.08\text{m} \quad S_3 := 0.055\text{m} \quad S_4 := 0.12\text{m} \quad S_5 := S_1$$

$$\varphi_i := 65\% \quad \varphi_e := 75\% \quad C_2 := 5.0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad C_4 := 3.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \lambda_1 := 1.4 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \lambda_3 := 0.035 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \lambda_5 := \lambda_1$$

$$\alpha_i := 7.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \alpha_e := 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad A_1 := 7 \cdot \text{m} \cdot 3\text{m} = 21 \text{ m}^2 \quad A_3 := A_1$$

$$A_2 := 8 \cdot \text{m} \cdot 3\text{m} = 24 \text{ m}^2 \quad A_4 := A_1$$

$$R_{\text{tot}} := \frac{1}{\alpha_i} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{S_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_e} = 2.286 \frac{\text{K} \cdot \text{s}^3}{\text{kg}} \quad U_{\text{tot}} := \frac{1}{R_{\text{tot}}} = 0.437 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$S_{\text{tot}} := S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = 0.295 \text{ m}$$

Calcolo l'andamento delle temperature considerando che il flusso di calore che attraversa il singolo strato e lo stesso che attraversa l'intero muro per cui posso scrivere

$$R_i := \frac{1}{\alpha_i} \quad R_1 := \frac{S_1}{\lambda_1} \quad R_2 := \frac{1}{C_2} \quad R_3 := \frac{S_3}{\lambda_3} \quad R_4 := \frac{1}{C_4} \quad R_5 := \frac{S_5}{\lambda_5} \quad R_e := \frac{1}{\alpha_e}$$

$$q := \frac{1}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 7.437 \frac{\text{kg}}{\text{s}^3}$$

$$q = q_1$$

$$T_1 := T_i - \frac{R_i}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 292.158\text{K}$$

$$t_1 := \frac{T_1}{K} - 273.15 = 19.008$$

$$T_2 := T_1 - \frac{R_1}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 292.052\text{K}$$

$$t_2 := \frac{T_2}{K} - 273.15 = 18.902$$

$$T_3 := T_2 - \frac{R_2}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 290.565\text{K}$$

$$t_3 := \frac{T_3}{K} - 273.15 = 17.415$$

$$T_4 := T_3 - \frac{R_3}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 278.878\text{K}$$

$$t_4 := \frac{T_4}{K} - 273.15 = 5.728$$

$$T_5 := T_4 - \frac{R_4}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 276.554\text{K}$$

$$t_5 := \frac{T_5}{K} - 273.15 = 3.404$$

$$T_6 := T_5 - \frac{R_5}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 276.447\text{K}$$

$$t_6 := \frac{T_6}{K} - 273.15 = 3.297$$

Verifica

$$T_{7e} := T_6 - \frac{R_e}{R_{tot}} \cdot (T_i - T_e) = 276.15\text{K}$$

$$t_{7e} := \frac{T_{7e}}{K} - 273.15 = 3$$

Verifica del Glaser

$$P_{vs_1} := 611.85 \text{ Pa} \cdot e^{\left(\frac{17.502 \cdot t_1}{240.9 + t_1} \right)} = 2.201 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{v_1} := P_{vs_1} \cdot \varphi_i = 1.43 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_2} := 611.85 \cdot \text{Pa} \cdot e^{\left(\frac{17.502 \cdot t_2}{240.9 + t_2} \right)} = 2.186 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_3} := 611.85 \cdot \text{Pa} \cdot e^{\left(\frac{17.502 \cdot t_3}{240.9 + t_3} \right)} = 1.991 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_4} := 611.85 \cdot \text{Pa} \cdot e^{\left(\frac{17.502 \cdot t_4}{240.9 + t_4} \right)} = 918.704 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_5} := 611.85 \cdot \text{Pa} \cdot e^{\left(\frac{17.502 \cdot t_5}{240.9 + t_5} \right)} = 780.81 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_6} := 611.85 \cdot \text{Pa} \cdot e^{\left(\frac{17.502 \cdot t_6}{240.9 + t_6} \right)} = 774.969 \text{ Pa}$$

$$P_{v_6} := P_{vs_6} \cdot \varphi_e = 581.227 \text{ Pa}$$

Verifica numerica della condensa

$$\delta_1 := 12.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}} \quad \delta_2 := 28.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}} \quad \delta_3 := 2.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}} \quad \delta_5 := \delta_1 \quad \delta_4 := \delta_2$$

$$Z_{\text{tot}} := \frac{S_1}{\delta_1} + \frac{S_2}{\delta_2} + \frac{S_3}{\delta_3} + \frac{S_4}{\delta_4} + \frac{S_5}{\delta_5} = 37.655 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Calcolo la permeanza

$$\Pi_{\text{tot}} := \frac{1}{Z_{\text{tot}}} = 26.557 \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

$$Z_1 := \frac{S_1}{\delta_1} = 1.569 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A := 1 \cdot \text{m}^2 \quad \Delta p := P_{v_1} - P_{v_6} = 849.177 \text{Pa}$$

$$Z_2 := \frac{S_2}{\delta_2} = 2.807 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$g_{\text{tot}} := \Pi_{\text{tot}} \cdot A \cdot \Delta p = 22.552 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Z_3 := \frac{S_3}{\delta_3} = 27.5 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$g_{\text{tot1}} := \frac{1}{Z_{\text{tot}}} \cdot \Delta p = 22.552 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$Z_4 := \frac{S_4}{\delta_4} = 4.211 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Z_5 := \frac{S_5}{\delta_5} = 1.569 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{v_1} = 1.43 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{v2} := P_{v_1} - \frac{Z_1}{Z_{\text{tot}}} \Delta p = 1.395 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_2} = 2.186 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{v3} := P_{v2} - \frac{Z_2}{Z_{\text{tot}}} \Delta p = 1.332 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_3} = 1.991 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_{v4} := P_{v3} - \frac{Z_3}{Z_{\text{tot}}} \Delta p = 711.556 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_4} = 918.704 \text{ Pa}$$

$$P_{v5} := P_{v4} - \frac{Z_4}{Z_{\text{tot}}} \Delta p = 616.602 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_5} = 780.81 \text{ Pa}$$

$$P_{v6} := P_{v5} - \frac{Z_5}{Z_{\text{tot}}} \Delta p = 581.227 \text{ Pa}$$

$$P_{vs_6} = 774.969 \text{ Pa}$$

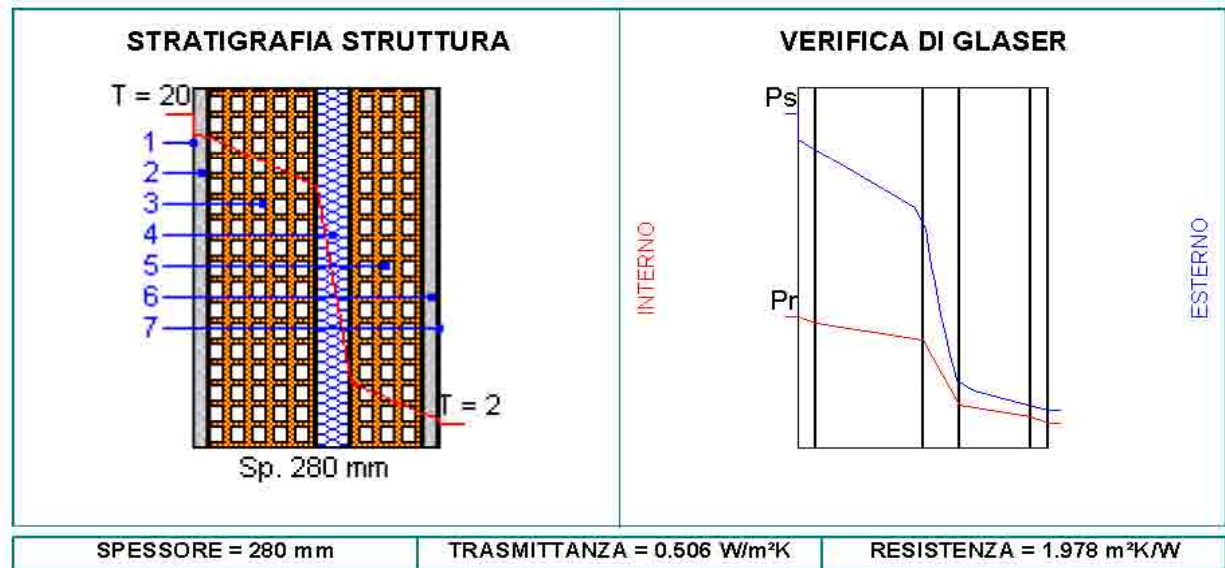
CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI

Codice Struttura: parete01

Descrizione Struttura: Paretti esterne

N.	DESCRIZIONE STRATO (dall'interno all'esterno)	s [mm]	lambda [W/mK]	C [W/m²K]	M.V. [Kg/m³]	P<50*10 ¹² [Kg/msPa]	R [m²K/W]
1	Adduttanza Interna	0		7.700			0.130
2	Malta di calce o di calce e cemento	20	0.900	45.000	1.800	8.500	0.022
3	Mattone forato di laterizio (250*120*250) spessore 120	120		3.226	1.800	20.570	0.310
4	Poliuretani in lastre ricavate da blocchi - mv.40	40	0.032	0.797	40	1.800	1.254
5	Mattone forato di laterizio (250*80*250) spessore 80	80		5.000	1.800	20.570	0.200
6	Malta di calce o di calce e cemento	20	0.900	45.000	1.800	8.500	0.022
7	Adduttanza Esterna	0		25.000			0.040

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.V. = Massa Volumica; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; R = Resistenza termica dei singoli strati



VERIFICA IGROMETRICA						
CONDIZIONE	Ti [°C]	Psi [Pa]	Pri [Pa]	Te [°C]	Pse [Pa]	Pre [Pa]
SITUAZIONE LIMITE (vedi grafico)	20.0	2.339	1.216	2.0	706	635
CONVENZIONALE INVERNALE (60 gg)	20.0	2.339	1.170	2.0	706	635
CONVENZIONALE ESTIVA (90 gg)	20.0	2.339	1.638	20.0	2.339	1.638

Dalla Verifica Convenzionale risulta che la struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Nella situazione limite la struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Ti = Temperatura Interna; Psi = Pressione di saturazione interna; Pri = Pressione relativa interna; Te = Temperatura esterna; Pse = Pressione di saturazione esterna; Pre = Pressione relativa esterna.

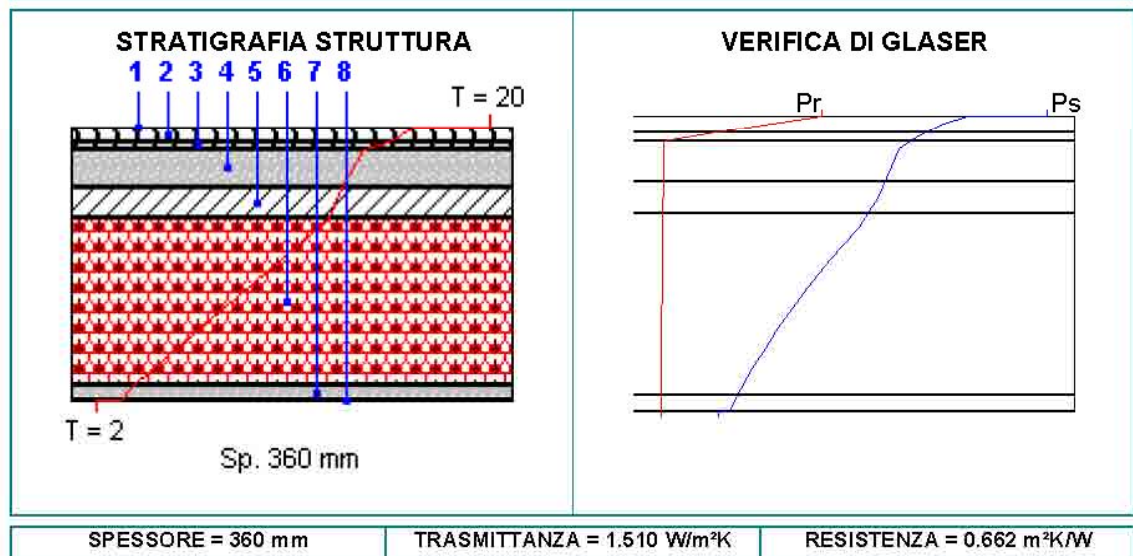
CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI

Codice Struttura: Solaio1

Descrizione Struttura: Solaio esterno

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore)	s [mm]	lambda [W/mK]	C [W/m²K]	M.V. [Kg/m³]	P<50*10 ¹² [Kg/msPa]	R [m²K/W]
1	Adduttanza Superiore	0		7.700			0.130
2	Cartone catramato.	20	0.500	25.000	1.600	0.010	0.040
3	Fogli di materiale sintetico.	10	0.230	23.000	1.100	0.010	0.043
4	Malta di cemento.	50	1.400	28.000	2.000	8.500	0.036
5	CLS di aggregati naturali - a struttura chiusa - pareti protette - mv.2400.	40	1.909	47.725	2.400	1.300	0.021
6	Blocco da solaio di laterizio (495*160*250) spessore 220	220		3.030	1.800	18.000	0.330
7	Malta di calce o di calce e cemento.	20	0.900	45.000	1.800	8.500	0.022
8	Adduttanza Inferiore	0		25.000			0.040

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.V. = Massa Volumica; P<50*10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; R = Resistenza termica dei singoli strati



VERIFICA IGROMETRICA						
CONDIZIONE	Ts [°C]	Pss [Pa]	Prs [Pa]	Ti [°C]	Psi [Pa]	Pri [Pa]
SITUAZIONE LIMITE (vedi grafico)	20.0	2.339	1.216	2.0	706	420
CONVENZIONALE INVERNALE (60 gg)	20.0	2.339	1.170	2.0	706	635
CONVENZIONALE ESTIVA (90 gg)	20.0	2.339	1.638	20.0	2.339	1.638

Dalla Verifica Convenzionale risulta che la struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.
Nella situazione limite la struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Ts = Temperatura superiore; Pss = Pressione di saturazione superiore; Prs = Pressione relativa superiore; Ti = Temperatura inferiore; Psi = Pressione di saturazione inferiore; Pri = Pressione relativa inferiore.

CRITERI DI SCELTA DEI MATERIALI

Tralasciando l'importanza del fattore economico, la cosa importante nella scelta dei materiali, SIA IN FASE PROGETTUALE CHE ESECUTIVA, è

**reperire tutte le certificazioni
e le schede tecniche dei prodotti**

CHE COS'E' UNA CERTIFICAZIONE

Il certificato di un ente certificatore attesta, in relazione al prodotto esaminato, che a fronte di:

- **specifiche del materiale** (dimensioni, massa, materiale, denominazione commerciale, ecc.);
- **condizioni di prova** (temperatura, umidità, intervento eseguito, ecc.);
- **metodo di prova** (normative di riferimento);

lo stesso ha dato esito alle caratteristiche certificate.

ATTENZIONE: *un dato certificato non conferisce l'assoluta certezza che lo stesso caratterizzerà il materiale che si andrà ad utilizzare in cantiere o comunque una volta in opera. È quindi essenziale, per il prescrittore, conoscere le caratteristiche intime e di utilizzo dei vari Materiali, nonché i corretti parametri di correzione.*

Efficienza Energetica Del sistema Edificio-Impianti
L'Involucro e gli Impianti tecnologici in Edilizia