

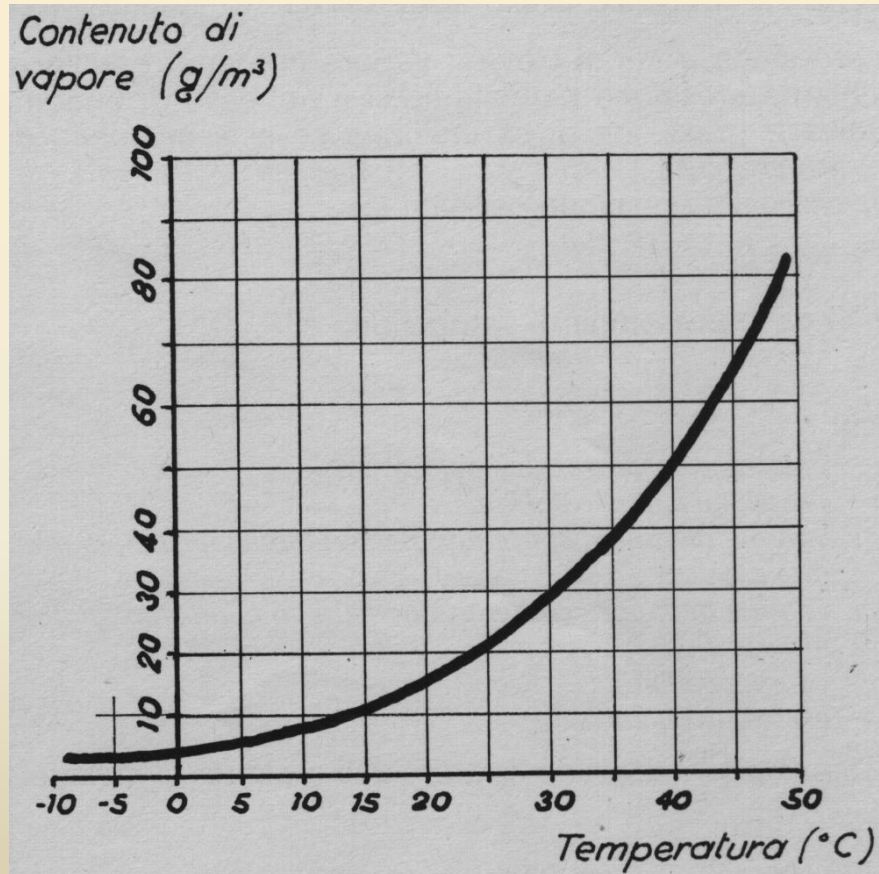
# Il Vapor d'acqua all'interno di una parete e il diagramma di Glaser



- Cos'è il Vapor d'acqua
- Perché esso può condensare all'interno della parete
- Il diagramma di Glaser
- Come evitare questa condensazione
- Un metodo di calcolo della *Barriera al vapore*
- Sicurezza alla Condensa stagionale



# L'Umidità Relativa – UR % - La condensa del vapor d'acqua



Il Punto di Rugiada (condizioni di saturazione) con formazione di condensa per temperatura e per contenuto di vapore

Dalla legge di Gay-Lussac sui gas perfetti, esiste una proporzione diretta tra:

$U_a$  umidità assoluta (g/mc)

$U_s$  umidità saturazione (g/mc)

$U_r\%$  umidità relativa =  $U_a/U_s$  %

$V_a$  volume assoluto di v.a. (mc)

$V_s$  volume di saturazione di v.a. (mc)

$V_r$  volume relativo =  $V_a/V_s$  %

$P_a$  pressione assoluta di v.a. (Pa)

$P_s$  pressione di saturazione di v.a. ( $P_s$ )

$P_r$  pressione relativa =  $P_a/P_s$  %

Queste proporzioni sono uguali perché dipendono dalla quantità di vapore, dunque dal numero delle sue molecole o *moli*

## Il vapor d'acqua all'interno di una parete

Il fluire di questo **gas** in una parete viene riportato, per analogia, al modello di quello utilizzato per spiegare il comportamento del flusso termico:

- **P**, **livello** “termico” delle **pressioni** come **T**, livello termico del corpo;
- fluisce **dalla pressione P** maggiore a quella minore;
- è inversalmente proporzionale a **R<sub>v</sub>**, **resistenza al passaggio del vapor d'acqua** in analogia con la resistenza termica **R**;
- è proporzionale ad **S** superficie di scambio;
- è inversalmente proporzionale ad **s**, lo **spessore**;
- dipende fortemente da **μ**, **coeff. di resistenza al passaggio del vapore**, dipendente dal **tipo** di materiale, dall'umidità e dalla temperatura.

# Coefficiente di **Resistenza** al passaggio di vapore $\mu$

è **relativo** a quello dell'aria ( $\mu = 1$ ) alla stessa temperatura e con lo stesso spessore

Materiale	Densità Kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ Coeff. res. al vapore
Fibre minerali	600	1,2
Cartongesso		6,0
Intonaco gesso		6,2
Intonaco gesso e calce		11,5
Intonaco calce e cemento		15,0
Intonaco cemento	2100	19,0
mattoni forati	1350	6,8
Mattoni pieni	1800	9,8
Calcestruzzo pomice	600	7,0

Materiale	Densità Kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ Coeff. res. al vapore
Calcestruzzo	2400	32,0
Klinker	2050	400,0
Cartonfeltro bitumato	500 gr/mq	10.000,0
Polistirolo esp.	25	60,0
Poliuretano esp.	35	75,0
Cloruro polivinile	25 gr/mq	50.000,0
spalmatura di bitume	300	80.000,0
Fogli Polietilene		100.000,0
Fogli Alluminio	130gr/mq	500.000,0

$\lambda_v$  = coefficiente di **conducibilità del vapore** - è la massa di vapore (in Kg) che attraversa lo spessore di 1 m di un materiale, su una superficie di 1 mq e per una differenza di pressione di 1 Kp/mq. Norma UNI 10351 - Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.



$\mu_c$  = Coefficiente di resistenza al passaggio del vapore nel calcestruzzo in funzione della densità

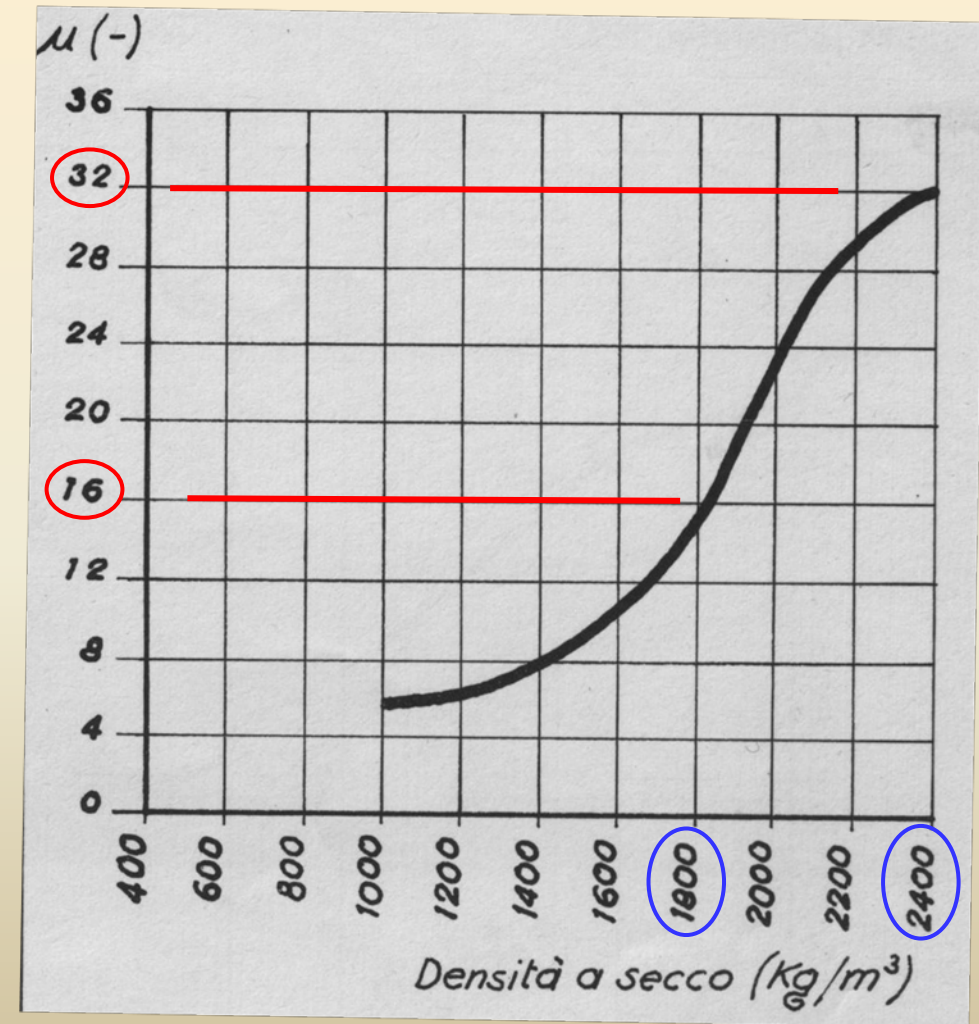
Densità calcestruzzo,  $\delta_c$  in Kg/m<sup>3</sup>

$$2.400 - 1.800 = - 25\%$$

Coefficiente di Resistenza calcestruzzo,  $\mu_c$

$$32 - 16 = - 50\%$$

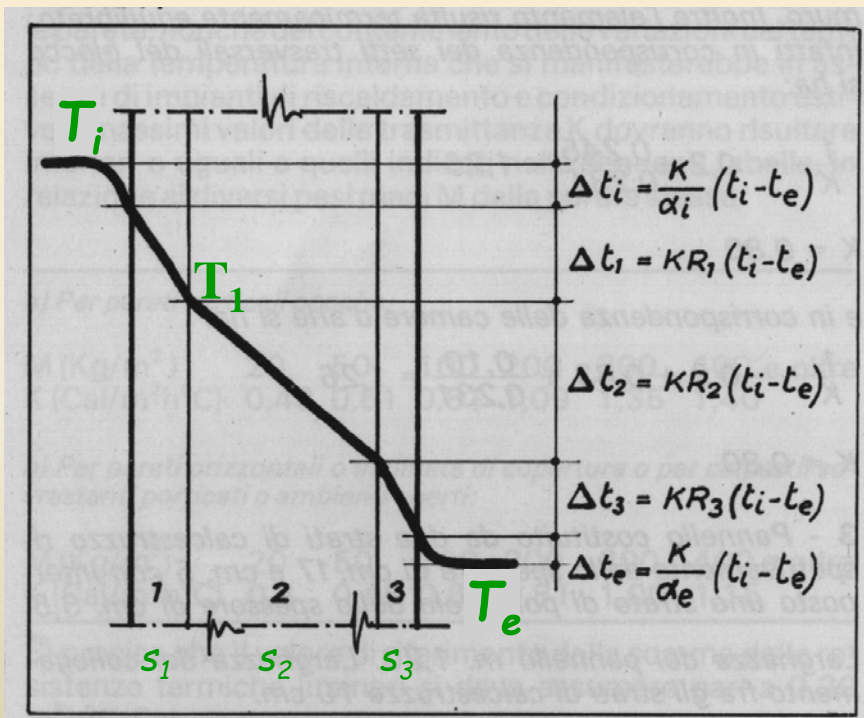
Valori per calcestruzzo alleggerito con inerti "leggeri" di argilla espansa



# Calcolo di Temperature all'interno di una parete

Esercizio utile anche per il diagramma del Glaser

In condizioni invernali



$$\begin{aligned}
 W &= \text{costante} = S K (T_i - T_e) = \\
 &= S [1/(1/\alpha_i + \sum_i s_i/\lambda_i + 1/\alpha_e)] (T_i - T_e) = \\
 &= S (T_i - T_1) / (1/\alpha_i + s_1/\lambda_i)
 \end{aligned}$$

$$S K (T_i - T_e) = S (T_i - T_1) / (1/\alpha_i + s_1/\lambda_i)$$

$$K (T_i - T_e) = (T_i - T_1) / (1/\alpha_i + s_1/\lambda_i)$$

$$K (T_i - T_e) (1/\alpha_i + s_1/\lambda_i) = T_i - T_1$$

Si ricorda:

$$\alpha_i = 8.1 \text{ W/mq } ^\circ\text{C}$$

$$1/\alpha_i = 0.12 \text{ mq } ^\circ\text{C/W}$$

$$T_1 = T_i - K (T_i - T_e) (1/\alpha_i + s_1/\lambda_i)$$

# Resistenza al passaggio del vapore d'acqua - Rv

$$R_v = s/\lambda_v \quad [(mq \text{ h Kp/mq}) / Kg] \quad R_v = s \text{ 160.000 } \mu$$

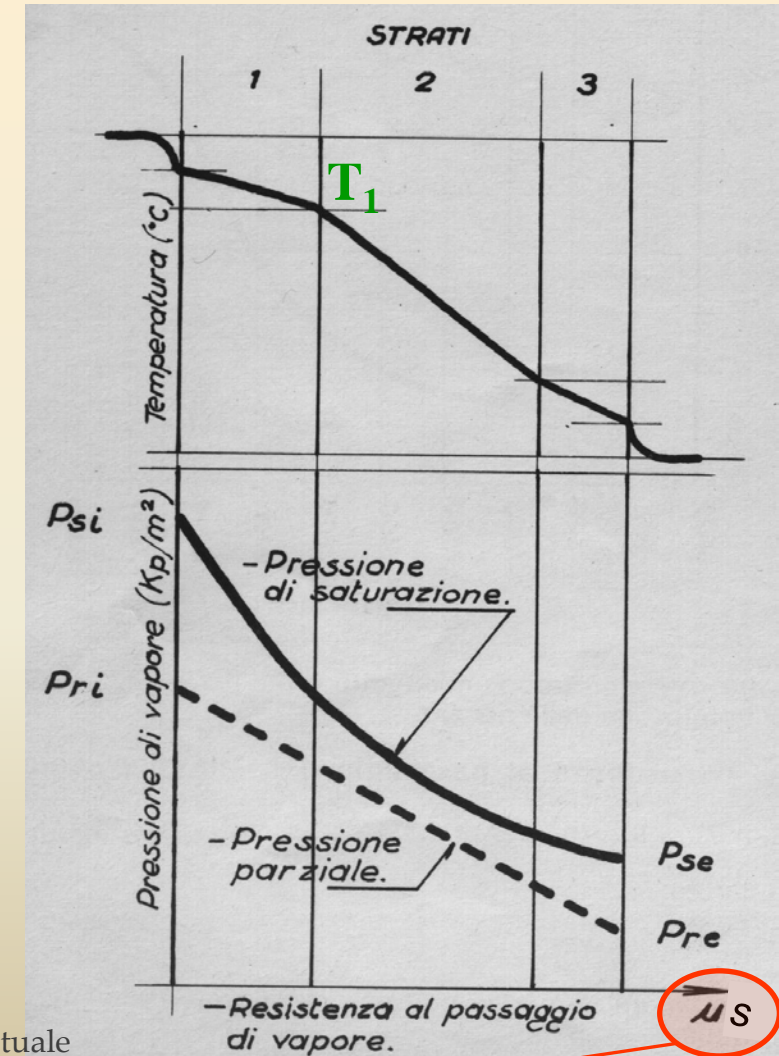
Temperatura di Rugiada

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
30	433	435	438	440	443	445	448	450	453	456
29	408	411	413	416	418	420	423	425	428	430
28	385	388	390	392	395	397	399	402	404	406
27	364	366	368	370	372	374	377	379	381	383
26	343	345	347	349	351	353	355	357	359	361
25	323	325	327	329	331	333	335	337	339	341
24	304	306	308	310	312	314	316	317	319	321
23	286	288	290	292	294	295	297	299	301	302
22	270	271	273	275	276	278	280	281	283	285
21	254	255	257	258	260	262	263	265	266	268
20	238	240	242	243	244	246	248	249	250	252
19	224	226	227	228	230	231	233	234	236	237
18	210	212	213	215	216	217	219	220	221	223
17	198	199	200	201	203	204	205	207	208	209
16	185	186	187	189	190	191	193	194	195	196
15	174	175	176	177	178	180	181	182	183	184
14	163	164	165	166	167	168	170	171	172	173
13	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162
12	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
11	134	135	136	137	138	138	139	140	141	142
10	125	126	127	128	129	130	130	131	132	133
9	117	118	119	119	120	121	122	123	123	124
8	109	110	111	112	112	113	114	115	116	116
7	102	103	104	104	105	106	106	107	108	109
6	95	96	97	97	98	99	99	100	101	101
5	89	90	90	91	91	92	92	93	94	94
4	83	84	84	85	85	86	86	87	88	88
3	77	78	78	79	80	80	81	81	82	82
2	72	72	73	74	74	75	75	76	76	77
1	67	68	68	68	69	70	70	70	71	71
+ 0	62	63	63	64	64	65	65	66	66	67
°C	- 0,0	- 0,1	- 0,2	- 0,3	- 0,4	- 0,5	- 0,6	- 0,7	- 0,8	- 0,9
- 0	62	62	61	61	60	60	59	59	58	58
- 1	57	57	56	56	55	55	54	54	54	53
- 2	53	52	52	52	51	51	50	50	49	49
- 3	48	48	48	47	47	46	46	46	45	45
- 4	44	44	44	43	43	43	42	42	42	41
- 5	41	41	40	40	40	39	39	39	38	38
- 6	38	37	37	37	36	36	36	35	35	35
- 7	34	34	34	34	33	33	33	32	32	32
- 8	32	31	31	31	30	30	30	30	29	29
- 9	29	29	28	28	28	28	27	27	27	27
- 10	26									

Pressione di saturazione del vapor d'acqua (in Kp/mq) in funzione della temperatura

17,2 °C  
15,2 °C

- 3,3 °C  
- 4,1 °C



Costruzione grafica del diagramma di Glaser,

Ascisse =  $\mu s$  = spessore virtuale

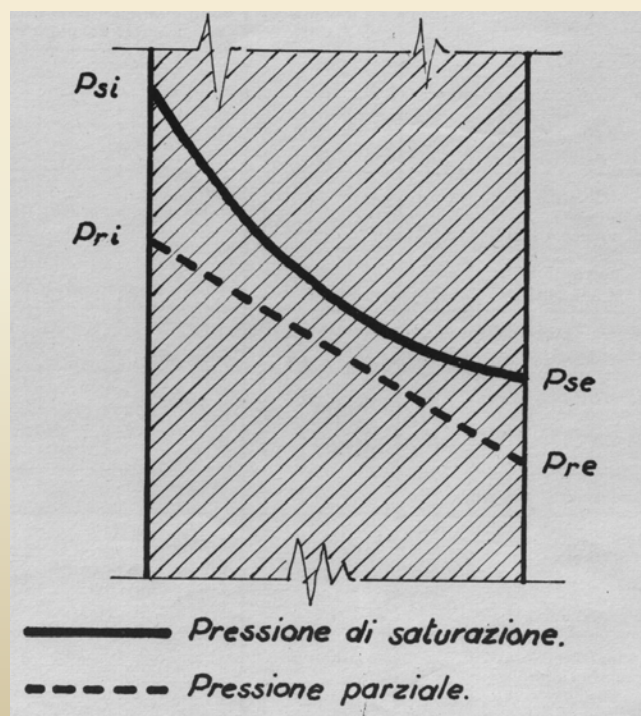


# Flusso di vapore nella parete: quattro situazioni

Dati di progetto: Pressione relativa interna:  $P_{ri} \cong 50\%$  e Pressione relativa esterna:  $P_{re} \cong 80\%$

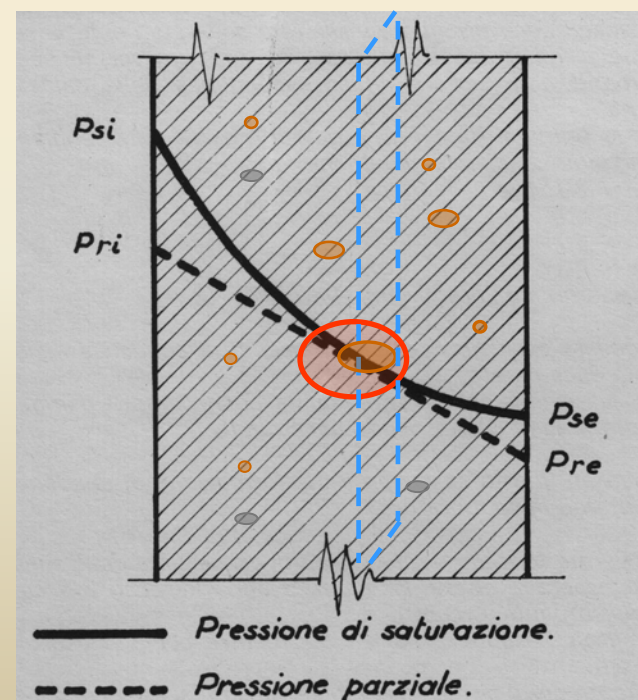
1<sup>^</sup> - **nessuna** condensa

Materiale omogeneo e traspirante



2<sup>^</sup> - **un punto** di condensa

Materiale disomogeneo e traspirante che ha ponti termici solo su *specifici punti* della superficie



Specifici punti come ciottoli di ghiaia più grandi, barre ad aderenza migliorata e resina epossidica per rinforzi, ..

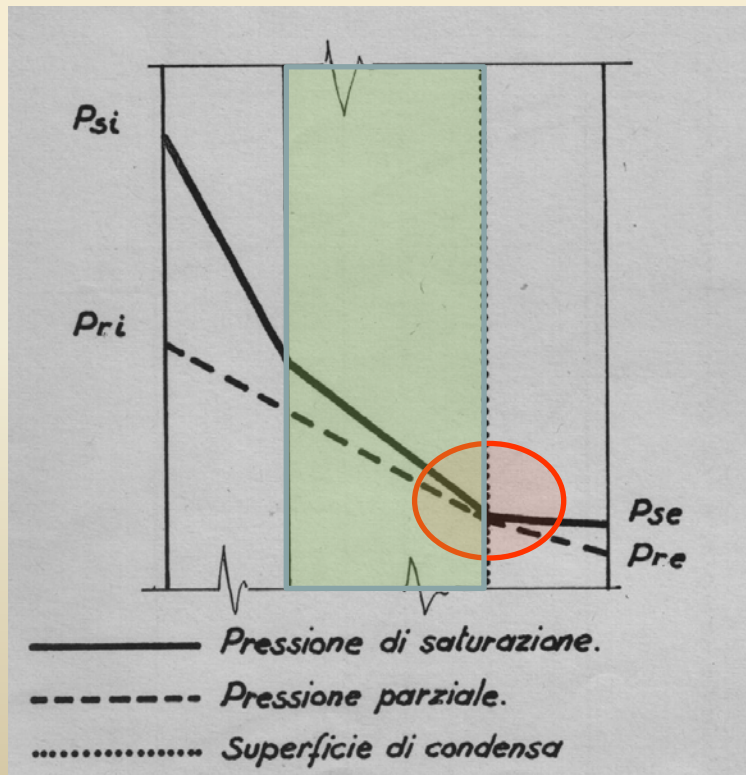


# Flusso di vapore nella parete: quattro situazioni

Stessi dati di progetto:  $P_{ri} \cong 50\%$  e  $P_{re} \cong 80\%$

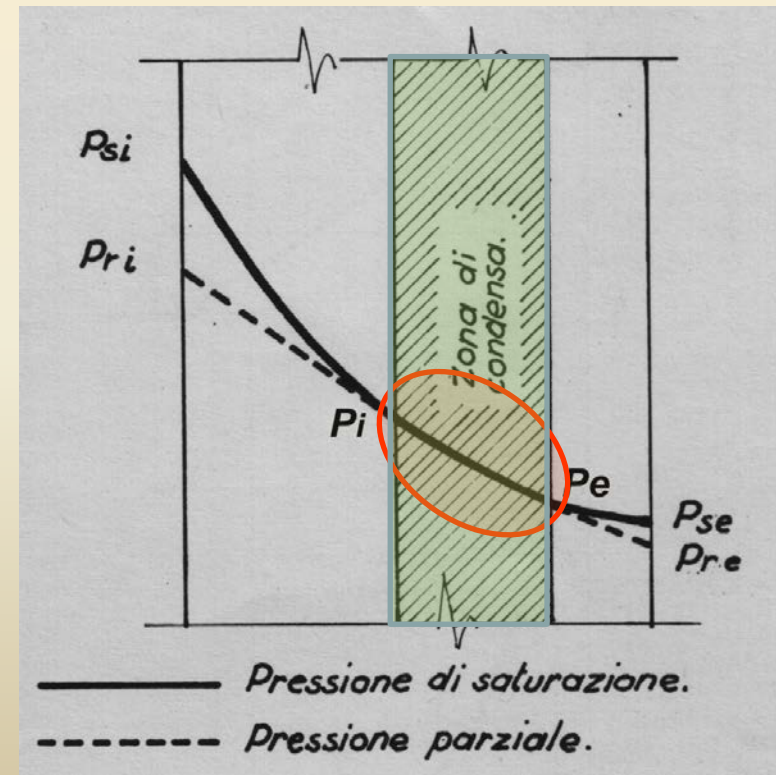
3^ - una **superficie** di condensa

Materiali omogenei e traspiranti con quello isolante che ha tutta la sua superficie di interfaccia con un altro materiale soggetta a condensa



4^ - un **volume** di condensa

Materiali omogenei e traspiranti con quello molto isolante in cui su entrambe le superfici di interfaccia si forma condensa



## Esempio 1: muro in laterizio intonacato – Flusso di calore U e Potenza dispersa W

- $\lambda$  intonaco = 0,70;  $\lambda$  laterizi forati = 0,56
- s intonaco = 0,01 m; s laterizi forati = 0,25 m
- r resistività =  $1/\lambda$
- adduttanza unitaria:  $\alpha_{\text{int}} = 8.1 \text{ W/Mq } ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{\text{est}} = 23.3$
- resistenza termica:  $1/\alpha_{\text{int}} = 0.12$ ;  $1/\alpha_{\text{est}} = 0.043$
- U = Trasmittanza o Coeff. globale di trasmissione =  $1/R$

$$R = 1/\alpha_{\text{int}} + \sum_j s_j / \lambda_j + 1/\alpha_{\text{est}} = 0,12 + 0,01/0,7 + 0,25/0,56 + 0,01/0,7 + 0,043 = 0,638 \text{ [1/W m}^2\text{ }^\circ\text{C]}$$

$$U = 1/R = 1/0,638 = 1,567 \text{ [Wm}^2\text{ }^\circ\text{C]}$$

Flusso termico disperso (per m<sup>2</sup> di superficie di questa parete per 1° di temperatura)

$$Q/t = W = 1,567 \text{ S } \Delta T$$

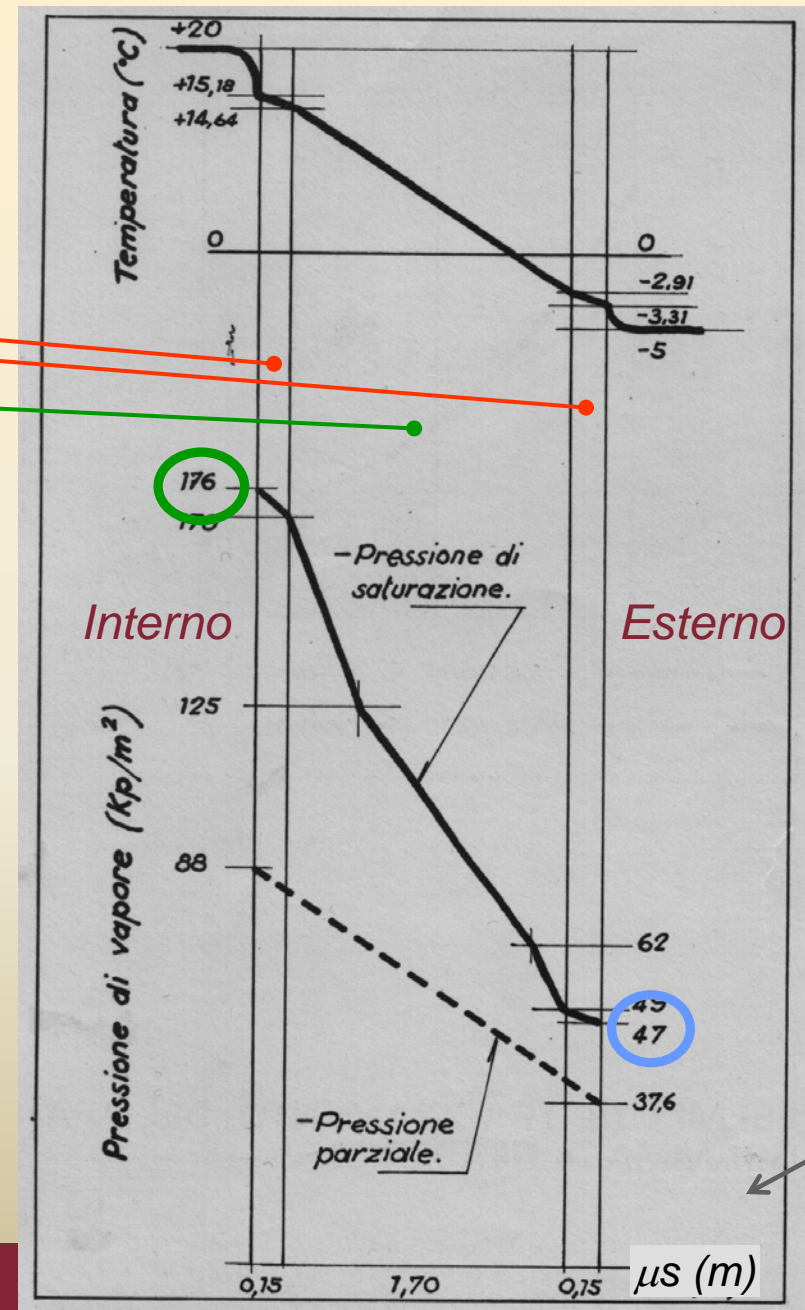
Potenza termica dispersa (per gli S m<sup>2</sup> della parete per una differenza  $\Delta$  di temperatura tra l'interno e l'esterno)

# Esempio 1: muro in laterizio intonacato

## – Diagramma di Glaser

- s intonaco = 0,01 m  
s laterizi forati = 0,25 m
- $\mu$  intonaco = 15,0;  
 $\mu$  laterizi forati = 6,8
- $\mu$  s intonaco = 0,15 m  
 $\mu$  s laterizio = 1,70 m
- $T_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_e = -5,0\text{ }^\circ\text{C}$
- $UR_i = 50\%$  ;  $UR_e = 80\%$

$$\sum_i \mu_i s_i = 2,0\text{ m}$$



Scala delle ascisse degli spessori virtuali in metri

## Esempio 2: muro in pannelli prefabbricati pesanti - Flusso di calore U e Potenza dispersa W

- $\lambda_1$  ca = 1,51;  $\lambda_2$  polistirolo = 0,035
- $s_1$  ca = 0,17 m;  $s_2$  polistirolo = 0,037;  $s_3$  ca = 0,05 m
- r resistività =  $1/\lambda$
- adduttanza unitaria:  $\alpha_{\text{int}}$  8.1 W/Mq °C;  $\alpha_{\text{est}} = 23.3$
- resistenza termica esterna:  $1/\alpha_{\text{int}} = 0.12$ ;  $1/\alpha_{\text{est}} = 0.043$
- K Trasmittanza o Coeff. globale di trasmissione =  $1/R$

$$R = 1/\alpha_{\text{int}} + \sum_i s_i / \lambda_i + 1/\alpha_{\text{est}} = 0,12 + 0,17/1,51 + 0,035/0,037 + 0,05/1,51 + 0,043 \\ = 1,255$$

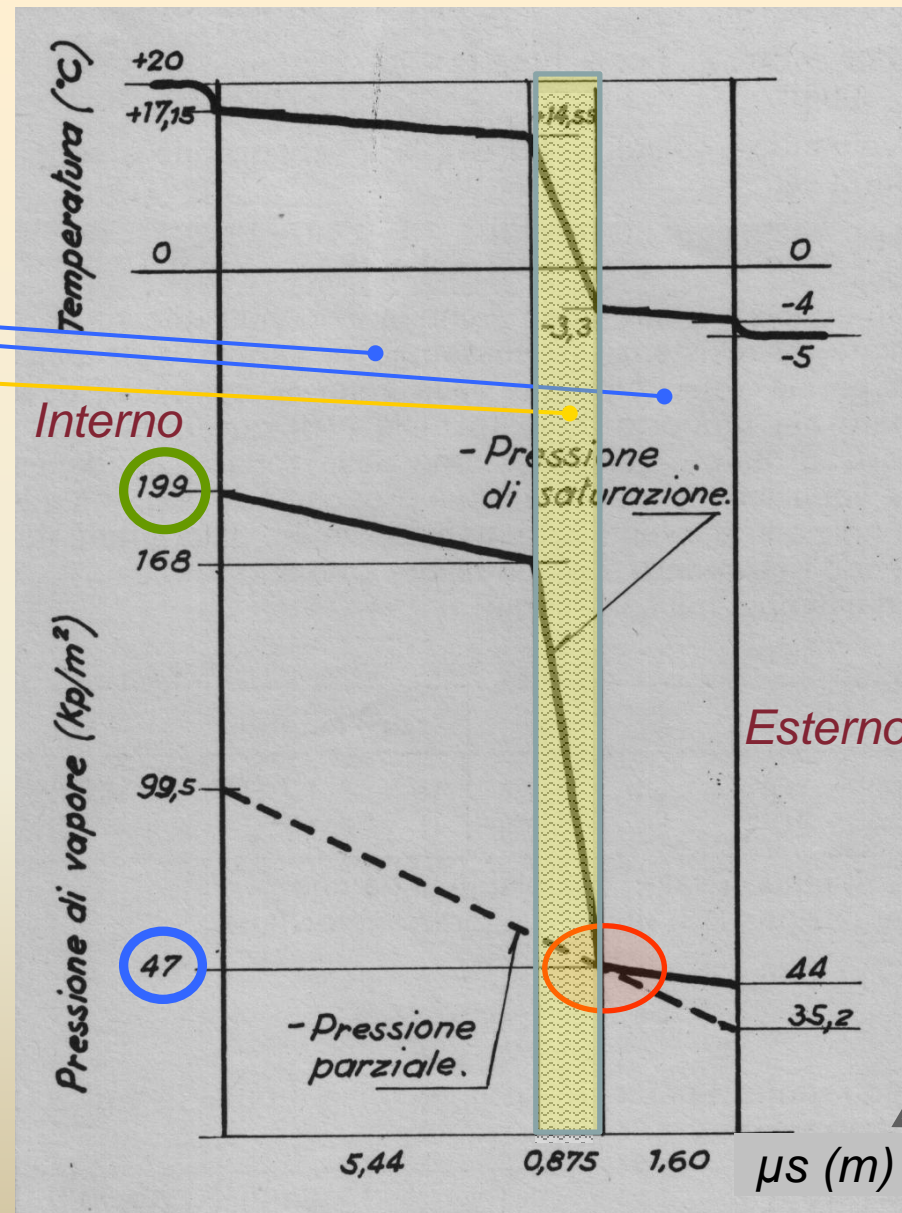
$$Q/t = W = 0,797 S \Delta T$$



## Esempio 2: muro in pannelli prefabbricati pesanti – Diagramma di Glaser

- $s_1$  calc. arm. = 0,17 m  
 $s_2$  polistirolo = 0,035 m  
 $s_3$  calc. arm. = 0,05 m
- $\mu_1$  calc. arm. = 32,0  
 $\mu_2$  polistirolo = 25,0
- $\mu_1 s_1$  calc. arm. = 5,44 m  
 $\mu_2 s_2$  polistirolo 0,875 m  
 $\mu_1 s_3$  calc. arm. = 1,60 m
- $T_{int} = 20\text{ °C}$  ;  $T_{est} = -5,0\text{ °C}$
- $UR_i = 50\%$  ;  $UR_e = 80\%$

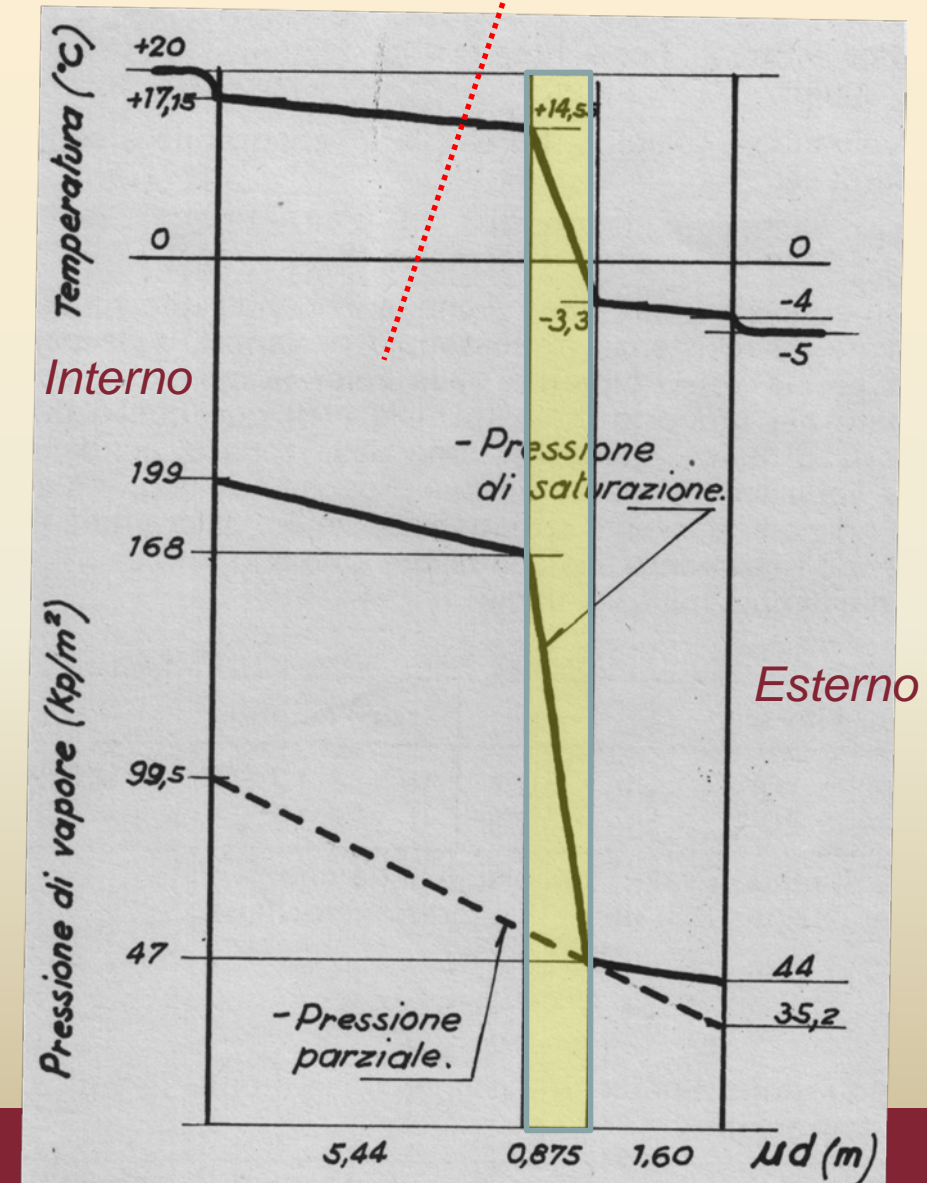
$$\sum_i \mu_i s_i = 7,9\text{ m}$$



Scala delle ascisse degli spessori virtuali in metri

Perché nella prefabbricazione a Ciclo chiuso “pesante” lo strato in c.a. interno è più spesso?

- La massa – che è più vicina alla temperatura interna – è maggiore → ridotte oscillazioni termiche
- È un antesignano dello *isolamento a cappotto*, evita quasi del tutto i ponti termici
- La parte più pesante della parete è più vicina alla struttura portante → più sicurezza e dispositivo di giunto più piccolo
- Se si formasse condensa, questa è più verso l'esterno, si smaltisce più facilmente
- Se di formasse condensa e degradasse il c.a. sarebbe quello esterno non-portante



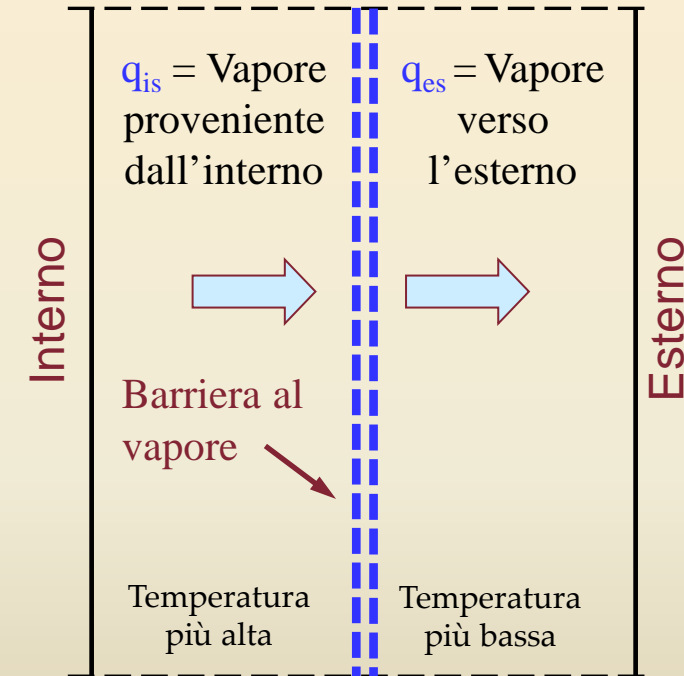
# Strategie di gestione del problema dell'acqua di condensa in una parete

A breve termine = regime quasi stazionario – orario

- Non bisogna *necessariamente* eliminare il vapor d'acqua
- Smaltire il vapor d'acqua verso l'esterno in inverno
- Flusso di vapore che attraversa i vari strati deve essere costante, ciò presuppone resistenze al passaggio del vapore costanti
- Importante che rimanga allo stato di vapore – **Barriera al vapore**
- Se si formasse acqua di condensa, va smaltita portandola all'esterno, es. fori drenanti o facciate ventilate

A lungo termine = regime variabile stagionale – mensile

- L'acqua di condensa accumulata va smaltita nel periodo più secco



# Tabella per evitare la Condensa con minima barriera al vapore

$q_{is}$  = quantità di vapore che attraversa la faccia verso l'interno dello strato ove il vapore condensa

$q_{es}$  = quantità di vapore che attraversa la faccia verso l'esterno dello strato ove il vapore condensa

Occorre che  $q_{is} = q_{es}$

$$(P_{ri} - P_{ris}) / \sum \mu_i s_i = (P_{res} - P_{re}) / \sum \mu_e s_e$$

$$(P_{ri} - P_{ris}) / (P_{res} - P_{re}) = \sum \mu_i s_i / \sum \mu_e s_e$$

Spessori virtuali

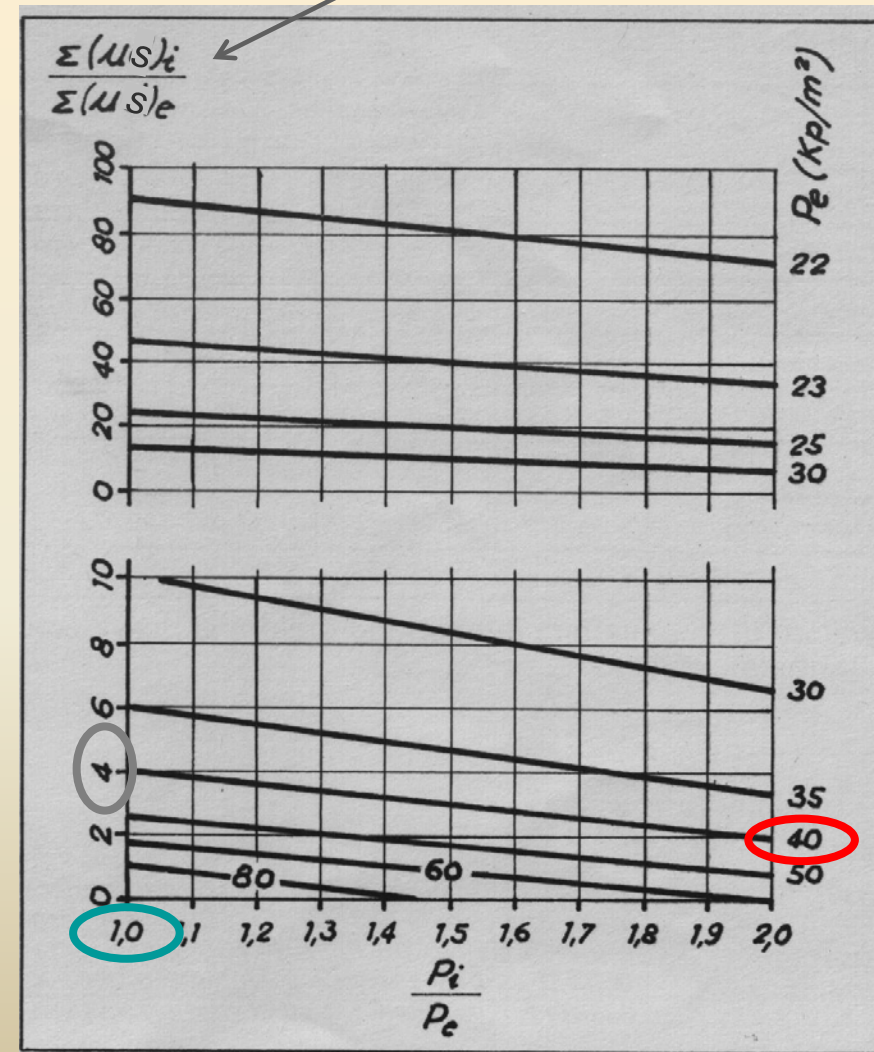
Condizioni di progetto

$$T_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}; T_{est} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$UR_{int} = 50\% ; UR_{est} = 80\%$$

$P_i = P_e$  non c'è sovrappressione né depressione tra l'interno e l'esterno, per entrambe è 1 Atmosfera

Spessori convenzionali





# Esempio 3: muro a cassetta più l'isolante - verifica della condensa

- $s_1$  intonaco 0,01 m
- $s_2$  laterizio 0,08 m
- $s_3$  isolante 0,05 m
- $s_4$  laterizio 0,12 m
- $s_5$  intonaco 0,01 m
- $\mu_1$  intonaco 15,0
- $\mu_2$  laterizio 6,0
- $\mu_3$  isolante 1,0
- $\mu_4$  laterizio 6,0
- $\mu_5 = \mu_1$  intonaco 15,0
- $\mu_1 s_1$  intonaco = 0,15
- $\mu_2 s_2$  laterizio = 0,48
- $\mu_3 s_3$  isolante = 0,05
- $\mu_4 s_4$  laterizio = 0,72
- $\mu_1 s_5$  intonaco = 0,15

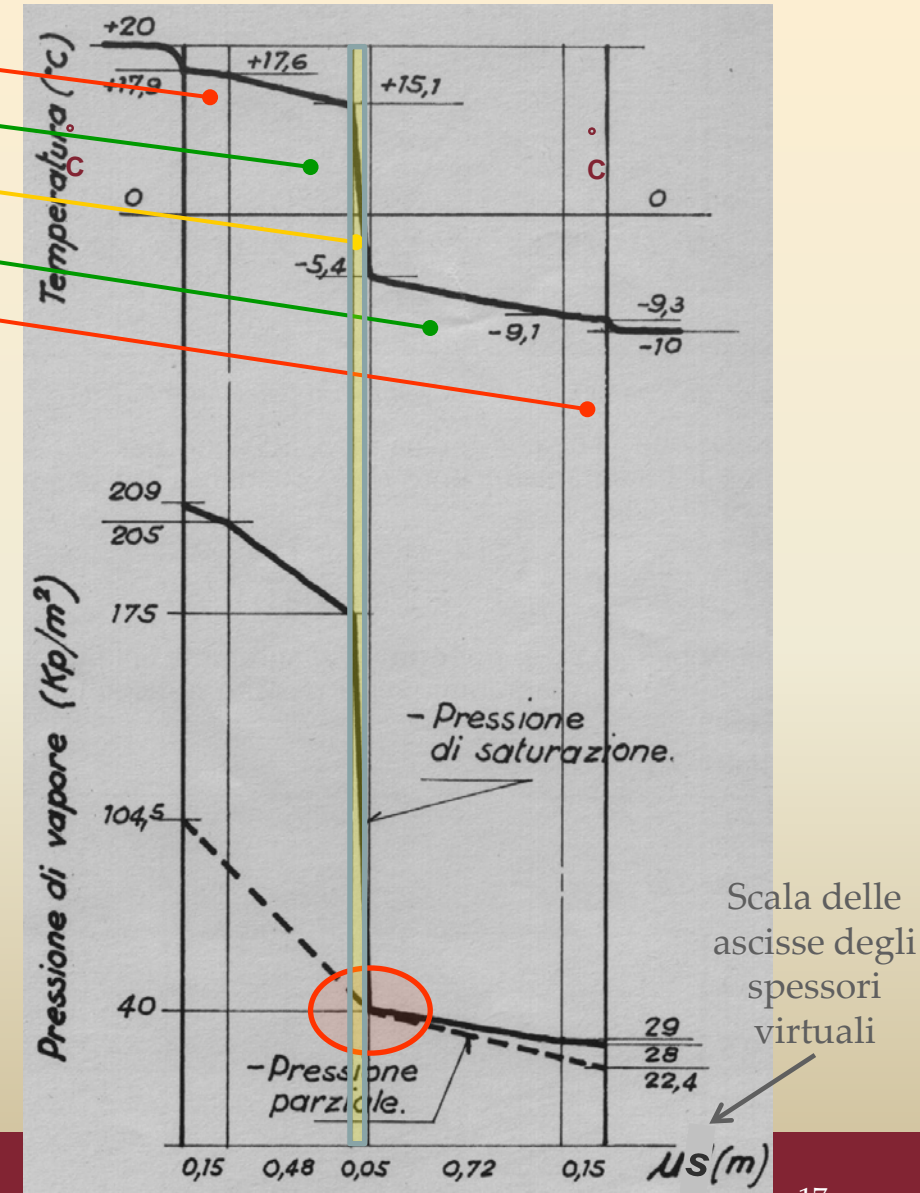
Condizioni di progetto

$T_i = 20 \text{ °C}$  ;  $T_e = - 10.0 \text{ °C}$

$UR_i$  50% ;  $UR_e = 80\%$

$P_i = P_e$  non c'è sovrappressione né depressione tra l'interno e l'esterno, per entrambe è 1 Atmosfera

$$\sum_i \mu_i s_i = 1,55 \text{ m}$$



## Esempio 3 muro a cassetta più l'isolante – eliminare la condensa

Calcolo della *Barriera al vapore* posta sul lato caldo dell'isolante – da tabella nella slide 16

$$Pe = 40 ; \underline{Pi/Pe = 1}$$

$$\sum \mu_i s_i / \sum \mu_e s_e = 4 \Rightarrow \sum \mu_i s_i = 4 \sum \mu_e s_e$$

$$\sum \mu_e s_e = 0,87 \text{ m}$$

$$\sum \mu_i s_i = 0,68 \text{ m}$$

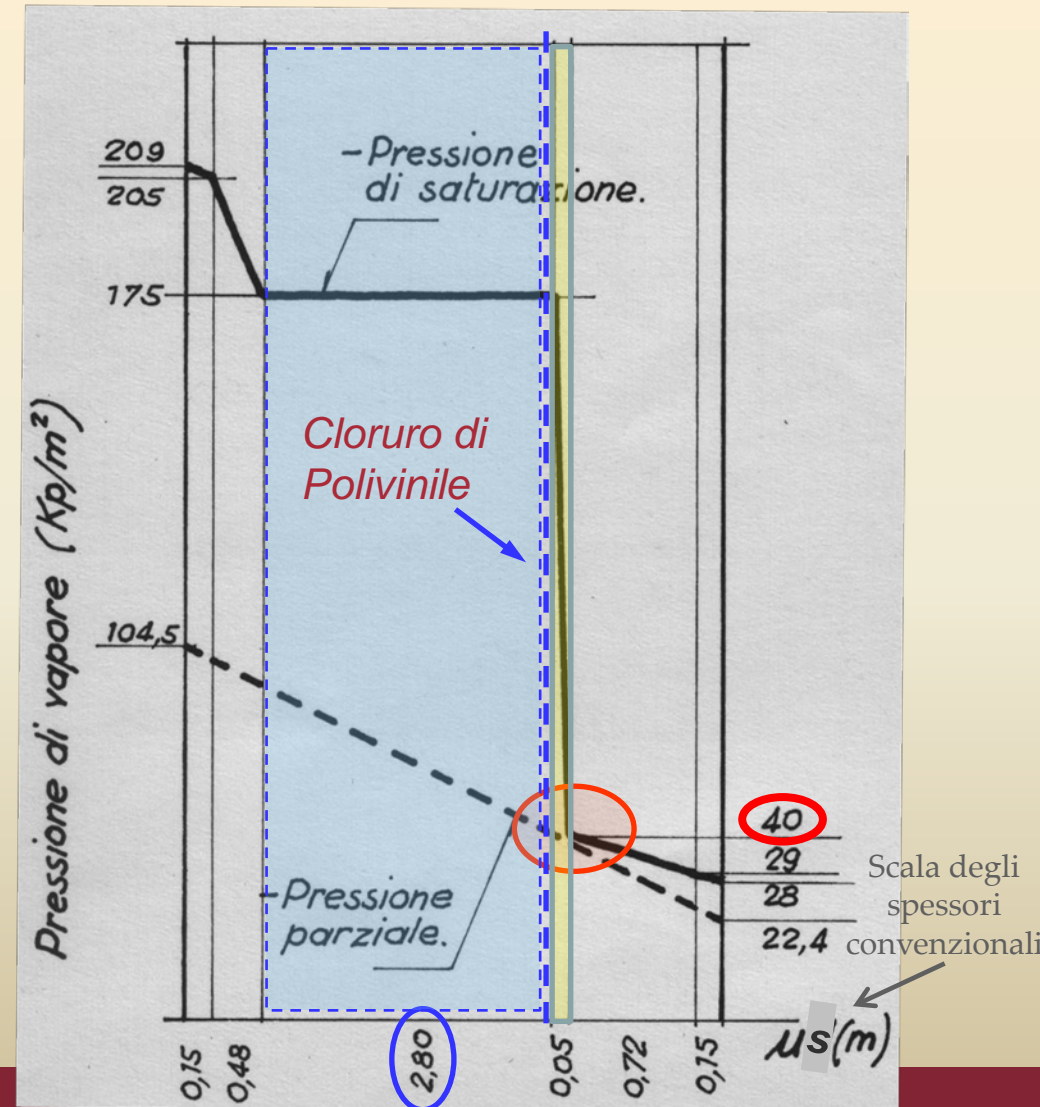
$\mu_x s_x$  = spessore convenzionale da aggiungere

$$\sum \mu_i s_i + \mu_x s_x = 4 \times 0,87 = 3,48 \text{ m}$$

$$\mu_x s_x = 3,48 - 0,68 = 2,8 \text{ m}$$

$$x = \text{Cloruro di polivinile}; \mu_x = 50.000$$

$$s_x = 2,8 / 50.000 = 0,000056 \text{ m} = 0,056 \text{ mm}$$



## Sicurezza alla Condensa stagionale

- nel **periodo umido** (60 gg = 1440 h) la condensa  $\leq 0,5 \text{ Kg/m}^2$  di acqua
- nel **periodo secco** (90 gg = 2160 h) la condensa si deve asciugare
- alla fine del periodo umido deve essere assicurata **U di norma**
- eventuali **ferri di armatura** devono essere **protetti**

$$q = \Delta P S / Rv \quad (\text{Kg/m}^2 \text{ h}) \quad \text{Kg di acqua per m}^2 \text{ di superficie per ora}$$

$$q_{is} = P_{ri} - P_{ris} / 160000 \sum \mu_i s_i \quad ; \quad q_{es} = P_{res} - P_{re} / 160000 \sum \mu_e s_e$$

$$\Delta q = q_{is} - q_{es} = [(P_{ri} - P_{ris}) / \sum \mu_i s_i - (P_{res} - P_{re}) / \sum \mu_e s_e] / 160000$$

$$\Delta q_{\text{Max}} = 1440 \Delta q \leq 0,5 \text{ Kg/mq}$$