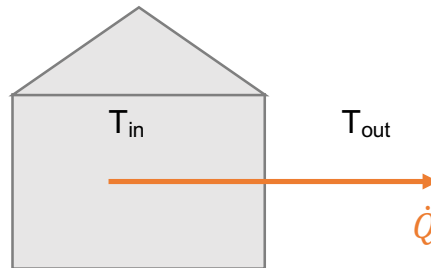


PASSAGGIO DEL CALORE E DIFFUSIONE DEL VAPORE

1. CALCOLO DELLA POTENZA TERMICA



Il calcolo della potenza termica in regime stazionario si effettua attraverso la formula:

$$\dot{Q} = \sum (K_i \cdot S_i) \cdot (T_{in} - T_{out})$$

Dove:

- Q : potenza termica [W]
- K : coefficiente globale di scambio termico [W/m^2K]
- S : superficie disperdente di confine verso l'esterno [m^2]
- T_{in} : temperatura interna [$^{\circ}C$ o K]
- T_{out} : temperatura esterna [$^{\circ}C$ o K]

Attenzione: le temperature nel calcolo della potenza termica possono essere calcolate sia in gradi Celsius che in Kelvin perché viene calcolato il ΔT , il cui valore rimane invariato scegliendo una delle due unità di misura, ma non si deve poi commettere l'errore di convertire il ΔT .

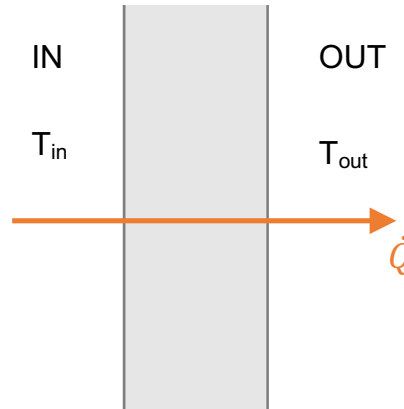
Esempio:

- $T_{in} = 20 \text{ }^{\circ}C = 293 \text{ K}$
- $T_{out} = 0 \text{ }^{\circ}C = 273 \text{ K}$
- $\Delta T = T_{in} - T_{out} = 20 - 0 = 293 - 273 = 20$

Per il calcolo della potenza termica abbiamo le grandezze rilevanti della parete:

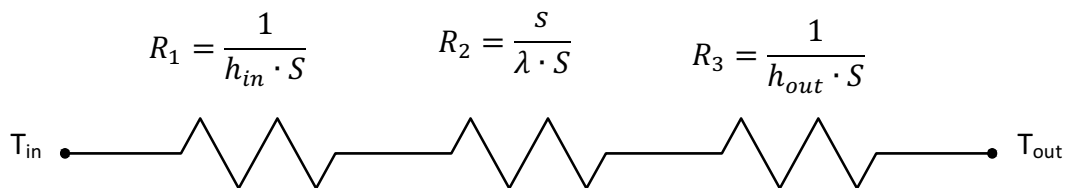
- Spessore muro: s [m] → direttamente proporzionale alla capacità isolante termica
- Conducibilità termica del materiale: λ [W/mK] → coefficiente che dipende dal materiale
- Coefficiente di convezione: h [W/m^2K] → interna (in) ed esterna (out). Quella interna è di solito di convezione naturale e minore a quella esterna (nell'ordine della metà). Esterna di solito è di convezione forzata.

2. CALCOLO DELLA POTENZA TERMICA PER PARETI MONOSTRATO



Per il calcolo della potenza termica posso creare un circuito elettrico equivalente in cui avremo le resistenze dei diversi materiali:

- Resistenze convettive (aria in e aria out): $R = \frac{1}{h_{in} \cdot S}$
- Resistenze conduzione (parete): $R = \frac{s}{\lambda \cdot S}$



Nel caso di una parete monostrato avremo 3 resistenze:

- $R_1 = \frac{1}{h_{in} \cdot S} \rightarrow$ resistenza convettiva dell'aria interna
- $R_2 = \frac{s}{\lambda \cdot S} \rightarrow$ resistenza conduttiva della parete
- $R_3 = \frac{1}{h_{out} \cdot S} \rightarrow$ resistenza convettiva dell'aria esterna

Attenzione: per diminuire le dispersioni occorre innanzi tutto pensare alla forma dell'edificio. La superficie disperdente è inversamente proporzionale alla resistenza termica sia convettiva che di conduzione. Quindi un primo metodo per migliorare le condizioni di isolamento termico di un edificio è quello di diminuire le superfici disperdenti.

Definiamo poi la LEGGE DI OHM TERMICA:

$$\dot{Q} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{tot}}$$

Dove:

R_{tot} : somma delle resistenze parziali $\rightarrow R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 \rightarrow$

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{h_{in} \cdot S} + \frac{s}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_{out} \cdot S}}$$

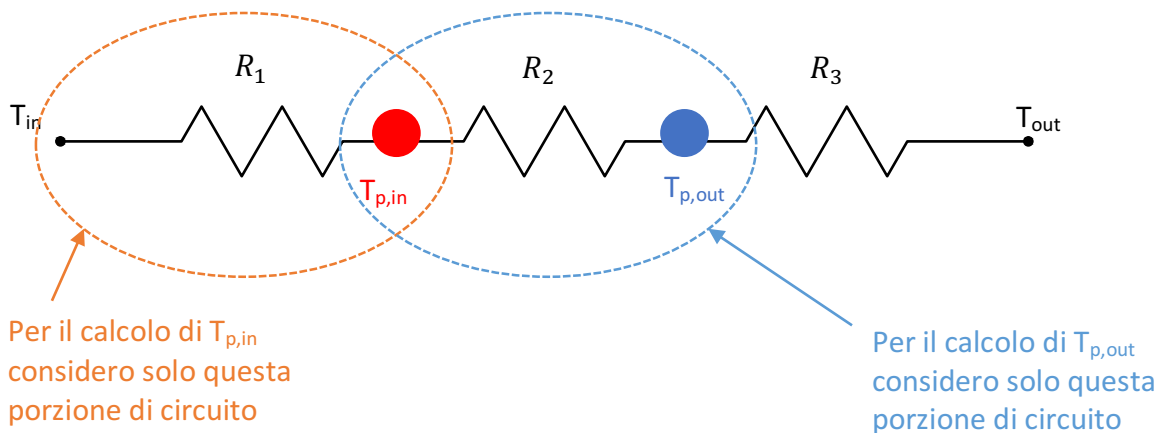
Svolgendo i calcoli avremo che:

$$\dot{Q} = \frac{S \cdot (T_{in} - T_{out})}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_{out}}}$$

Per cui:

$$K = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_{out}}}$$

Nel caso di una parete monostrato posso poi andare a calcolare le temperature di parete interna ($T_{p,in}$) ed esterna ($T_{p,out}$).



1. Calcolo della temperatura di parete interna:

$$\dot{Q} = \frac{T_{in} - T_{p,in}}{R_1}$$

Dove l'unica incognita è $T_{p,in}$, che posso calcolare come:

$$T_{p,in} = T_{in} - \dot{Q} \cdot R_1$$

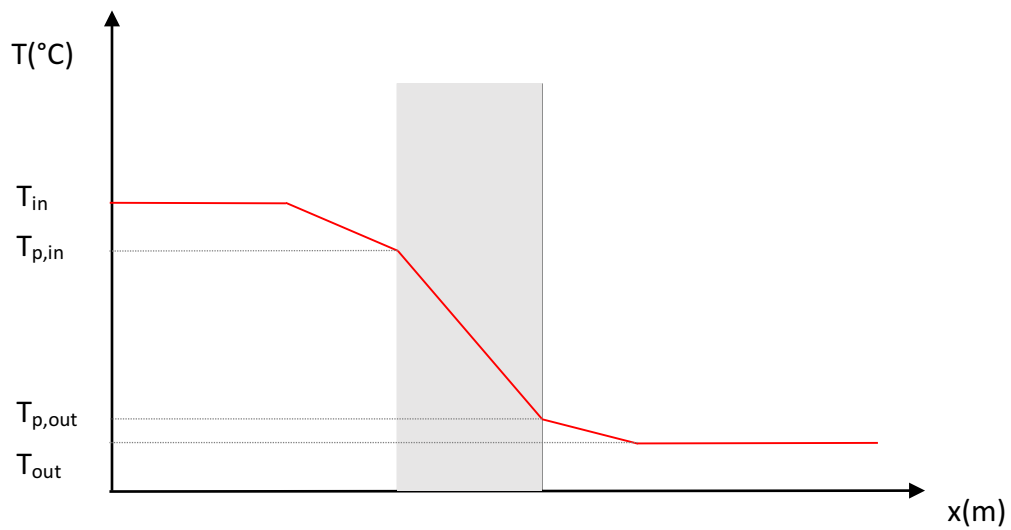
2. Calcolo della temperatura di parete esterna:

$$\dot{Q} = \frac{T_{p,in} - T_{p,out}}{R_2}$$

Dove l'unica incognita è $T_{p,out}$, che posso calcolare come:

$$T_{p,out} = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot R_2$$

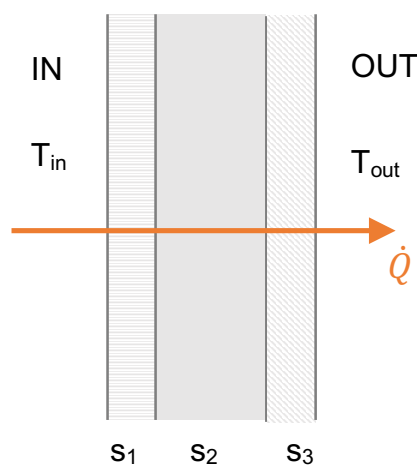
Per finire posso inserire in un grafico cartesiano i dati che ho individuato. Il grafico avrà in ordinata la temperatura (in °C o K) e in ascissa la distanza (m).



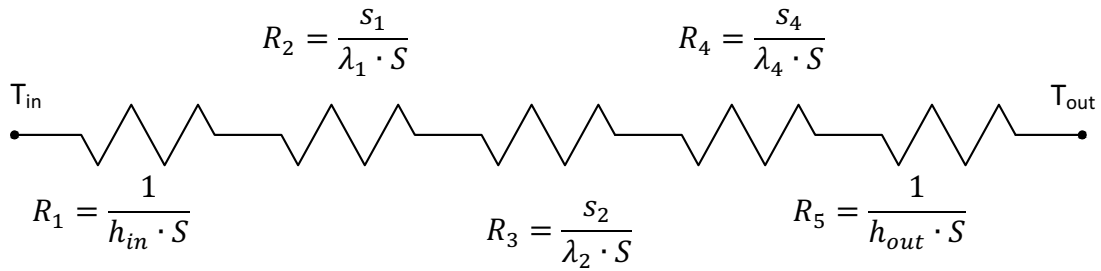
3. CALCOLO DELLA POTENZA TERMICA PER PARETI MULTISTRATO

Per il calcolo della potenza termica nel caso di una parete multistrato, valgono le stesse valutazioni viste per la parete monostrato, avrò però un maggior numero di resistenze. A seconda del numero di strati avrò:

- 2 resistenze convettive (aria in e aria out)
- 1 resistenza conduttiva per ogni strato della parete



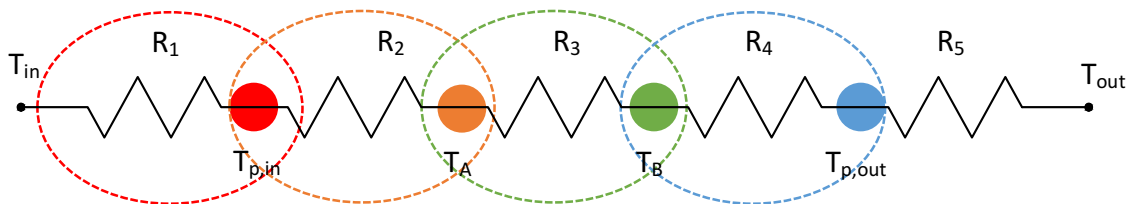
Considerando ad esempio una parete a 3 strati, con spessori pari a s_1 , s_2 , s_3 , avremo:



$$K = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{out}}}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{tot}} = \frac{S \cdot (T_{in} - T_{out})}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{out}}}$$

Nel caso della parete multistrato dovrò calcolare le temperature di parete interna ed esterna ($T_{p,in}$ e $T_{p,out}$) e le temperature che mi si creano tra i diversi strati, che chiameremo T_A e T_B , avremo quindi:



Il procedimento è lo stesso della parete monostrato, ripetuto per più porzioni del circuito. Avremo:

$$\text{i. } T_{p,in} = T_{in} - \dot{Q} \cdot R_1 = T_{in} - \dot{Q} \cdot \frac{1}{h_{in} \cdot S}$$

$$\text{ii. } T_A = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot R_2 = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot \frac{s_1}{\lambda_1 \cdot S}$$

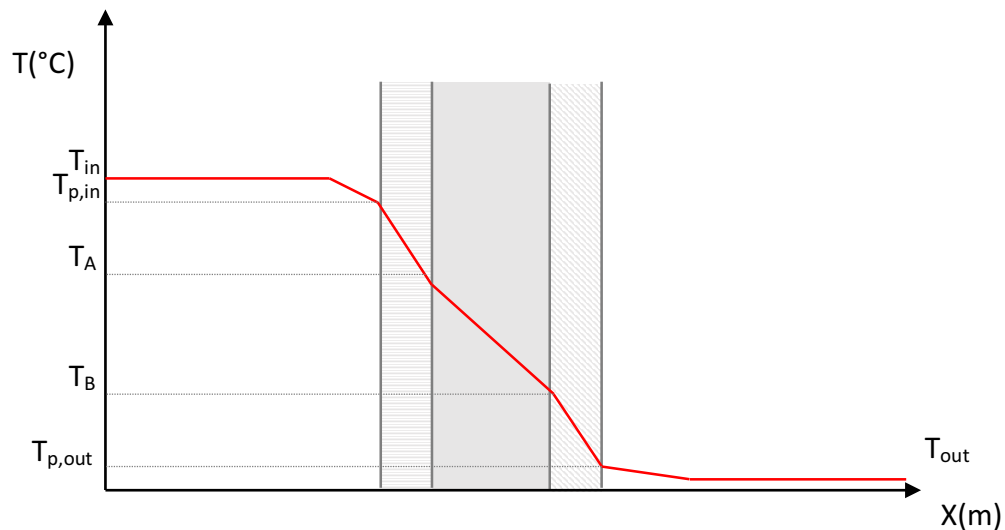
$$\text{iii. } T_B = T_A - \dot{Q} \cdot R_3 = T_A - \dot{Q} \cdot \frac{s_2}{\lambda_2 \cdot S}$$

$$\text{iv. } T_{p,out} = T_B - \dot{Q} \cdot R_4 = T_{p,out} - \dot{Q} \cdot \frac{s_3}{\lambda_3 \cdot S}$$

Se volessimo poi effettuare una verifica dei calcoli, è possibile calcolare con questo metodo anche T_{out} ed il risultato dovrà coincidere con la temperatura esterna che ho nel mio caso:

$$T_{out} = T_{p,out} - \dot{Q} \cdot R_5 = T_{p,out} - \dot{Q} \cdot \frac{1}{h_{out} \cdot S}$$

Andrò a questo punto ad inserire i dati nel grafico cartesiano visto in precedenza e avremo:



Possiamo ora ricavare le pressioni di saturazione per le temperature che abbiamo individuato. Nella tabella (allegata alla fine della dispensa) al variare della temperatura dell'aria, trovo la massima pressione che può raggiungere il vapore d'acqua quando è in condizione di saturazione.

Se la pressione del vapore raggiunge valori superiori a quelli della pressione in saturazione, significa che c'è troppo vapore.

Il vapore in eccesso **condensa**, fenomeno che vogliamo evitare.

Devo quindi verificare che la pressione parziale del vapore non superi mai i valori della saturazione. Il valore da non superare è il cosiddetto valore limite che dipende solo dalla temperatura.

Operativamente:

- i. ricavo p_{sat} (pressione di saturazione in Pa) per ogni temperatura
- ii. calcolo la p_v (pressione parziale del vapore in Pa) moltiplicando il grado igrometrico (Φ) per la pressione di saturazione (p_{sat})

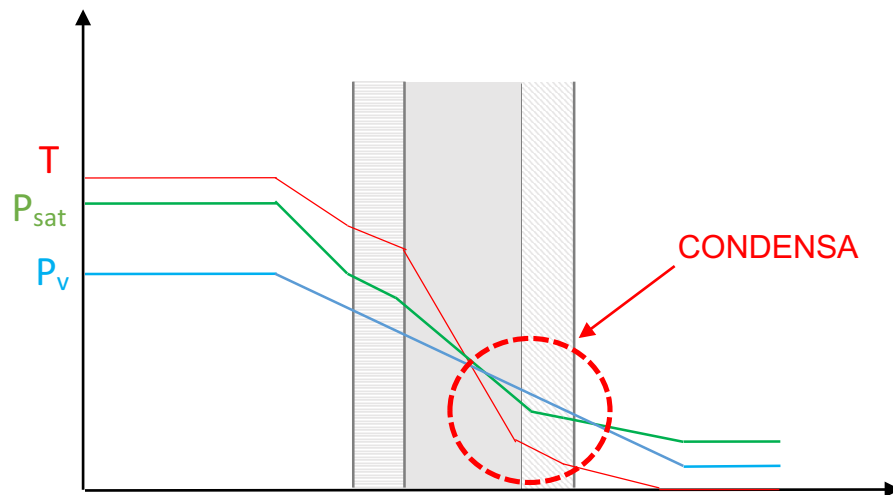
$$p_v = \Phi \cdot p_{sat}$$

- iii. Nei punti in cui $p_v > p_{sat}$ avrò condensa

Posso fare lo stesso tipo di valutazioni inserendo i dati in un diagramma cartesiano, detto **diagramma di Glaser**: andrò ad inserire nel diagramma le variazioni di pressione di saturazione e di pressione parziale del vapore e nei punti in cui la linea delle pressioni di saturazione è sotto quella della pressione del vapore avrò formazione di condensa.

A questo punto non siamo ancora in grado di calcolare le pressioni parziali del vapore interne alla parete, ma possiamo utilizzare un metodo grafico, congiungendo la pressione parziale del vapore interna a quella esterna con una retta.

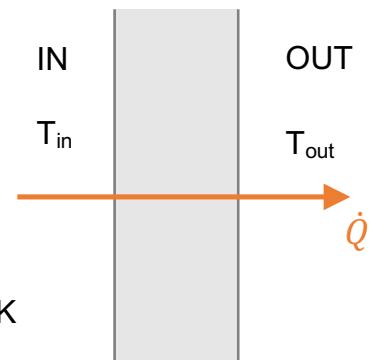
Si tratta di un metodo grafico veloce per capire se avviene il fenomeno della condensa interstiziale, molto dannoso per le costruzioni.



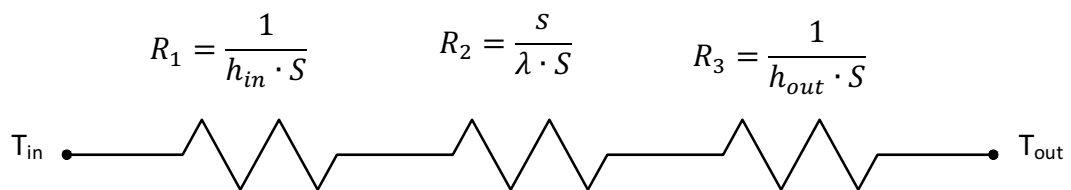
4. ESERCIZIO 1: PARETE MONOSTRATO

Dati:

- parete monostrato in CLS
- temperatura interna: $T_{in} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura esterna: $T_{out} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- spessore parete: $s = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$
- superficie disperdente: $S = 10 \text{ m}^2$
- coefficiente di convezione interna: $h_{in} = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- coefficiente di convezione esterna: $h_{out} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$
- coefficiente di conduzione parete: $\lambda = 2 \text{ W/mK}$



Per iniziare posso disegnare il mio circuito elettrico equivalente:



E andare a calcolare la potenza termica che lo attraversa, come:

$$\dot{Q} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{tot}} = \frac{S \cdot (T_{in} - T_{out})}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_{out}}} = \frac{10 \cdot (20 - 0)}{\frac{1}{8} + \frac{0,2}{2} + \frac{1}{20}} = 727,27 \text{ W}$$

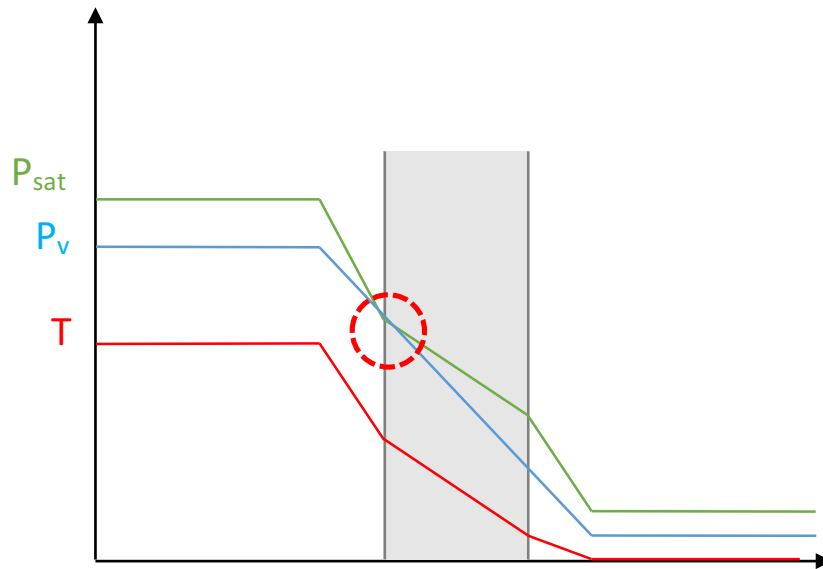
Da cui posso andare a ricavare le temperature di parete, interna ($t_{p,in}$) ed esterna ($t_{p,out}$), come:

- $T_{p,in} = T_{in} - \dot{Q} \cdot R_1 = T_{in} - \dot{Q} \cdot \frac{1}{h_{in} \cdot S} = 20 - 727,27 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10} = 10,9 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{p,out} = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot R_2 = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot \frac{s}{\lambda \cdot S} =$

$$= 10,9 - 727,27 \cdot \frac{0,2}{2 \cdot 10} = 3,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nel caso della parete monostrato la condensa potrebbe formarsi sulle pareti. Considerando un grado igrometrico interno $\Phi_{in} = 70\%$ ed uno esterno $\Phi_{out} = 90\%$, avremo:

1. $T_{in} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,in} = 2338,8 \text{ Pa}$	$p_{v,in} = 1637,16 \text{ Pa}$
2. $T_{p,in} = 10,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,p,in} = 1304,2 \text{ Pa}$	
3. $T_{p,out} = 3,64 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,p,out} = 791,3 \text{ Pa}$	
4. $T_{out} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,out} = 611,2 \text{ Pa}$	$p_{v,out} = 550,08 \text{ Pa}$

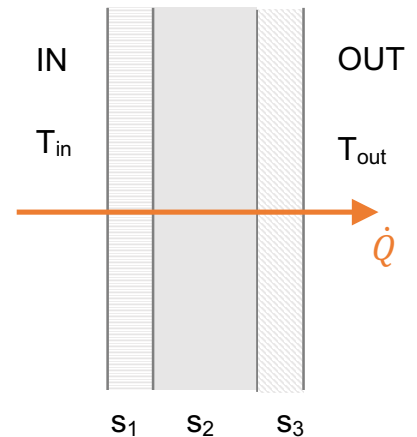


Dal grafico possiamo notare il rischio di formazione di condensa sulla parete esterna.

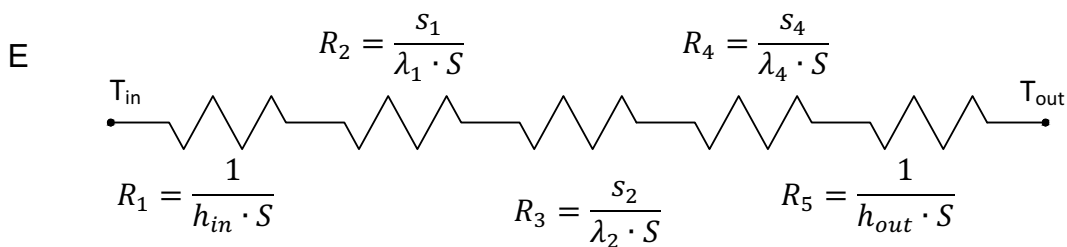
5. ESERCIZIO 2: PARETE MULTISTRATO

Dati:

- parete a 3 strati
 - strato 1: intonaco a gesso
spessore: $s_1 = 3 \text{ cm} = 0,03 \text{ m}$
coefficiente di conduzione: $\lambda_1 = 0,6 \text{ W/mK}$
 - strato 2: laterizio
spessore: $s_2 = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$
coefficiente di conduzione: $\lambda_2 = 0,4 \text{ W/mK}$
 - strato 3: malta cementizia
spessore: $s_3 = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$
coefficiente di conduzione: $\lambda_3 = 2 \text{ W/mK}$
- superficie disperdente: $S = 10 \text{ m}^2$
- temperatura interna: $T_{in} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura esterna: $T_{out} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- coefficiente di convezione interna: $h_{in} = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- coefficiente di convezione esterna: $h_{out} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$



Disegno il circuito elettrico equivalente:



Vado a calcolare la potenza termica che lo attraversa, come:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{tot}} = \frac{S \cdot (T_{in} - T_{out})}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{out}}} = \\ &= \frac{10 \cdot (20 - 0)}{\frac{1}{8} + \frac{0,03}{0,6} + \frac{0,25}{0,4} + \frac{0,02}{2} + \frac{1}{20}} = 232,56 \text{ W} \end{aligned}$$

Posso poi calcolare tutte le temperature interne alla parete:

$$\text{i. } T_{p,in} = T_{in} - \dot{Q} \cdot R_1 = T_{in} - \dot{Q} \cdot \frac{1}{h_{in} \cdot S} = 20 - 232,56 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10} = 17,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

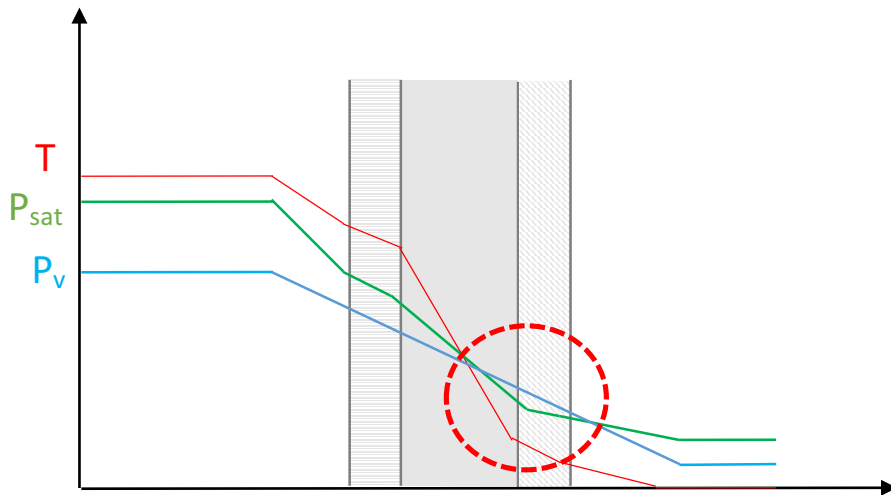
$$\text{ii. } T_A = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot R_2 = T_{p,in} - \dot{Q} \cdot \frac{s_1}{\lambda_1 \cdot S} = 17,1 - 232,56 \cdot \frac{0,03}{0,6 \cdot 10} = 15,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{iii. } T_B = T_A - \dot{Q} \cdot R_3 = T_A - \dot{Q} \cdot \frac{s_2}{\lambda_2 \cdot S} = 15,9 - 232,56 \cdot \frac{0,25}{0,4 \cdot 10} = 1,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{iv. } T_{p,out} = T_B - \dot{Q} \cdot R_4 = T_{p,out} - \dot{Q} \cdot \frac{s_3}{\lambda_3 \cdot S} = 1,4 - 232,56 \cdot \frac{0,02}{2 \cdot 10} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nel caso della parete multistrato la condensa potrebbe formarsi sulle pareti, ma anche tra i vari strati. Considerando un grado igrometrico interno $\Phi_{in} = 70\%$ ed uno esterno $\Phi_{out} = 90\%$, avremo:

1. $T_{in} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,in} = 2338,8 \text{ Pa}$	$p_{v,in} = 1637,16 \text{ Pa}$
2. $T_{p,in} = 17,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,p,in} = 1950,6 \text{ Pa}$	
3. $T_A = 15,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,A} = 1807,1 \text{ Pa}$	
4. $T_B = 1,4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,B} = 676,7 \text{ Pa}$	
5. $T_{p,out} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,p,out} = 666,9 \text{ Pa}$	
6. $T_{out} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_{sat,out} = 611,2 \text{ Pa}$	$p_{v,out} = 550,08 \text{ Pa}$



Dal grafico è possibile notare come ci sia il rischio di condensa tra il secondo ed il terzo strato.

Il legame che lega la temperatura alla pressione di saturazione non è lineare, ma è una curva.

Per ricavare i valori delle pressioni di saturazione si utilizza quindi la tabella:

Pressione di saturazione del vapore d'acqua in [Pa]

[°C]	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5	+0.6	+0.7	+0.8	+0.9	
0	611.2	615.8	620.4	625.0	629.6	634.2	638.7	643.3	647.9	652.5
1	657.1	662.0	666.9	671.8	676.7	681.6	686.4	691.3	696.2	701.1
2	706.0	711.2	716.4	721.6	726.8	732.0	737.2	742.4	747.6	752.8
3	758.0	763.6	769.1	774.7	780.2	785.8	791.3	796.9	802.4	808.0
4	813.5	819.4	825.3	831.2	837.1	843.0	848.9	854.8	860.7	866.6
5	872.5	878.8	885.1	891.3	897.6	903.9	910.2	916.5	922.7	929.0
6	935.3	942.0	948.6	955.3	962.0	968.7	975.3	982.0	988.7	995.3
7	1002.0	1009.1	1016.2	1023.2	1030.3	1037.4	1044.5	1051.6	1058.6	1065.7
8	1072.8	1080.3	1087.9	1095.4	1102.9	1110.5	1118.0	1125.5	1133.0	1140.6
9	1148.1	1156.1	1164.1	1172.1	1180.1	1188.1	1196.0	1204.0	1212.0	1220.0
10	1228.0	1236.5	1244.9	1253.4	1261.9	1270.4	1278.8	1287.3	1295.8	1304.2
11	1312.7	1321.7	1330.7	1339.7	1348.7	1357.7	1366.6	1375.6	1384.6	1393.6
12	1402.6	1412.1	1421.6	1431.2	1440.7	1450.2	1459.7	1469.2	1478.8	1488.3
13	1497.8	1507.9	1518.0	1528.1	1538.2	1548.3	1558.3	1568.4	1578.5	1588.6
14	1598.7	1609.4	1620.1	1630.7	1641.4	1652.1	1662.8	1673.5	1684.1	1694.8
15	1705.5	1716.8	1728.1	1739.4	1750.7	1762.0	1773.2	1784.5	1795.8	1807.1
16	1818.4	1830.4	1842.3	1854.3	1866.2	1878.2	1890.2	1902.1	1914.1	1926.0
17	1938.0	1950.6	1963.3	1975.9	1988.5	2001.2	2013.8	2026.4	2039.0	2051.7
18	2064.3	2077.7	2091.0	2104.4	2117.7	2131.1	2144.4	2157.8	2171.1	2184.5
19	2197.8	2211.9	2226.0	2240.1	2254.2	2268.3	2282.4	2296.5	2310.6	2324.7
20	2338.8	2353.7	2368.6	2383.5	2398.4	2413.3	2428.1	2443.0	2457.9	2472.8
21	2487.7	2503.4	2519.1	2534.8	2550.5	2566.3	2582.0	2597.7	2613.4	2629.1
22	2644.8	2661.4	2677.9	2694.5	2711.0	2727.6	2744.2	2760.7	2777.3	2793.8
23	2810.4	2827.9	2845.3	2862.8	2880.3	2897.8	2915.2	2932.7	2950.2	2967.6
24	2985.1	3003.5	3021.9	3040.3	3058.7	3077.2	3095.6	3114.0	3132.4	3150.8
25	3169.2	3188.6	3208.0	3227.4	3246.8	3266.2	3285.5	3304.9	3324.3	3343.7
26	3363.1	3383.5	3403.9	3424.4	3444.8	3465.2	3485.6	3506.0	3526.5	3546.9
27	3567.3	3588.8	3610.3	3631.8	3653.3	3674.8	3696.2	3717.7	3739.2	3760.7
28	3782.2	3804.8	3827.4	3850.0	3872.6	3895.3	3917.9	3940.5	3963.1	3985.7
29	4008.3	4032.1	4055.8	4079.6	4103.4	4127.2	4150.9	4174.7	4198.5	4222.2
30	4246.0	4271.0	4296.0	4321.0	4346.0	4371.0	4395.9	4420.9	4445.9	4470.9
31	4495.9	4522.2	4548.4	4574.7	4600.9	4627.2	4653.5	4679.7	4706.0	4732.2
32	4758.5	4786.1	4813.7	4841.2	4868.8	4896.4	4924.0	4951.6	4979.1	5006.7
33	5034.3	5063.3	5092.2	5121.2	5150.1	5179.1	5208.1	5237.0	5266.0	5294.9
34	5323.9	5354.3	5384.7	5415.1	5445.5	5475.9	5506.2	5536.6	5567.0	5597.4
35	5627.8	5659.7	5691.6	5723.4	5755.3	5787.2	5819.1	5851.0	5882.8	5914.7
36	5946.6	5980.0	6013.5	6046.9	6080.4	6113.8	6147.2	6180.7	6214.1	6247.6
37	6281.0	6316.1	6351.1	6386.2	6421.2	6456.3	6491.3	6526.4	6561.4	6596.5
38	6631.5	6668.2	6704.9	6741.7	6778.4	6815.1	6851.8	6888.5	6925.3	6962.0
39	6998.7	7037.2	7075.7	7114.1	7152.6	7191.1	7229.6	7268.1	7306.5	7345.0
40	7383.5	7423.8	7464.1	7504.3	7544.6	7584.9	7625.2	7665.5	7705.7	7746.0
41	7786.3	7828.5	7870.6	7912.8	7955.0	7997.2	8039.3	8081.5	8123.7	8165.8
42	8208.0	8252.1	8296.2	8340.4	8384.5	8428.6	8472.7	8516.8	8561.0	8605.1
43	8649.2	8695.4	8741.5	8787.7	8833.8	8880.0	8926.1	8972.3	9018.4	9064.6
44	9110.7	9159.0	9207.2	9255.5	9303.7	9352.0	9400.2	9448.5	9496.7	9545.0
45	9593.2	9643.6	9694.1	9744.5	9795.0	9845.4	9895.8	9946.3	9996.7	10047.2
46	10097.6	10150.3	10203.0	10255.7	10308.4	10361.1	10413.8	10466.5	10519.2	10571.9
47	10624.6	10679.7	10734.7	10789.8	10844.8	10899.9	10954.9	11010.0	11065.0	11120.1
48	11175.1	11232.6	11290.1	11347.6	11405.1	11462.6	11520.0	11577.5	11635.0	11692.5
49	11750.0	11810.0	11870.0	11930.0	11990.0	12050.0	12109.9	12169.9	12229.9	12289.9
50	12349.9	12412.5	12475.1	12537.7	12600.3	12662.9	12725.5	12788.1	12850.7	12913.3
51	12975.9	13041.2	13106.5	13171.8	13237.1	13302.5	13367.8	13433.1	13498.4	13563.7
52	13629.0	13697.1	13765.2	13833.3	13901.4	13969.5	14037.6	14105.7	14173.8	14241.9
53	14310.0	14381.0	14452.0	14523.0	14594.0	14665.0	14736.0	14807.0	14878.0	14949.0
54	15020.0	15094.0	15167.9	15241.9	15315.9	15389.9	15463.8	15537.8	15611.8	15685.7
55	15759.7	15836.8	15913.8	15990.9	16068.0	16145.1	16222.1	16299.2	16376.3	16453.3
56	16530.4	16610.7	16690.9	16771.2	16851.5	16931.8	17012.0	17092.3	17172.6	17252.8
57	17333.1	17416.7	17500.3	17583.9	17667.5	17751.1	17834.6	17918.2	18001.8	18085.4
58	18169.0	18256.0	18342.9	18429.9	18516.9	18603.9	18690.8	18777.8	18864.8	18951.7
59	19038.7	19129.2	19219.8	19310.3	19400.8	19491.4	19581.9	19672.4	19762.9	19853.5
60	19944.0	19977.2	20010.5	20043.7	20077.0	20110.2	20143.4	20176.7	20209.9	20243.2