



# INDICE

## 1 – INTRODUZIONE E SCELTA DELL'ISOLAMENTO PERIMETRALE

- 1.1 Premessa e descrizione dell'edificio 4
- 1.2 Scelta della strategia di isolamento perimetrale 5

## 2 – CALCOLO DEL CARICO TERMICO INVERNALE

- 2.1 Metodo di calcolo e norme di riferimento 5
- 2.2 Calcolo della potenza dispersa per trasmissione  $Q_{tr}$  5
  - 2.2.1 Calcolo di  $H_{tr,ie}$  6
    - CALCOLO TRASMITTANZE PARETI 6
    - CALCOLO PONTI TERMICI 8
    - CALCOLO DELLE SUPERFICI DISPERDENTI DELL'INVOLUCRO 12
    - CALCOLO DI  $H_{tr,ie}$  14
  - 2.2.2 Calcolo di  $H_{tr,ig}$  14
- 2.2 Calcolo della potenza dispersa per trasmissione  $Q_{tr}$  15
- 2.3 Calcolo della potenza dispersa per ventilazione  $Q_{ve}$  15
- 2.4 Calcolo del carico termico totale  $Q_{tot}$  16
- 2.5 Calcolo carico termico di una singola zona termica dell'edificio 16

## 3 – IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE

- 3.1 Introduzione 18
- 3.2 Scelta dei ventilconvettori e caldaia 20
- 3.3 Dimensionamento di massima delle tubazioni di un singolo locale 20
- 3.4 Perdite di carico di un singolo locale 21
- 3.5 Dimensionamento reale dell'impianto di un singolo locale 22

## 4 – VERIFICA INTERSTIZIALE TRAMITE DIAGRAMMI DI GLASER

- Chiusura verticale di tamponamento 23
- Copertura 24

## BIBLIOGRAFIA 27

# 1 - INTRODUZIONE E SCELTA DELL'ISOLAMENTO PERIMETRALE

## 1.1 Premessa e descrizione dell'edificio

L'edificio oggetto di studio è destinato a uso scolastico, situato in Via Palmanova a Udine, e si sviluppa su tre piani fuori terra oltre a un piano interrato.

La localizzazione in provincia di Udine colloca l'edificio in zona climatica E, con un valore di gradi giorno pari a 2.323. Per il dimensionamento impiantistico si assumono le seguenti condizioni di progetto:

- **Temperatura interna di riferimento: 20 °C**, assunta in conformità alla UNI EN 12831 per ambienti scolastici.

Tipo di locale dell'edificio	Temperatura interna di progetto, $\tilde{\theta}_i$ [°C]
Ufficio singolo	20
Uffici a spazio aperto	20
Sala conferenze	20
Auditorium	20
Bar-Ristorante	20
Aule scolastiche	20
Scuola materna	20
Asilo nido	22
Supermercato	16
Locali di abitazione	20
Bagni	24
Chiese	15
Musei, gallerie	16

- **Temperatura esterna di progetto: -5 °C** per il Comune di Udine, come riportato nella tabella di riferimento UNI 5364. Per adottare un approccio cautelativo, e tenendo conto delle riduzioni dovute ai fattori ambientali (effetto di quota: -1 °C ogni 100 m di incremento altimetrico), si assume come temperatura esterna di progetto il valore di **-6 °C**.

Prov.	Comune	Alt. [m]	Z	GG	$\theta_e^*$ [°C]	$\theta_{m,e}$ [°C]
AN	Ancona	16	D	1688	-2	15,1
AO	Aosta	583	E	583	-10	10,4
AQ	L'Aquila	714	E	2514	-5	12,1
BA	Bari	5	C	1185	0	16,4
BO	Bologna	54	E	2259	-5	14,2
BZ	Bolzano	262	E	2791	-15	12,6
CA	Cagliari	4	C	990	3	17,6
FI	Firenze	40	D	1821	0	14,8
GE	Genova	19	D	1435	0	16,1
MI	Milano	122	E	2404	-5	13,7
NA	Napoli	17	C	1034	2	18,2
PA	Palermo	14	B	751	5	18,0
PD	Padova	12	E	2383	-5	12,8
PZ	Potenza	819	E	2472	-3	12,5
RC	Reggio Cal.	15	B	772	3	18,1
RM	Roma	20	D	1415	0	16,3
TN	Trento	194	E	2567	-12	15,9
TO	Torino	239	E	2617	-8	12,4
UD	Udine	113	E	2323	-5	13,6
VE	Venezia	1	E	2345	-5	13,8

## 1.2 Scelta della strategia di isolamento perimetrale

Per l'isolamento perimetrale è stata adottata la soluzione del cappotto esterno, scelta per garantire la continuità dell'isolamento e ridurre i ponti termici lineari lungo le superfici verticali dell'edificio. Il materiale isolante selezionato è un pannello in PIR con spessore di 10 cm, caratterizzato da bassa conducibilità termica, pari a circa 0,022 W/mK, ridotto assorbimento d'acqua e buona stabilità dimensionale, che ne assicurano prestazioni costanti nel tempo.

## 2 - CALCOLO DEL CARICO TERMICO INVERNALE

### 2.1 Metodo di calcolo e norme di riferimento

Il calcolo del fabbisogno termico invernale dell'edificio è stato effettuato secondo la UNI EN 12831, norma di riferimento per la determinazione del carico termico negli edifici.

Il fabbisogno termico complessivo è espresso come somma di due contributi principali:

$$Q_{tot} = Q_{tr} + Q_{ve}$$

Dove  $Q_{tr}$  rappresenta le dispersioni per trasmissione attraverso le superfici opache, i serramenti, i ponti termici e gli scambi verso il terreno, mentre  $Q_{ve}$  rappresenta le perdite termiche dovute alla ventilazione degli ambienti.

### 2.2 Calcolo della potenza dispersa per trasmissione $Q_{tr}$

La potenza dispersa per trasmissione attraverso le pareti dell'involucro è data da:

$$Q_{tr} = (H_{tr,ie} + H_{tr,iue} + H_{tr,ig} + H_{tr,ij}) \cdot (\Delta T)$$

Dove i vari  $H_{tr}$  sono i coefficienti di trasmissione:

- $H_{tr,ie}$  dall'interno verso l'esterno.
- $H_{tr,iue}$  attraverso ambienti non riscaldati.
- $H_{tr,ig}$  attraverso il terreno/pavimento.
- $H_{tr,ij}$  dall'interno verso ambienti a temperatura diversa.

### 2.2.1 Calcolo di $H_{tr,ie}$

Il coefficiente di trasmissione  $H_{tr,ie}$  si ottiene sommando il contributo delle superfici opache e trasparenti e quello dei ponti termici lineici:

$$H_{tr,ie} = \sum A_k \cdot U_k \cdot e_k + \sum \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k$$

Dove:

- $A_k$  e  $U_k$ , area e trasmittanza della parete/finestra  $k$ .
- $\Psi_k$ , coefficiente di dispersione, o trasmittanza lineica, del ponte termico  $k$ .
- $l_k$ , lunghezza del ponte termico  $k$ .
- $e_k$ , coefficienti di esposizione che dipendono dall'orientazione.

### CALCOLO TRASMITTANZE PARETI

Per il calcolo del fabbisogno termico invernale, i valori di resistenza termica superficiale sono stati assunti secondo la norma UNI EN ISO 6946, a seconda della direzione del flusso termico.

	ascendente	orizzontale	discendente
$R''_{s,int}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.10	0.13	0.17
$R''_{s,est}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.04	0.04	0.04

Si fa riferimento inoltre al Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 per l'individuazione dei limiti di trasmittanza termica  $U$  delle varie chiusure, con i seguenti valori:

- **Pareti verticali opache**, verso l'esterno, ambienti non climatizzati o contro terra:  
 **$U = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$** ;
- **Chiusure trasparenti** e cassonetti comprensivi di infissi, verso l'esterno o ambienti non climatizzati:  **$U = 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$** ;
- **Coperture opache orizzontali** o inclinate, verso l'esterno o ambienti non climatizzati:  
 **$U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$** ;
- **Pavimenti opachi orizzontali**, verso l'esterno, ambienti non climatizzati o contro terra:  
 **$U = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$** .

Per semplificare il calcolo si assumono le seguenti ipotesi:

- Regime stazionario, cioè grandezze costanti nel tempo;
- Temperatura dell'aria omogenea in ogni punto dell'ambiente;
- Proprietà termofisiche dei materiali e coefficienti di scambio superficiale costanti;
- Pareti piane e composte da strati di materiali paralleli;

- Resistenze a contatto tra materiali diversi trascurabili;
- Flusso termico monodimensionale, perpendicolare alle superfici della parete.

Sulla base di quanto previsto dalla UNI EN ISO 6946, per ciascun pacchetto costruttivo delle pareti, dei serramenti, dei solai e delle coperture è stato determinato il valore della resistenza termica  $R$  e della trasmittanza  $U$ . Questi valori costituiscono la base per il calcolo dei coefficienti di trasmissione  $H_{tr,ie}$  utilizzati nel calcolo del fabbisogno termico complessivo.

### Trasmittanza termica chiusure verticali trasparenti

Per il calcolo delle dispersioni termiche delle chiusure trasparenti si è fatto riferimento ai dati riportati nella scheda tecnica del modello di finestra adottato. In particolare, il sistema finestra modello KF410 Internorm assicura un isolamento termico  $U_w = 0,72 \text{ W/m}^2$ .

### Trasmittanza termica chiusura opaca verticale (tamponamento)

Materiale	L [m]	$\lambda$ [W/mK]	$R_t$ [m <sup>2</sup> K/W]
Interno			0,130
Cartongesso	0,0125	0,4	0,029
Laterizio	0,25	0,35	0,714
PIR	0,1	0,022	4,545
Intonaco	0,02	0,7	0,029
Esterno			0,040
			<hr/>
			$R_{tot} = 5,487$

$$U = 1/R_{tot} = 0,182 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Trasmittanza termica chiusura opaca verticale (setti)

Materiale	L [m]	$\lambda$ [W/mK]	$R_t$ [m <sup>2</sup> K/W]
Interno			0,130
Cartongesso	0,0125	0,4	0,029
Cemento armato	0,3	2,3	0,130
PIR	0,1	0,022	4,545
Intonaco	0,02	0,7	0,029
Esterno			0,040
			<hr/>
			$R_{tot} = 4,903$

$$U = 1/R_{tot} = 0,204 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Trasmittanza termica chiusura orizzontale superiore

Materiale	L [m]	$\lambda$ [W/mK]	$R_t$ " [m <sup>2</sup> K/W]
Interno			0,100
Controsoffitto	0,02	0,21	0,095
Solaio portante	0,31	0,5	0,620
Strato pendenza	0,05	0,29	0,172
Barriera vapore	0,003	0	0,000
PIR	0,1	0,022	4,545
XPS	0,03	0,035	0,857
Membrana bituminosa	0,004	0	0,000
Esterno			0,040
			<b>R<sub>tot</sub> = 6,430</b>

$$U = 1/R_{tot} = \mathbf{0,156 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

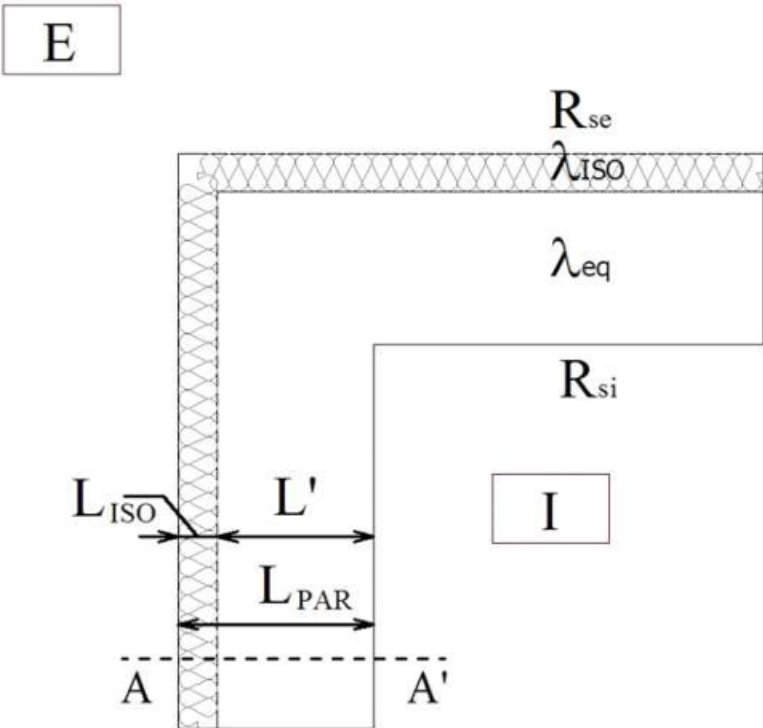
### Trasmittanza termica chiusura orizzontale controterra

Materiale	L [m]	$\lambda$ [W/mK]	$R_t$ " [m <sup>2</sup> K/W]
Interno			0,170
Microcemento	0,003	0	0,000
Massetto di collegamento	0,03	1,6	0,019
Massetto alleggerito	0,05	0,29	0,172
Barriera vapore	0,003	0	0,000
PIR	0,1	0,022	4,545
Strato di regolarizzazione	0,02	1	0,020
Soletta di completamento	0,1	2,3	0,043
Strato di ventilazione	0,45	0	0,000
Magrone in cemento	0,1	1,5	0,067
Barriera gas radon	0,003	0	0,000
Strato di tenuta	0,004	0	0,000
Esterno			0,040
			<b>R<sub>tot</sub> = 5,077</b>

$$U = 1/R_{tot} = \mathbf{0,197 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

### CALCOLO PONTI TERMICI

Attraverso l'analisi della struttura e la consultazione dell'Abaco CENED, è possibile individuare le tipologie di ponti termici presenti nel progetto e calcolarne la trasmittanza termica lineica (calcoli con atlanti dei ponti termici conformi alla UNI EN ISO 14683:2018).

ASP.008	ANGOLO SPORGENTE ISOLATO DALL'ESTERNO SENZA PILASTRO
Ponte termico formato dalla giunzione ad angolo sporgente di due pareti uguali isolate dall'esterno, senza pilastro nella giunzione.	
<b>SEZIONE ORIZZONTALE</b>	
	
<b>TRASMITTANZA TERMICA LINEARE</b>	
Riferita alle dimensioni esterne	$\psi_E = -0.090 - 0.157 \cdot U_{PAR} + 0.032 \cdot \lambda_{eq} \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$
Riferita alle dimensioni interne	$\psi_I = 0.047 + 0.092 \cdot U_{PAR} + 0.127 \cdot \lambda_{eq} \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$

$$U_{par} = U_{setti} = 0,204 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\lambda_{eq} = \lambda_{c.a.} = 2,3 \text{ W/mK}$$

$$\psi_e = -0,090 - 0,157 \cdot 0,204 + 0,032 \cdot 2,3 = -0,05 \text{ W/mK}$$

$$l_k = 10,5 \text{ m}$$

$$\sum \psi_k \cdot l_k \cdot e_k = \text{parete nord: } -0,05 \cdot 10,5 \cdot 1,2 = -0,61 \text{ W/K} = -2,77 \text{ W/K}$$

$$\text{parete est: } -0,05 \cdot 10,5 \cdot 1,15 = -0,58 \text{ W/K}$$

$$\text{parete sud: } -0,05 \cdot 10,5 \cdot 1 \cdot 2 = -1,02 \text{ W/K}$$

$$\text{parete ovest: } -0,05 \cdot 10,5 \cdot 1,1 = -0,56 \text{ W/K}$$

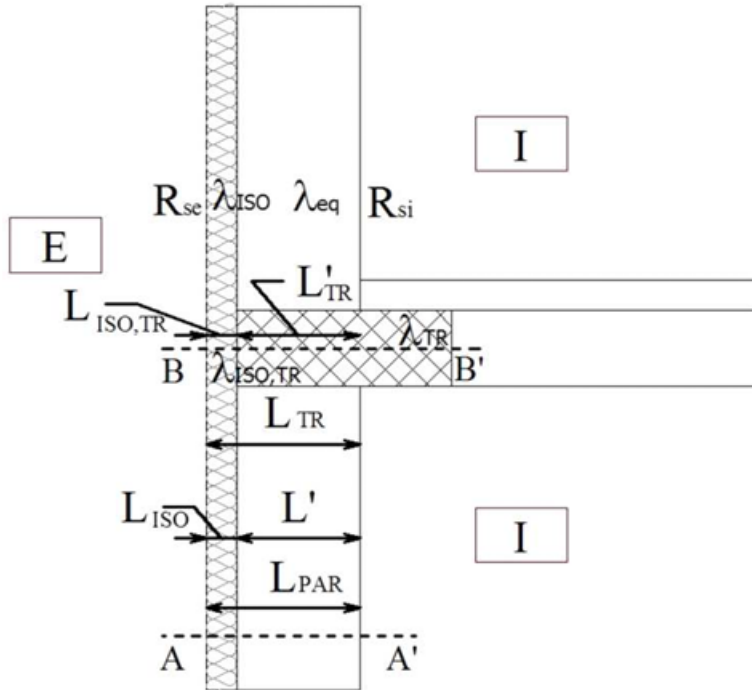
SOL.005

**PARETE ISOLATA ALL'ESTERNO COL SOLAIO E TRAVE ISOLATA**

Ruota (CTRL+J)

Ponte termico formato dalla giunzione di una parete esterna isolata all'esterno con un solaio, la cui trave è isolata all'esterno.

**SEZIONE VERTICALE**



**TRASMITTANZA TERMICA LINEARE**

Riferita alle dimensioni esterne

$$\psi_E = -0.041 + 0.089 \cdot U_{PAR} + \frac{0.171}{\lambda_{eq}} \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$$

Riferita alle dimensioni interne

$$\psi_I = -0.041 + (L_{SOL} + 0.089) U_{PAR} + \frac{0.171}{\lambda_{eq}} \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$$

$$U_{par} = 0,182 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\lambda_{eq} = 0,38 \text{ W/mK}$$

$$\psi_e = -0,041 + 0,089 \cdot 0,182 + 0,171 / 0,38 = \mathbf{0,43 \text{ W/mK}}$$

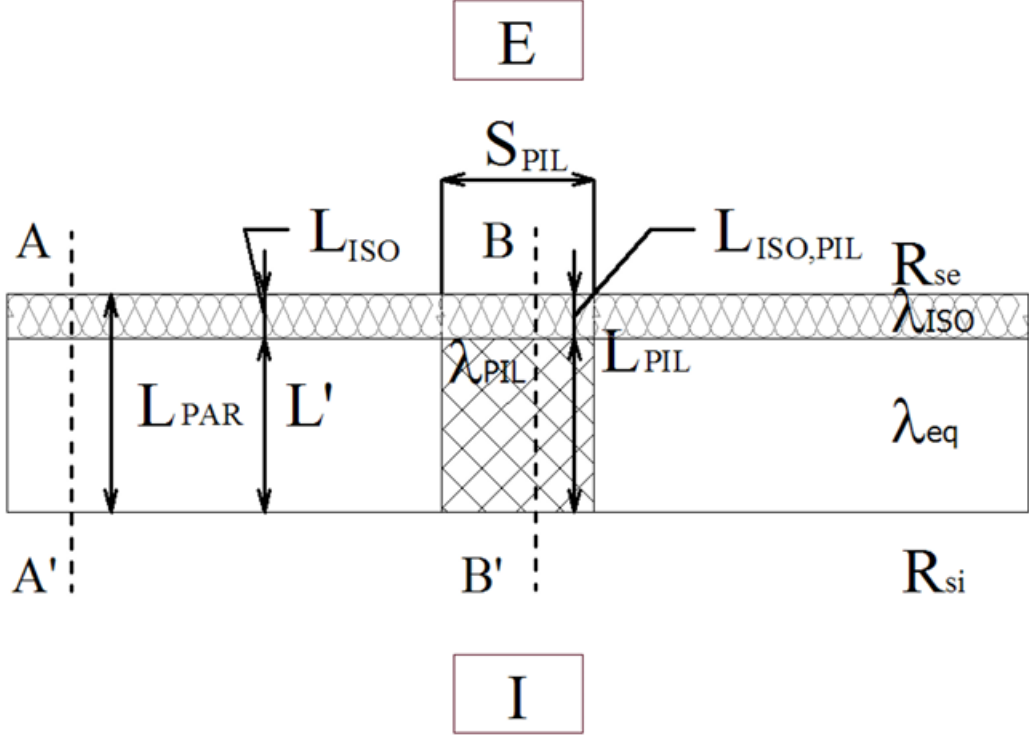
$$l_1 = 33,40 \text{ m} \quad l_2 = 34,70 \text{ m}$$

$$\sum \psi_k \cdot l_k \cdot e_k = \text{parete nord: } 0,43 \cdot 34,70 \cdot 2 \cdot 1,2 = 34,48 \text{ W/K} = \mathbf{130,37 \text{ W/K}}$$

$$\text{parete est: } 0,43 \cdot 33,40 \cdot 2 \cdot 1,15 = 34,33 \text{ W/K}$$

$$\text{parete sud: } 0,43 \cdot 34,70 \cdot 2 \cdot 1 = 28,73 \text{ W/K}$$

$$\text{parete ovest: } 0,43 \cdot 33,40 \cdot 2 \cdot 1,1 = 32,83 \text{ W/K}$$

PIL.007	PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO ISOLATO ALL'ESTERNO
Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate all'esterno, con presenza di pilastro isolato dall'esterno nella giunzione.	
<b>SEZIONE ORIZZONTALE</b>	
 <p style="text-align: center;">E</p> <p style="text-align: center;">I</p>	
<b>TRASMITTANZA TERMICA LINEARE</b>	
Riferita alle dimensioni esterne	$\psi_E = 0 \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$
Riferita alle dimensioni interne	$\psi_I = 0 \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$

$$\psi_e = 0 \text{ W/mK}$$

$$\sum \psi_k \cdot l_k \cdot e_k = 0 \text{ W/K}$$

Dopo aver calcolato le tre tipologie di ponti termici più ricorrenti utilizzando i valori di trasmittanza lineica  $\psi$ , la somma totale delle dispersioni termiche attribuibili ai ponti termici calcolati risulta pari a:

$$H_{pt, \text{calcolati}} = -2,77 + 130,37 + 0 = \mathbf{127,60 \text{ W/K}}$$

### Stima delle dispersioni dei ponti termici non calcolati

Per i ponti termici non calcolati direttamente si è adottato un metodo di stima basato sull'utilizzo dei valori di trasmittanza lineica già calcolati per i ponti termici principali. A ciascun ponte è stato quindi attribuito il valore di  $\Psi$  del ponte termico più simile per geometria e composizione, calcolando le dispersioni con la formula  $H = \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k$ . In questo modo si ottiene una valutazione coerente con i dettagli già analizzati e una rappresentazione più realistica delle perdite complessive.

#### Angolo rientrante con pilastro isolato dall'esterno

$$\Psi_e = -0,05 \text{ W/mK}$$

$$\sum \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k = -0,58 \text{ W/K}$$

#### Parete e copertura isolate dall'esterno

$$\Psi_e = 0,43 \text{ W/mK}$$

$$\sum \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k = 65,17 \text{ W/K}$$

#### Parete esterna isolata con solaio e trave isolata tra piano terra e piano interrato

$$\Psi_e = 0,43 \text{ W/mK}$$

$$\sum \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k = 17,76 \text{ W/K}$$

#### Parete controterra isolata con solaio isolato

$$\Psi_e = 0,43 \text{ W/mK}$$

$$\sum \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k = 65,17 \text{ W/K}$$

La stima delle dispersioni dovute ai ponti termici non calcolati risulta quindi essere pari a:

$$H_{pt, stimati} = -0,58 + 65,17 + 17,76 + 65,17 = 142,51 \text{ W/K}$$

Sommando tale contributo alle dispersioni dei ponti termici calcolati direttamente, la dispersione complessiva attribuibile ai ponti termici dell'edificio ammonta a:

$$H_{pt, tot} = H_{pt, stimati} + H_{pt, calcolati} = 142,51 + 127,60 = 270,11 \text{ W/K}$$

### CALCOLO DELLE SUPERFICI DISPERDENTI DELL'INVOLUCRO

Il contributo di dispersione termica dovuto alle superfici opache e trasparenti dell'involucro edilizio è stato stimato secondo la formula:

$$H_{ie, involucro} = \sum A_k \cdot U_k \cdot e_k$$

Per calcolare la trasmittanza complessiva dell'involucro, i contributi dei diversi elementi che lo compongono, tra cui superfici vetrate, setti portanti e pareti di tamponamento, sono stati valutati singolarmente per ogni superficie.

PARETE NORD			PARETE EST		
	$e_k=$	1,20		$e_k=$	1,15
Finestre:	$A_w=$	52,32 m <sup>2</sup>	Finestre:	$A_w=$	36,00 m <sup>2</sup>
	$U_w=$	0,72 W/m <sup>2</sup> K		$U_w=$	0,72 W/m <sup>2</sup> K
Setti:	$A_s=$	152,73 m <sup>2</sup>	Setti:	$A_s=$	148,25 m <sup>2</sup>
	$U_s=$	0,20 W/m <sup>2</sup> K		$U_s=$	0,20 W/m <sup>2</sup> K
Pareti:	$A_p=$	145,65 m <sup>2</sup>	Pareti:	$A_p=$	180,10 m <sup>2</sup>
	$U_p=$	0,18 W/m <sup>2</sup> K		$U_p=$	0,18 W/m <sup>2</sup> K
<b><math>H=e_k(A_wU_w+A_sU_s+A_pU_p)=</math></b>		<b>114,44 W/K</b>	<b><math>H=e_k(A_wU_w+A_sU_s+A_pU_p)=</math></b>		<b>102,33 W/K</b>

PARETE SUD			PARETE OVEST		
	$e_k=$	1,00		$e_k=$	1,10
Finestre:	$A_w=$	48,08 m <sup>2</sup>	Finestre:	$A_w=$	52,00 m <sup>2</sup>
	$U_w=$	0,72 W/m <sup>2</sup> K		$U_w=$	0,72 W/m <sup>2</sup> K
Setti:	$A_s=$	134,19 m <sup>2</sup>	Setti:	$A_s=$	124,11 m <sup>2</sup>
	$U_s=$	0,20 W/m <sup>2</sup> K		$U_s=$	0,20 W/m <sup>2</sup> K
Pareti:	$A_p=$	168,43 m <sup>2</sup>	Pareti:	$A_p=$	188,24 m <sup>2</sup>
	$U_p=$	0,18 W/m <sup>2</sup> K		$U_p=$	0,18 W/m <sup>2</sup> K
<b><math>H=e_k(A_wU_w+A_sU_s+A_pU_p)=</math></b>		<b>92,68 W/K</b>	<b><math>H=e_k(A_wU_w+A_sU_s+A_pU_p)=</math></b>		<b>106,77 W/K</b>

COPERTURA		
	$e_k=$	1,00
	$A_c=$	710,02 m <sup>2</sup>
	$U_c=$	0,16 W/m <sup>2</sup> K
<b><math>H=e_k(A_wU_w+A_sU_s+A_pU_p)=</math></b>		<b>110,42 W/K</b>

Dalla valutazione dei contributi di trasmittanza termica di ciascuna superficie opaca e trasparente è stato possibile calcolare i valori associati a ciascun elemento. Sommando tali contributi si ottiene la trasmittanza complessiva dell'involucro edilizio verso l'esterno, pari a:

$$H_{ie, involucro} = 114,44 + 102,33 + 92,68 + 106,77 + 110,42 = 526,63 \text{ W/K}$$

### 2.2.1 Calcolo di $H_{tr,ie}$

La dispersione termica totale dell'edificio verso l'esterno è stata ottenuta sommando i contributi delle superfici dell'involucro e dei ponti termici, valutati nei capitoli precedenti. In questo modo si ottiene il coefficiente complessivo per trasmissione dell'edificio secondo la relazione:

$$H_{tr,ie} = \sum A_k \cdot U_k \cdot e_k + \sum \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k = H_{ie, involucro} + H_{pt, tot} = 526,63 + 270,11 = \mathbf{796,74 \text{ W/K}}$$

### 2.2.2 Calcolo di $H_{tr,ig}$

La trasmittanza globale verso gli ambienti interni  $H_{tr,ig}$  è stata calcolata considerando il contributo del pavimento controterra e della porzione interrata delle pareti verticali, secondo la relazione:

$$H_{tr,ig} = A \cdot U_{bf} + A_z \cdot U_{bw}$$

Dove:

- $U_{bf}$  è la trasmittanza equivalente attraverso il pavimento: si calcola come  $U_0$  nel caso di pavimento appoggiato sul terreno, ma incrementando lo spessore equivalente  $d_t$  di metà della profondità ( $z/2$ ) per tenere conto dell'isolamento del terreno
- $A_z = z \cdot P$  è la superficie della porzione interrata delle pareti verticali
- $U_{bw}$  è la trasmittanza della porzione interrata delle pareti verticali

Per calcolare  $U_{bf}$  è necessario conoscere il grado di isolamento del solaio controterra:

$$B' = 2A / P = 2 \cdot 710,02 / 136,20 = 10,43$$

$$d_t = w + \lambda_g (R_{floor}) = 0,3 + 3 \cdot 5 = 15,30$$

Constatato che  $d_t > B'$  possiamo procedere a calcolare  $U_0$  con la formula per i pavimenti ben isolati, ma incrementando lo spessore equivalente  $d_t$  di metà della profondità ( $z/2$ ) per trovare direttamente  $U_{bf}$ .

$$U_{bf} = \lambda_g / (0,45 \cdot B' + d_t + z/2) = 3 / (0,45 \cdot 10,43 + 15,3 + 3,5 / 2) = \mathbf{0,14 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

$$A = \mathbf{710,02 \text{ m}^2}$$

$$A_z = z \cdot P_{interrato} = 3,5 \cdot 66,60 = \mathbf{233,10 \text{ m}^2}$$

$$U_{bw} = 0,64 \cdot \lambda_g / z \cdot (1 + (d_t/2) / (d_t + z)) \cdot \log(z/d_w + 1) = \mathbf{0,64 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Quindi:

$$H_{tr,ig} = A \cdot U_{bf} + A_z \cdot U_{bw} = 710,02 \cdot 0,14 + 233,10 \cdot 0,64 = \mathbf{246,83 \text{ W/K}}$$

## 2.2 Calcolo della potenza dispersa per trasmissione $Q_{tr}$

Sapendo che la potenza dispersa attraverso le pareti dell'involucro è data da:

$$Q_{tr} = (H_{tr,ie} + H_{tr,iue} + H_{tr,ig} + H_{tr,ij}) \cdot (\Delta T)$$

dove i vari  $H_{tr}$  sono i pari a:

- $H_{tr,ie}$  dall'interno verso l'esterno = **796,74 W/K**
- $H_{tr,iue}$  attraverso ambienti non riscaldati = **0**
- $H_{tr,ig}$  attraverso il terreno/pavimento = **246,83 W/K**
- $H_{tr,ij}$  dall'interno verso ambienti a temperatura diversa = **0**
- $\Delta T = 20 - (-6) = \mathbf{26\text{ }^\circ\text{C}}$

$$Q_{tr} = (796,74 + 246,83) \cdot 26 = \mathbf{27\ 132,82\ W}$$

## 2.3 Calcolo della potenza dispersa per ventilazione $Q_{ve}$

La potenza termica dispersa per ventilazione  $Q_{ve}$  è stata calcolata considerando i ricambi d'aria necessari per garantire il corretto livello di comfort all'interno degli ambienti riscaldati.

La dispersione per ventilazione si determina mediante la relazione:

$$Q_{ve} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

In cui:

- $\dot{V}$  rappresenta la portata volumetrica d'aria sostituita
- $\rho$  la densità dell'aria =  $1,2\text{ kg/m}^3$
- $c_p$  il calore specifico =  $1000\text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- $\Delta T$  la differenza tra temperatura =  $26\text{ }^\circ\text{C}$

La portata volumetrica d'aria  $\dot{V}$  da considerare corrisponde alla maggiore tra la portata minima per ragioni igieniche  $\dot{V}_{min}$  e la portata dovuta alle infiltrazioni  $\dot{V}_{inf}$  attraverso infissi e altre aperture. Nel nostro caso, è stata considerata la portata minima per ragioni igieniche, calcolata come segue:

$$\dot{V} = \dot{V}_{min} = n \cdot V$$

Con:

- $n = 2$ , numero di ricambi d'aria orari
- $V = \text{volume totale} = 710,02 \cdot 10,5 + 233,10 \cdot 3,5 = 8271,06\text{ m}^3$

Pertanto, considerando la portata d'aria minima e ipotizzando l'installazione di un recuperatore di calore con efficienza  $\eta$  pari all'80 %, la potenza termica dispersa per ventilazione risulta pari a:

$$Q_{ve} = \rho \cdot n \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot (1 - \eta) = 1,2 \cdot 1000 \cdot 2/3600 \cdot 8271,06 \cdot 26 \cdot 0,2 = \mathbf{28\ 673,01\ W}$$

## 2.4 Calcolo del carico termico totale $Q_{tot}$

La potenza termica totale dispersa dall'edificio  $Q_{tot}$  si ottiene sommando le dispersioni per trasmissione  $Q_{tr}$  e per ventilazione  $Q_{ve}$ :

$$Q_{tot} = Q_{tr} + Q_{ve} = 27\,132,82 + 28\,673,01 = 55\,805,83 \text{ W} = \mathbf{55,81 \text{ kW}}$$

## 2.5 Calcolo carico termico di una singola zona termica dell'edificio

Per procedere al dimensionamento degli impianti di un locale, è stato calcolato il carico termico relativo a quella singola zona termica dell'edificio. A tal fine si è adottato lo stesso metodo utilizzato per la determinazione del carico termico complessivo, applicandolo però ai soli elementi costruttivi che delimitano il locale considerato.

L'analisi è stata svolta su un'aula situata al secondo piano, con esposizione a sud, scelta come caso rappresentativo per il dimensionamento dei terminali e delle tubazioni. Sono stati presi in considerazione i contributi dovuti alle superfici opache e trasparenti, ai ponti termici e alle dispersioni verso l'esterno, mentre non sono stati inclusi quelli relativi al suolo e ai locali confinanti a temperatura diversa, in quanto non presenti nel caso specifico.

### Calcolo delle superfici disperdenti dell'involucro

#### PARETE SUD AULA

	$e_k =$	1
Finestre:	$A_w =$	5,76 m <sup>2</sup>
	$U_w =$	0,72 W/m <sup>2</sup> K
Setti:	$A_s =$	9,69 m <sup>2</sup>
	$U_s =$	0,20 W/m <sup>2</sup> K
Parete:	$A_p =$	13,67 m <sup>2</sup>
	$U_p =$	0,18 W/m <sup>2</sup> K

$$H_{ie, involucro} = e_k(A_w U_w + A_s U_s + A_p U_p) = \mathbf{8,61 \text{ W/K}}$$

### Calcolo ponti termici

Parete esterna isolata con solaio e trave isolata:

$$\Psi_e = 0,43 \text{ W/mK}$$

$$l_1 = 8,30 \text{ m}$$

$$\Sigma \Psi_k \cdot l_k \cdot e_k = 0,43 \cdot 8,30 \cdot 1 = \mathbf{3,57 \text{ W/K}}$$

Angolo rientrante con pilastro isolato:

$$\psi_e = -0,05 \text{ W/mK}$$

$$l_k = 3,5 \text{ m}$$

$$\sum \psi_k \cdot l_k \cdot e_k = -0,05 \cdot 3,5 \cdot 1 = -0,17 \text{ W/K}$$

$$H_{pt, tot} = 3,57 - 0,17 = 3,4 \text{ W/K}$$

Calcolo di  $Q_{tot}$

$$H_{tr,ie} = \sum A_k \cdot U_k \cdot e_k + \sum \psi_k \cdot l_k \cdot e_k = H_{ie, involucro} + H_{pt, tot} = 8,61 + 3,4 = 12,01 \text{ W/K}$$

$$Q_{tr} = H_{tr,ie} \cdot \Delta T = 12,01 \cdot 26 = 312,35 \text{ W}$$

$$V = A \cdot h = 5,7 \cdot 7,7 \cdot (3,5 - 0,31) = 140,01$$

$$Q_{ve} = \rho \cdot n \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot (1 - \eta) = 1,2 \cdot 1000 \cdot 2/3600 \cdot 140,01 \cdot 26 = 2426,82 \text{ W}$$

$$Q_{tot} = Q_{tr} + Q_{ve} = 312,35 + 2426,82 = 2739,17 \text{ W} = 2,74 \text{ kW}$$

### 3 – IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE

#### 3.1 Introduzione






Per l'edificio è stato ipotizzato un impianto di ventilazione meccanica controllata, finalizzato a garantire il ricambio dell'aria interna con recupero di calore, e un impianto di climatizzazione a ventilconvettori con caldaia, scelto per la possibilità di modulare efficacemente la potenza termica in base alle esigenze dei locali, garantendo al contempo un'installazione ordinata e razionale che facilita la posa delle tubazioni e la manutenzione futura.

Il sistema funziona tramite una colonna principale che, partendo dalla caldaia, alimenta i due collettori presenti per piano. Da ciascun collettore, le dorsali principali percorrono i locali e si suddividono in derivazioni dirette ai ventilconvettori, riducendo il numero di linee dirette dal collettore e ottimizzando gli spazi di posa. Le tubazioni sono collocate nel controsoffitto, seguendo percorsi che minimizzano lunghezza complessiva e numero di curve, riducendo così le perdite di carico e facilitando eventuali interventi di manutenzione.

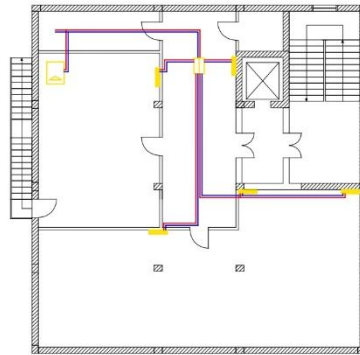
I collegamenti ai ventilconvettori avvengono attraverso contropareti appositamente realizzate, permettendo un passaggio ordinato e nascosto dei tubi. I ventilconvettori sono stati collocati, dove possibile, verso le pareti esterne per garantire una distribuzione più efficace del calore e migliorare il comfort interno.

Di seguito vengono riportate le planimetrie contenenti la locazione dei radiatori ed il passaggio delle tubazioni.

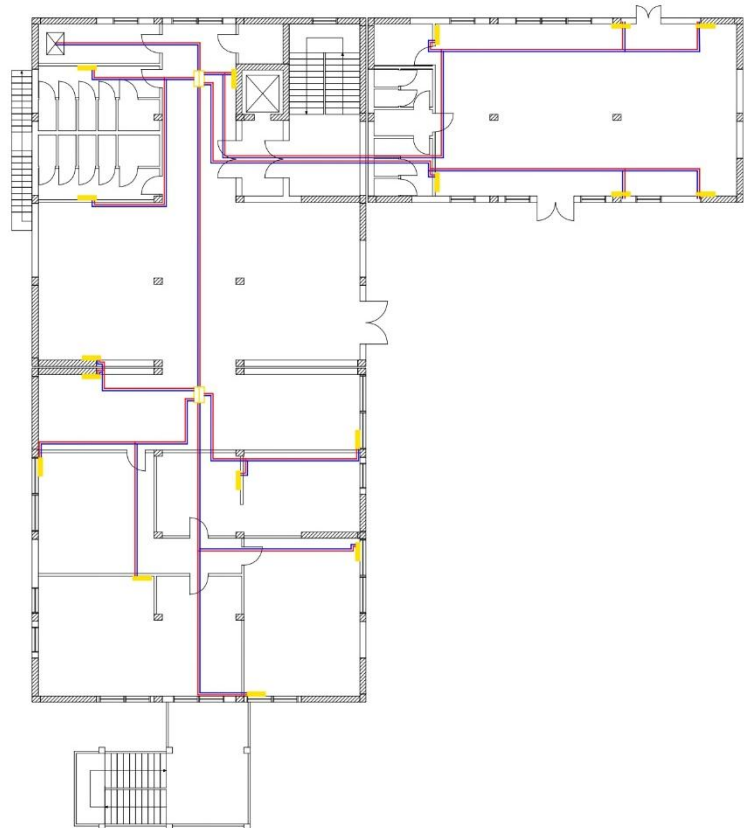
**Legenda:**

-  Acqua calda
-  Acqua fredda
-  Caldaia
-  Ventilconvettori
-  Collettore

**Piano interrato**



**Piano terra**



**Primo piano**



**Secondo piano**



### 3.2 Scelta dei ventilconvettori e caldaia

Per il progetto è stato scelto il modello di ventilconvettori Omnia Uli 26, adatto a un impianto a basse temperature e coerente con la progettazione di una struttura nuova caratterizzata da elevati livelli di isolamento termico. L'adozione di un impianto a basse temperature consente di massimizzare l'efficienza della caldaia e ridurre i consumi. I ventilconvettori sono alimentati con acqua alla temperatura di mandata **45–40 °C**, con potenza variabile da 1,44 a 2,30 kW e pari a **1,91 kW** a velocità media, sufficiente a coprire il carico termico dei locali. Le dimensioni compatte (60 × 100 × 20 cm) ne facilitano l'installazione e l'integrazione nell'involucro edilizio.

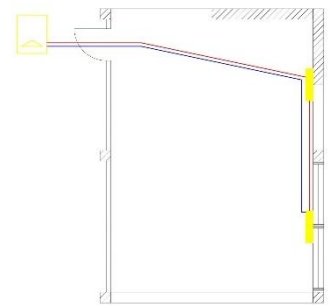
La caldaia scelta è il modello Ferroli Force W 80 kW, compatibile con l'impianto a basse temperature e in grado di soddisfare pienamente il fabbisogno termico complessivo calcolato, pari a 55,81 kW, assicurando un margine di sicurezza per eventuali picchi di domanda.

Per il dimensionamento delle tubazioni, sono stati utilizzati tubi multistrato PEX con diametri coerenti con la portata calcolata per ciascun locale e per l'anello principale. Per ridurre le dispersioni termiche lungo le tubazioni e garantire un funzionamento efficiente, le tubazioni sono state isolate con materiale a bassa conduttività termica. Lo spessore dell'isolante è stato stimato secondo le norme UNI EN ISO 12241 e UNI EN ISO 8497 per un diametro massimo complessivo di 20 + 15 mm, risultando compatibile con lo spazio disponibile nel controsoffitto e nelle contropareti senza interferire con l'installazione dei ventilconvettori.

### 3.3 Dimensionamento di massima delle tubazioni di un singolo locale

Per il dimensionamento di massima delle tubazioni del locale campione, l'impianto è stato semplificato ipotizzando un impianto monotubo. Conoscendo la potenza dispersa del locale e il salto di temperatura dell'anello, si è ricavata la portata dell'acqua tramite la formula:

$$\dot{m} = Q_{tot} / c \cdot \Delta T = 2739,17 / 4190 \cdot 5 = 0,13 \text{ kg/s}$$



Successivamente si è scelto di mantenere la velocità dell'acqua entro valori ottimali (0,5 – 1 m/s), in modo da garantire un funzionamento efficiente e silenzioso dell'impianto. Utilizzando la formula:

$$D = \sqrt{4 \cdot \dot{m} / \pi \cdot \rho \cdot w}$$

$$w = 4 \cdot \dot{m} / \pi \cdot \rho \cdot D^2$$

Sono stati valutati i diametri commerciali disponibili: 12 mm, 16 mm e 20 mm.

- Con tubi da **12 mm** la velocità dell'acqua risulta **1,16 m/s**, leggermente superiore al limite ottimale.
- Con tubi da **16 mm** la velocità scende a **0,65 m/s**, perfettamente entro l'intervallo desiderato.
- Con tubi da **20 mm** la velocità sarebbe troppo bassa (**0,41 m/s**), determinando un eccessivo sovradimensionamento.

Di conseguenza è stato scelto il tubo **20 x 2 mm con diametro interno di 16 mm**, garantendo un buon compromesso tra portata totale, perdite di carico e facilità di posa.

### 3.4 Perdite di carico

Per il dimensionamento di massima delle tubazioni a servizio del locale scelto, si è proceduto anche alla stima delle perdite di carico lungo l'anello di distribuzione.

Con gli stessi presupposti trovati nel capitolo precedente: **impianto monotubo 20 x 2 mm** con diametro interno di **16 mm** e **w = 0,65 m/s**

#### Perdite di carico distribuite

Le perdite di carico distribuite sono state calcolate secondo la relazione:

$$\Delta p_d = \xi \cdot \rho \cdot w^2 / 2$$

$$R_e = w \cdot D / \nu = 0,65 \cdot 0,016 / 10^{-6} = \mathbf{10400}$$

$$f = \mathbf{0,32} / R_e^{0,25} = 0,32 / 10400^{0,25} = \mathbf{0,03}$$

$$\xi = f \cdot L / D = 0,03 \cdot 29,4 / 0,016 = \mathbf{58,23}$$

$$\Delta p_d = \xi \cdot \rho \cdot w^2 / 2 = 58,23 \cdot 1000 \cdot 0,65^2 / 2 = 12300 \text{ Pa} = \mathbf{12,3 \text{ kPa}}$$

#### Perdite di carico localizzate

Le perdite di carico localizzate sono state valutate con la formula:

$$\Delta p_l = \xi \cdot \rho \cdot w^2 / 2$$

$\xi = \mathbf{18}$  (somma dei contributi  $\xi$  delle perdite di carico localizzate: curve, valvole, passaggio in ventilconvettori)

$$\Delta p_l = \xi \cdot \rho \cdot w^2 / 2 = 18 \cdot 1000 \cdot 0,65^2 / 2 = 3802 \text{ Pa} = \mathbf{3,8 \text{ kPa}}$$

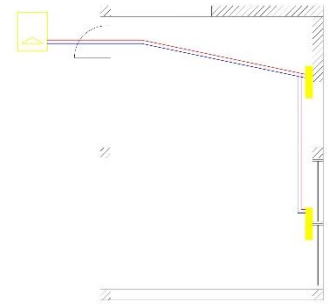
#### Perdite totali

La perdita di carico totale dell'anello è quindi data dalla somma:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_d + \Delta p_l = 12,3 + 3,8 = \mathbf{16,1 \text{ kPa}}$$

### 3.5 Dimensionamento reale dell'impianto a dorsale con derivazioni

Per approfondire il dimensionamento, si è considerato lo stesso locale campione, ipotizzando una distribuzione a dorsale principale con derivazioni verso ciascun ventilconvettore, come avviene nell'impianto reale.



La portata dell'anello è stata calcolata considerando la **portata nominale** richiesta dai ventilconvettori, pari a **331 L/h** per ciascun terminale. Si è quindi calcolata la portata di massa totale richiesta dalla dorsale principale e dalle derivazioni ai corpi scaldanti:

$$\dot{m}_{princ} = 2 \cdot 331 = 662 \text{ L/h} = 662 / 3600 = \mathbf{0,18 \text{ kg/s}}$$

$$\dot{m}_{deriv} = 331 \text{ L/h} = 331 / 3600 = \mathbf{0,09 \text{ kg/s}}$$

Per valutare i diametri della dorsale principale e delle derivazioni si è utilizzata la stessa formula:

$$D = \sqrt{4 \cdot \dot{m} / \pi \cdot \rho \cdot w}$$

$$w = 4 \cdot \dot{m} / \pi \cdot \rho \cdot D^2$$

- Per la **dorsale principale** è stato scelto il tubo **20 x 2 mm** con diametro interno di **16 mm**, ottenendo una velocità pari a **w = 0,92 m/s**, entro l'intervallo desiderato.
- Le **derivazioni** verso i singoli ventilconvettori, che trasportano solo la frazione di portata necessaria a ciascun terminale, saranno invece dimensionate con tubi **16x 2 mm** con diametro interno di **12 mm**, ottenendo una velocità pari a **w = 0,81 m/s**.

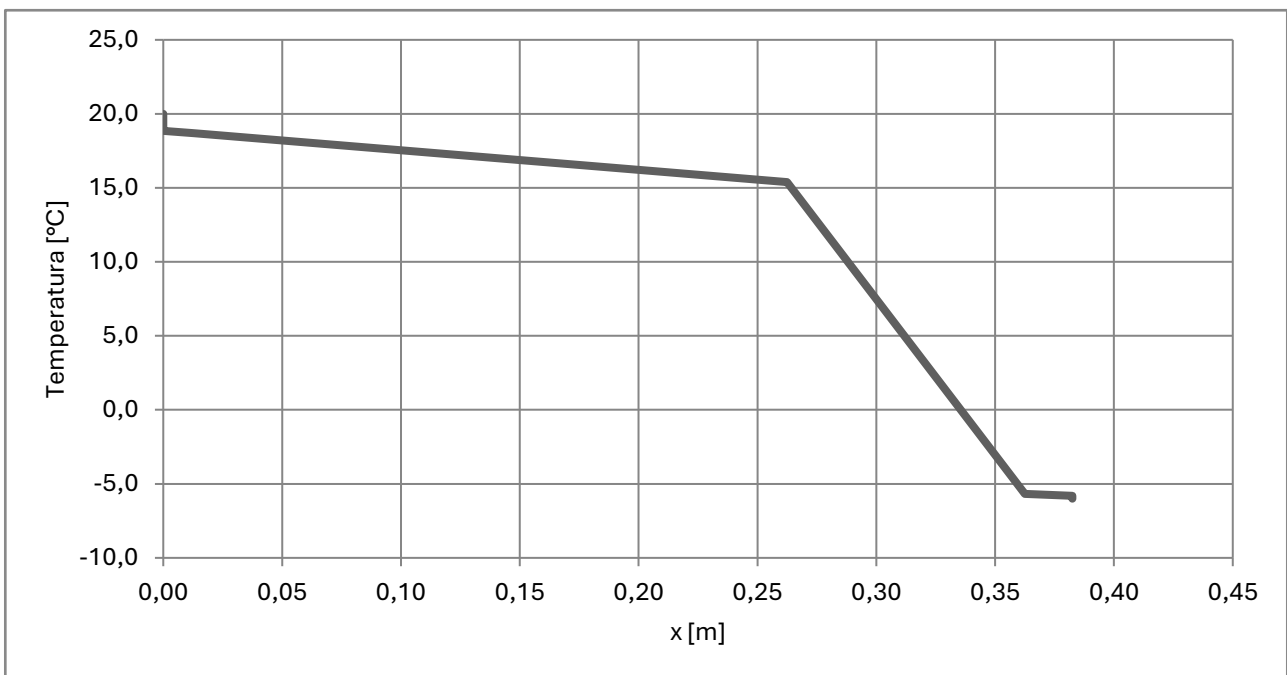
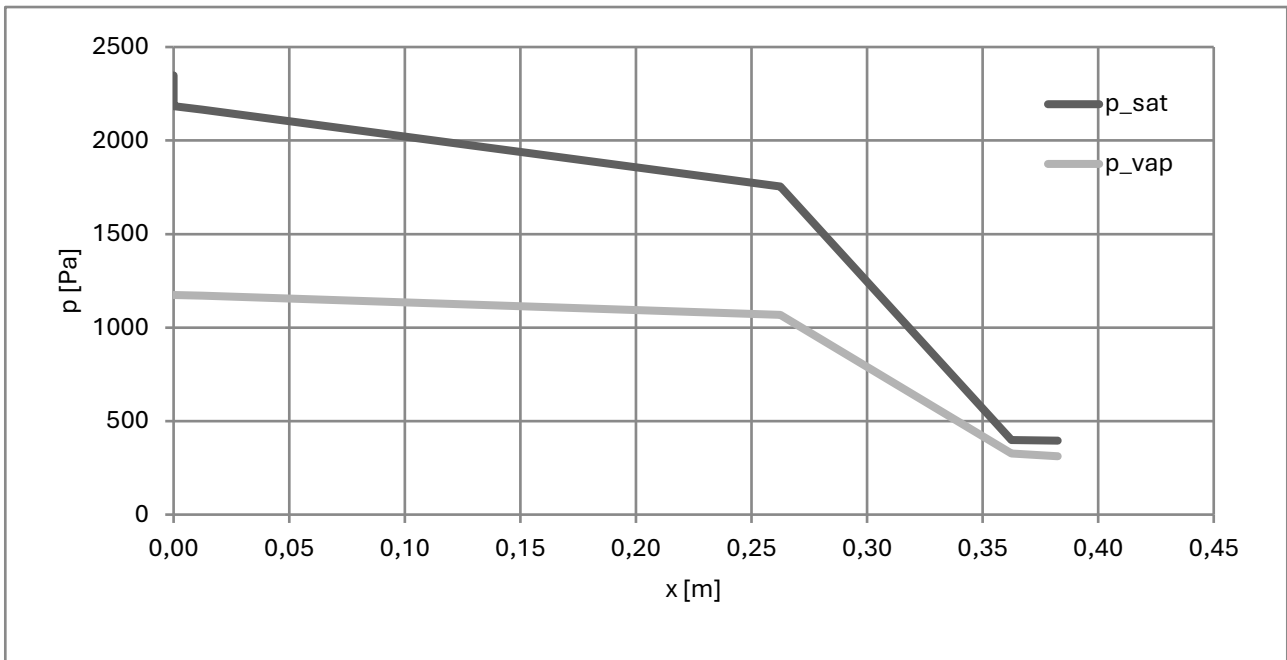
Questo esempio mostra come il dimensionamento reale differisca dalla semplificazione con impianto monotubo adottata ai fini della consegna, pur mantenendo coerenti i criteri di efficienza idraulica, con velocità dell'acqua leggermente diverse ma ancora entro valori accettabili per un corretto funzionamento dell'impianto.

## 4 – VERIFICA INTERSTIZIALE TRAMITE DIAGRAMMI DI GLASER

Per garantire l'assenza di fenomeni di condensazione interstiziale all'interno delle pareti perimetrali, è stata effettuata la verifica tramite i diagrammi di Glaser per due elementi costruttivi: la parete di tamponamento perimetrale e la copertura.

Questa metodologia consente di valutare la distribuzione della temperatura e della pressione di vapore lungo lo spessore degli elementi, evidenziando eventuali punti critici dove potrebbe verificarsi condensazione. Le stratigrafie dei componenti costruttivi, con i relativi dati descrittivi di ciascuno strato, sono riportate nel capitolo 2.2.1.

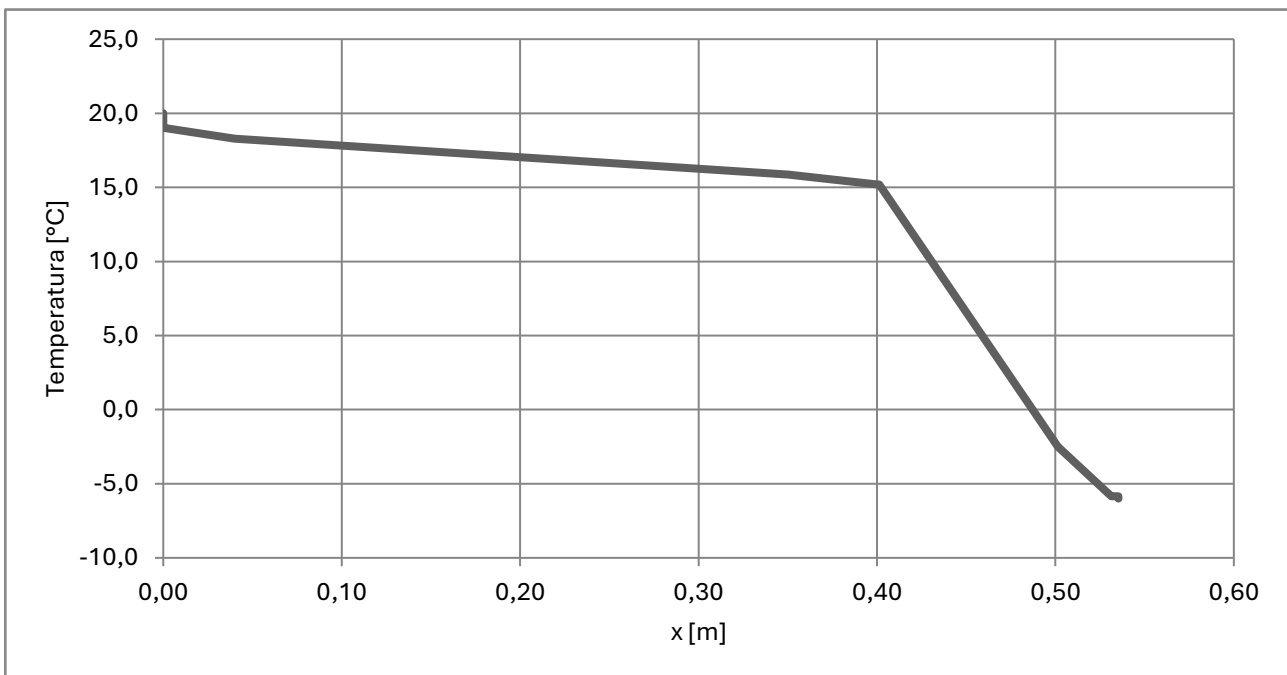
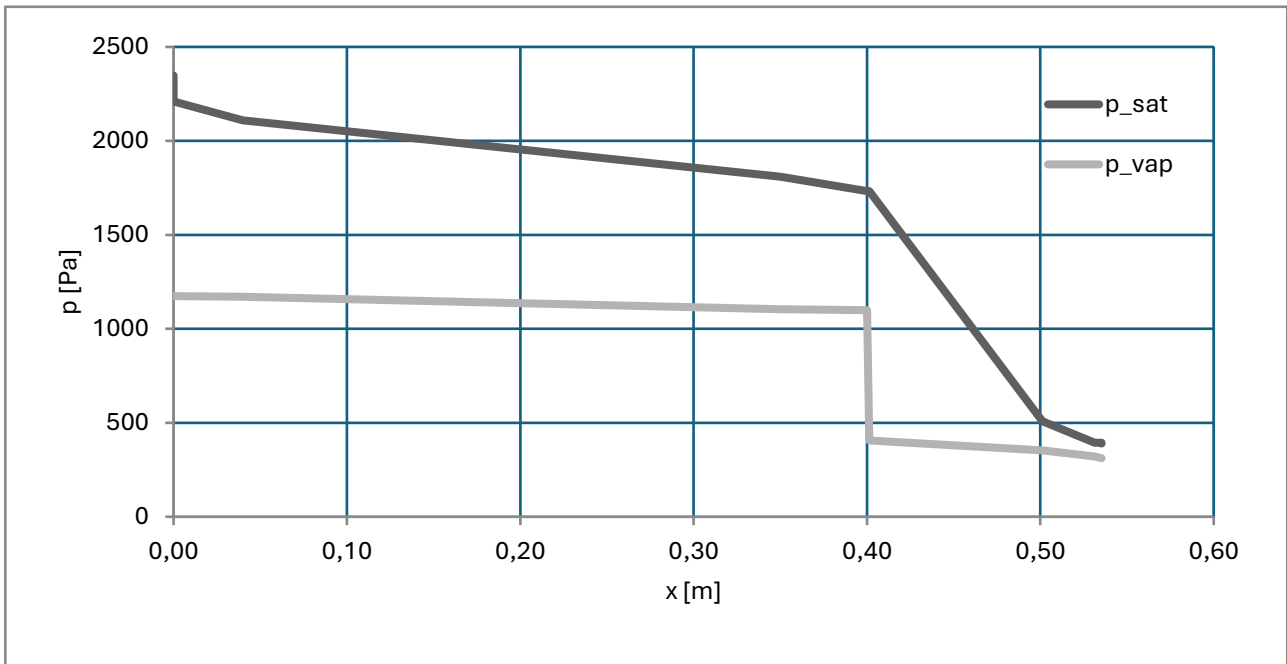
### Chiusura verticale di tamponamento:



Per la parete di tamponamento, la verifica mostra che la curva della pressione di vapore parziale  $p_{vap}$  non interseca quella di saturazione  $p_{sat}$  che sta sempre al di sopra, indicando che non si verificano fenomeni di condensazione interstiziale. Pertanto, non è stata prevista l'installazione di una barriera al vapore.

Dal grafico della temperatura si osserva inoltre che gran parte della parete mantiene valori relativamente elevati, mentre un rapido calo è visibile nella zona dell'isolante posto verso l'esterno.

## Copertura:



Per la copertura, la verifica tramite diagrammi di Glaser ha evidenziato che la pressione di vapore parziale si avvicinava in alcuni punti a quella di saturazione, indicando un potenziale rischio di condensazione interstiziale. Per questo motivo, **è stata prevista l'installazione di una barriera al vapore** sul lato interno, al fine di proteggere la stratigrafia e garantire un corretto comportamento termo-igrometrico.





## **Bibliografia**

Decreto Ministeriale 11-10-2017 “Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione”

Decreto Ministeriale 05/07/1975 “MODIFICAZIONI ALLE ISTRUZIONI MINISTERIALI 20 GIUGNO 1896 RELATIVAMENTE ALL'ALTEZZA MINIMA ED AI REQUISITI IGIENICO SANITARI PRINCIPALI DEI LOCALI D'ABITAZIONE”

Norma UNI EN ISO 6946:2018 “Componenti ed elementi per edilizia - resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo”

Norma UNI 10351 “Materiali e prodotti per edilizia, proprietà termo - igrometriche e procedura per la scelta dei valori di progetto”

Norma UNI EN ISO 14683:2018 “Ponti termici in edilizia – Coefficiente di trasmissione termica lineica – Metodi semplificati e valori di riferimento”

Norma UNI EN ISO 13786:2008 “Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo”

Norma UNI EN ISO 13370:2018 “Prestazione termica degli edifici- Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo”

Norma UNI 7357 “Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici” Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”

Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412 “Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia”

Quaderno Caleffi n.1 - Le reti di distribuzione

Quaderno Caleffi n.2 - I circuiti ed i terminali degli impianti di climatizzazione

Abaco dei ponti termici CENED

