

Capitolo 5

Progetto invernale

Laboratorio di Costruzione dell'Architettura
Controllo Ambientale degli Edifici

Docente: Riccardo Zamolo (rzamolo@units.it)



A.A. 2024/2025

Potenza termica dispersa

Secondo la norma UNI EN 12831 la **potenza termica** $\dot{Q}$ [W oppure kW] (d'ora in poi solo Q per semplicità di notazione) dispersa da un edificio, o **carico termico invernale**, si calcola come somma della **potenza dispersa per trasmissione** Q_{tr} (conduzione) attraverso tutte le superfici dell'involucro dell'edificio (pareti, finestre, pavimento, copertura, ecc.) e della **potenza dispersa per ventilazione** Q_{ve} dovuta a ricambi d'aria per via naturale o forzata (VMC):

$$Q = Q_{tr} + Q_{ve} \quad [\text{W oppure kW}]$$

mentre gli eventuali **carichi termici interni** (persone, apparecchiature, ecc.) e **solari** possono essere tipicamente trascurati per il progetto invernale.

Le condizioni di progetto per le quali calcolare il carico termico invernale, ossia **temperatura interna ed esterna**, sono definite dalle norme UNI 12831 e UNI 5364 in funzione della **destinazione d'uso degli ambienti** e dell'**ubicazione territoriale**.

Temperature di progetto e gradi giorno (GG)

La **temperatura interna** t_i di progetto dipende dalla **destinazione d'uso degli ambienti**, come già visto per le verifiche termoigrometriche. Per la maggior parte degli ambienti $t_i = 20\text{ °C}$:

Tipo di locale	Temperatura interna °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

La **temperatura esterna** t_e di progetto dipende dell'**ubicazione territoriale**:

Trento	-12	L'Aquila	-5
Bolzano	-15	Chieti	0
Venezia	-5	Pescara	2
Belluno	-10	Teramo	0
Padova	-5	Campobasso	-4
Rovigo	-5	Bari	0
Treviso	-5	Brindisi	0
Verona	-5	Foggia	0
Verona (zona lago)	-3	Lecce	0
Verona (zona montana)	-10	Taranto	0
Vicenza	-5	Potenza	-3
Vicenza (zona altopiani)	-10	Matera	-2
Trieste	-5	Raggio Calabria	3
Gorizia	-5	Catanzaro	-2
Pordenone	-5	Cosenza	-3
Udine	-5	Palermo	5
Bassa Carnia	-7	Agrigento	3
Alta Carnia	-10	Caltanissetta	0
Tarvisio	-15	Catania	5

alla quale applicare opportune **riduzioni per fattori ambientali**:

- effetto di **quota**: -1 °C ogni 100 m di aumento di quota
- effetto **esposizione al vento**: -0.5 °C per edifici in piccoli agglomerati; -1.5 °C per edifici isolati; ulteriori -1.5 °C nel caso di piani sporgenti più alti di quelli adiacenti

Potenza dispersa per trasmissione attraverso l'involucro

La **potenza dispersa per trasmissione** (conduzione) attraverso le pareti dell'involucro Q_{tr} è data da:

$$Q_{tr} = (H_{tr,ie} + H_{tr,iue} + H_{tr,ig} + H_{tr,ij}) \cdot (t_i - t_e)$$

dove i vari $H_{tr,...}$ sono i **coefficienti di trasmissione** $\left[\frac{W}{K} \text{ oppure } \frac{W}{^{\circ}C}\right]$:

- $H_{tr,ie}$: 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**

I coefficienti di trasmissione sono gli **inversi** delle rispettive **resistenze termiche** già viste:

$$Q = H \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{R} \quad [W \text{ oppure } kW]$$

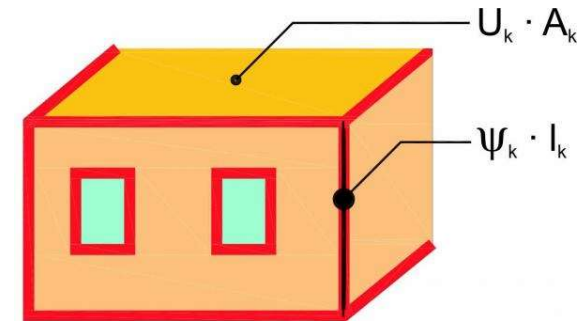
Nel caso della potenza dispersa attraverso una parete, il contributo al corrispondente **coefficiente di trasmissione** $H_{tr,ie}$ assume la forma già vista attraverso l'**area** A e la **trasmittanza** U della parete:

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta t \quad \Rightarrow \quad H = A \cdot U \quad \left[m^2 \frac{W}{m^2 K} = \frac{W}{K} \right]$$

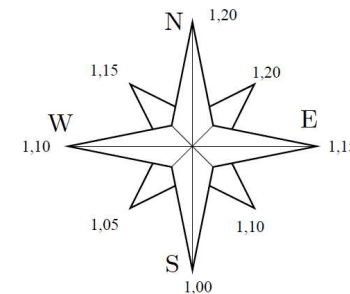
Dispersioni per trasmissione interno-esterno

Il coefficiente di trasmissione dall'interno all'esterno $H_{tr,ie}$ è dato dal contributo di **pareti e finestre** (contributo principale: area A × trasmittanza U) e da quello relativo ai **ponti termici**:

$$H_{tr,ie} = \sum_{\substack{\text{pareti} + \\ \text{finestre}}} A_k \cdot U_k \cdot e_k + \sum_{\substack{\text{ponti} \\ \text{termici}}} \psi_k \cdot l_k \cdot e_k$$



- A_k , U_k : area e trasmittanza della parete/finestra k
- ψ_k : coefficiente di dispersione, o trasmittanza lineica, del ponte termico k , [W/(m · K)]
- l_k : lunghezza del ponte termico k
- e_k : coefficienti di esposizione che dipendono dall'orientazione:



Dispersioni per trasmissione interno-esterno: pareti

Come già visto, la **trasmittanza** della parete U si calcola come l'**inverso della resistenza specifica**:

$$U_k = \frac{1}{R_k''} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

e la resistenza specifica totale si ottiene come **somma delle restenze specifiche degli N strati della parete**, comprese le resistenze superficiali (convettive) interne ed esterne $R_{s,int}''$ e $R_{s,est}''$:

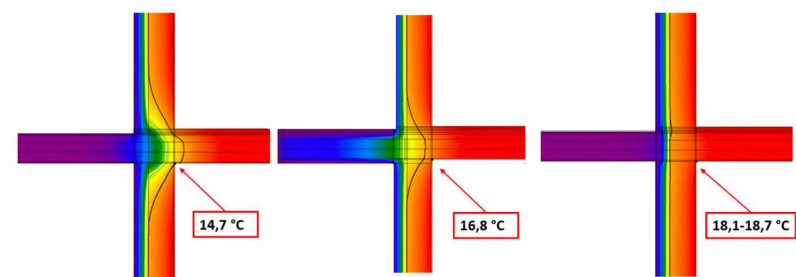
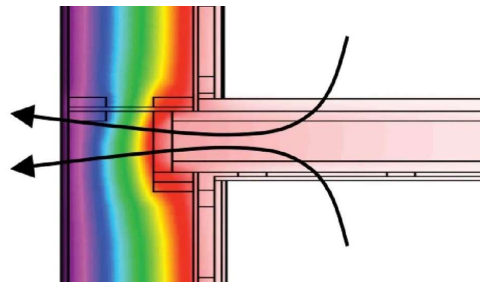
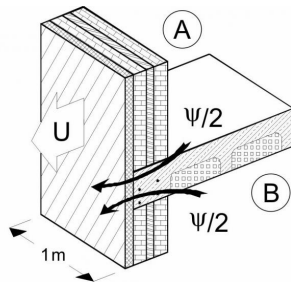
$$R_k'' = R_{s,int}'' + \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{\lambda_i} + R_{s,est}''$$

Per le resistenze superficiali secondo UNI EN ISO 6946 (consultare [abaco CENED](#) per degli esempi):

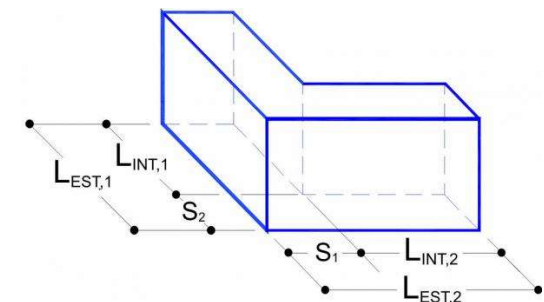
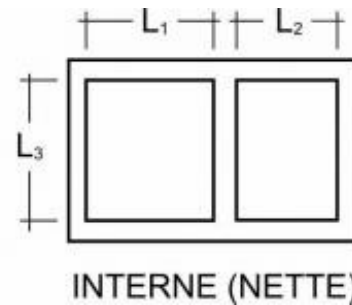
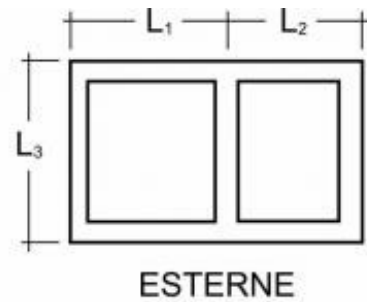
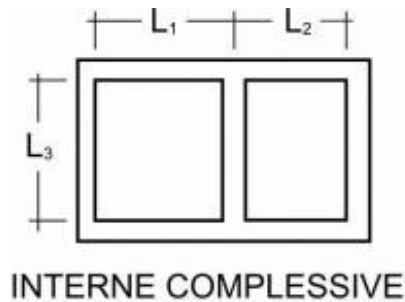
	Direzione flusso termico		
	ascendente	orizzontale	discendente
$R_{s,int}''$ [m ² K/W]	0.10	0.13	0.17
$R_{s,est}''$ [m ² K/W]	0.04	0.04	0.04

Dispersioni per trasmissione interno-esterno: ponti termici

Come già visto, i ponti termici si originano in presenza di **discontinuità nelle proprietà dei materiali** (conduttività) e/o **scostamenti di forma** rispetto al caso di parete monodimensionale che comportano dispersioni aggiuntive:



La determinazione dei coefficienti di dispersione (o trasmittanze lineiche) ψ_k [W/(m · K)] può essere fatta attraverso **software di simulazione numerica** oppure mediante opportuni atlanti/abachi. In ogni caso è importante la **coerenza nella scelta delle dimensioni di riferimento** per le aree A_k , dalla quale dipendono le trasmittanze lineiche ψ_k :



Dispersioni per trasmissione interno-esterno: ponti termici

Abaco dei ponti termici CENED ([link](#))

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.	
SEZIONE ORIZZONTALE	
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE	
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	$\psi_I = 0.047 + 0.092 \cdot U_{PAR} + 0.127 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$
Con: Trasmittanza della parete	$U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$

Abaco dei ponti termici Suisse Énergie (in francese) ([link](#))

Dalle continue		1.1-A1
Valeur U façade en W/(m² · K)	Mur	Valeur ψ en W/(m · K)
	Brique t.c.	Béton armé
0.15	0.69	0.84
0.20	0.75	0.92
0.25	0.78	0.97
0.30	0.80	1.01
0.35	0.81	1.04
0.40	0.81	1.05
Conditions standard		Majorations
Dalle 20 cm	Non	Dalle 18 cm - 0.05 W/(m · K)
Chauffage par le sol Non		Dalle 22 cm + 0.05 W/(m · K)
Isolation sous bord de dalle Non		Dalle 24 cm + 0.09 W/(m · K)
		Chauffage par le sol + 0.07 W/(m · K)
		Isolation sous bord de dalle (2 x 50 cm) - 0.06 W/(m · K)

Dimensioni di riferimento. L'abaco CENED fornisce direttamente i valori di trasmittanza lineica ψ sia per dimensioni esterne che interne. L'abaco Suisse Énergie fornisce invece un valore relativo ad un solo riferimento geometrico e l'eventuale conversione va fatta esplicitamente.

Esercizio 1: dispersioni con ponti termici

Calcolare la **potenza dispersa dalle sole superfici laterali** (ossia non tenendo conto degli scambi termici attraverso pavimento e copertura, e dei corrispondenti ponti termici) di un edificio «ideale» di pianta quadrata (lato esterno $E = 5$ m) ed alto $H = 3$ m. Le pareti sono costituite per semplicità da mattoni forati (spessore $L' = 20$ cm, conduttività $\lambda = 0.35$ W/(mK)) e da uno strato di isolante esterno (spessore $L_{iso} = 5$ cm, conduttività $\lambda = 0.04$ W/(mK)). Le temperature di progetto sono $t_i = 20$ °C e $t_e = -5$ °C.

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.	
SEZIONE ORIZZONTALE	
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE	
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	$\psi_I = 0.047 + 0.092 \cdot U_{PAR} + 0.127 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$
Con: Trasmittanza della parete	$U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$

Dispersioni per trasmissione interno-esterno: finestre

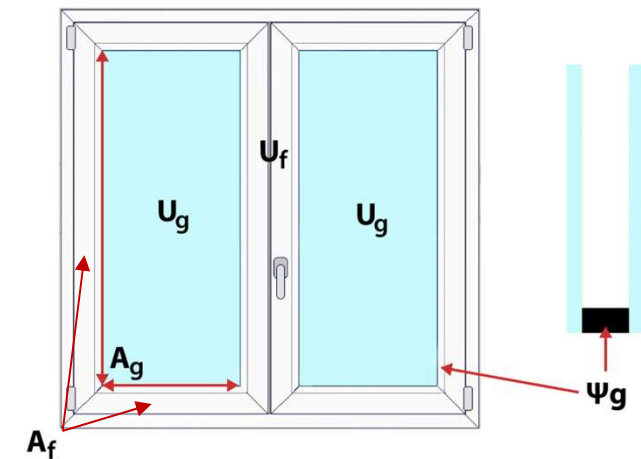
Le dispersioni attraverso gli **elementi finestrati** Q_w (window, w) si ottengono in maniera identica a quanto appena visto per l'intero edificio, ossia **sommando le dispersioni** attraverso **tutti gli elementi della finestra**: parte **vetrata** (glazing, g), **telaio** (frame, f) e **ponti termici** (ψ) tra di essi:

$$Q_w = Q_g + Q_f + Q_\psi \quad [\text{W oppure kW}]$$

$$A_w \cdot U_w \cdot \Delta t = (A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + \psi_g \cdot l_g) \cdot \Delta t$$

$$\Rightarrow U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + \psi_g \cdot l_g}{A_w} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

dove $A_w = A_g + A_f$ è la superficie totale della finestra, ψ_g è la trasmittanza lineica dei ponti termici della finestra e l_g è la lunghezza perimetrale della superficie vetrata.



Dispersioni per trasmissione interno-esterno: finestre

La **trasmittanza** della parte vetrata U_g si calcola, come già visto, è l'**inverso della resistenza specifica**:

$$U_g = \frac{1}{R_g''} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

e la resistenza specifica si ottiene come **somma delle restenze specifiche degli N strati della parte vetrata**, comprese le resistenze superficiali (convettive) interne ed esterne $R_{s,int}''$ e $R_{s,est}''$:

$$R_g'' = R_{s,int}'' + \sum_{i=1}^N R_i'' + R_{s,est}'' \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

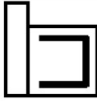
Per le resistenze delle eventuali **intercapedini d'aria**:

Thickness of air space mm	One side coated with a normal emissivity of:				Both sides uncoated
	0,1	0,2	0,4	0,8	
6	0,211	0,190	0,163	0,132	0,127
9	0,298	0,259	0,211	0,162	0,154
12	0,376	0,316	0,247	0,182	0,173
15	0,446	0,363	0,276	0,197	0,186
50	0,406	0,335	0,260	0,189	0,179
100	0,376	0,315	0,247	0,182	0,173
300	0,333	0,284	0,228	0,171	0,163

Dispersioni per trasmissione interno-esterno: finestre

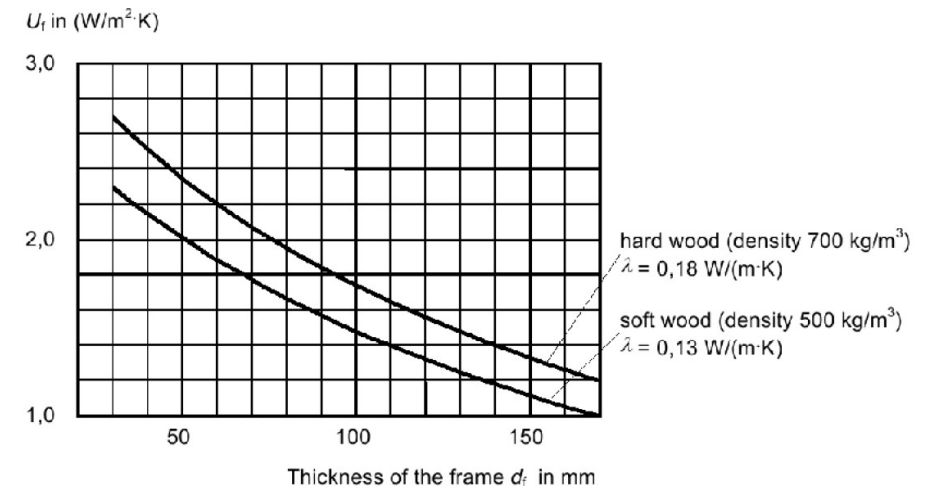
Per la **trasmissione** del telaio U_f :

Plastica

Frame material	Frame type	U_f W/(m ² ·K)
Polyurethane	with metal core thickness of PUR ≥ 5 mm	2,8
PVC-hollow profiles ¹⁾	external internal two hollow chambers 	2,2
	external internal three hollow chambers 	2,0

¹⁾ With a distance between wall surfaces of hollow chambers of at least 5 mm (refer to Figure D.1).

Legno



Per quanto riguarda le **trasmissioni lineiche** ψ_g dei ponti termici tra telaio e parte vetrata, si procede esattamente come per i ponti termici dell'involucro, tenendo comunque conto che non è richiesta grossa accuratezza in quanto il contributo complessivo di questi ponti termici è piuttosto limitato.

Dispersioni attraverso vani non riscaldati

Lo potenza dispersa verso **vani non riscaldati** $Q_{tr,iue}$ [W] si calcola in maniera **identica** al caso di scambio verso l'esterno, con l'unica differenza del salto di temperatura verso quella dell'ambiente non riscaldato t_u :

$$Q_{tr,iue} = H_{tr,iu} \cdot (t_i - t_u) \quad [\text{W oppure kW}]$$
$$H_{tr,iu} = \sum_{pareti} A_k \cdot U_k + \sum_{\substack{pont \\ termici}} \psi_k \cdot l_k \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$$

dove $H_{tr,iu}$ è il **coefficiente di trasmissione verso l'ambiente non riscaldato**, calcolato esattamente come nel caso verso l'esterno. Il vano non riscaldato disperderà a **sua volta verso l'esterno**, ed è quindi utile riportare la potenza dispersa $Q_{tr,iue}$ in termini di **salto termico verso l'esterno** $t_i - t_e$:

$$Q_{tr,iue} = H_{tr,iu} \cdot (t_i - t_u) = \underbrace{H_{tr,iu} \cdot \frac{t_i - t_u}{t_i - t_e}}_{H_{tr,iue}} \cdot (t_i - t_e) = H_{tr,iue} \cdot (t_i - t_e)$$

Il rapporto $b_u = \frac{t_i - t_u}{t_i - t_e}$ è detto **coefficiente di riduzione** e si può calcolare direttamente se è **nota la temperatura dell'ambiente non riscaldato** t_u .

Dispersioni attraverso vani non riscaldati

Se la temperatura dell'ambiente non riscaldato t_u **non è nota**, il **coefficiente di riduzione** b_u può essere stimato attraverso opportune tabelle:

Unheated space	b_u
Room	
with only 1 external wall	0,4
with at least 2 external walls without outer doors	0,5
with at least 2 external walls with outer doors (e.g. halls, garages)	0,6
with 3 external walls (e.g. external staircase)	0,8
Basement	
without windows/external doors	0,5
with windows/external doors	0,8
Roof space	
high ventilation rate of the roof space (e.g. roofs clad in tiles or other materials giving a discontinuous cover) without sarking felts or sarking boards	1,0
other non-insulated roof	0,9
insulated roof	0,7
Internal circulation areas (without external walls, air exchange rate less than 0.5 h^{-1})	0
Freely ventilated circulation areas (area of openings/volume of space $> 0.005 \text{ m}^2/\text{m}^3$)	1,0
Suspended floor (floor above crawl space)	0,8

Dispersioni attraverso vani non riscaldati

In alternativa, il **coefficiente di dispersione attraverso ambienti non riscaldati** $H_{tr,iue}$ si può determinare sulla base della **resistenza termica/coefficiente di trasmissione** dall'ambiente non riscaldato verso l'esterno.

Si hanno infatti **due resistenze termiche in serie** (come accadeva in una parete multistrato), che sono gli **inversi dei rispettivi coefficienti di trasmissione**:

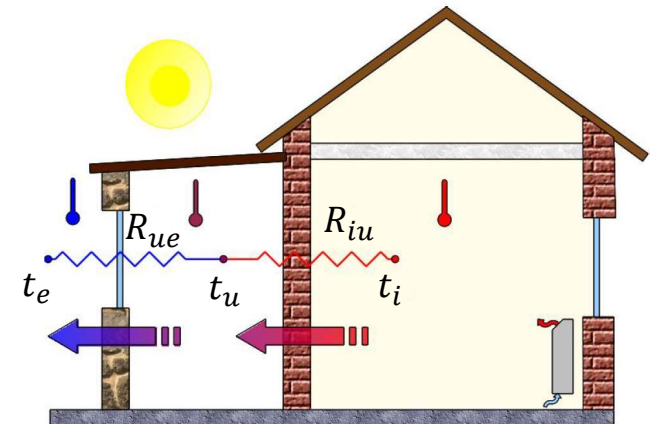
$$R_{iue} = R_{iu} + R_{ue} = \frac{1}{H_{tr,iu}} + \frac{1}{H_{tr,ue}}$$

Per ottenere $H_{tr,iue}$ prendiamo quindi l'inverso di R_{iue} :

$$H_{tr,iue} = \frac{1}{R_{iue}} = \frac{H_{tr,iu} \cdot H_{tr,ue}}{H_{tr,iu} + H_{tr,ue}}$$

Conoscendo il coefficiente di trasmissione dall'ambiente non riscaldato verso l'esterno è possibile esprimere b_u :

$$b_u = \frac{H_{tr,iue}}{H_{tr,iu}} = \frac{H_{tr,ue}}{H_{tr,iu} + H_{tr,ue}}$$



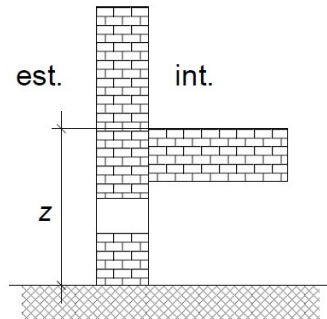
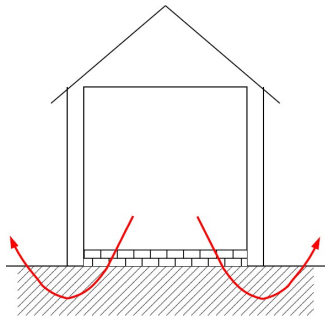
Dispersioni attraverso il terreno/pavimento

Per il calcolo delle dispersioni attraverso il pavimento/terreno, il corrispondente **coefficiente di trasmissione** $H_{tr,ig}$ è definito in funzione di **un'unica trasmittanza equivalente** U_{eq} che fa riferimento alla **superficie A** del **pavimento**:

$$H_{tr,ig} = A \cdot U_{eq}$$

Per il calcolo della trasmittanza equivalente U_{eq} si distingueranno diversi casi:

- pavimento appoggiato su terreno
- pavimento su spazio aerato
- pavimento/pareti di vano interrato



Dispersioni attraverso pavimento appoggiato

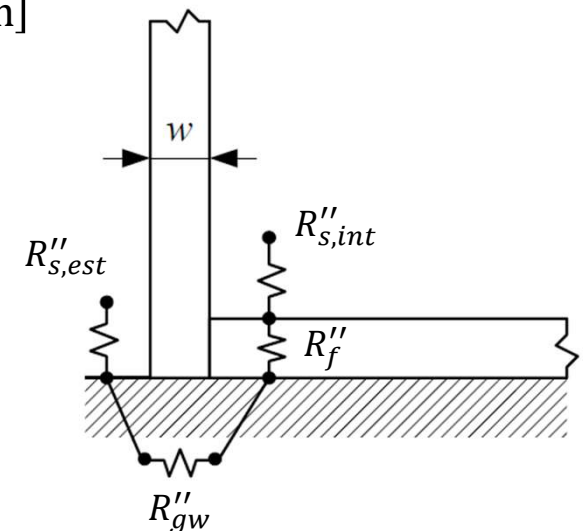
Per il calcolo delle **dispersioni attraverso un pavimento appoggiato su terreno**, si introduce uno **spessore di terreno equivalente** d_t . Ricordando che la resistenza specifica conduttiva $R'' = \text{spessore}/\text{conduttività}$ e che le **resistenze in serie si sommano**, lo spessore di terreno equivalente d_t si calcola:

$$R''_{s,int} + R''_f + R''_{gw} + R''_{s,est} = \frac{d_t}{\lambda_g}$$

$$\Rightarrow d_t = w + \lambda_g \cdot (R''_{s,int} + R''_f + R''_{s,est}) \quad [\text{m}]$$

- w = spessore parete
- λ_g = conduttività termica del terreno (ground, g), tipicamente 3 W/(mK)
- R''_f = resistenza conduttiva specifica del pavimento (floor, f)
- $R''_{s,int}$ e $R''_{s,est}$ = resistenze convettive specifiche interna ed esterna
- $R''_{gw} = w/\lambda_g$ resistenza conduttiva specifica della porzione di terreno di spessore w (spessore della parete)

Pavimenti con «grande» spessore equivalente di terreno d_t sono «ben» isolati.



Dispersioni attraverso pavimento appoggiato

Il **grado di isolamento** di un pavimento appoggiato può essere valutato confrontando lo **spessore di terreno equivalente** d_t con la **dimensione caratteristica del pavimento** B' :

$$B' = \frac{2A}{P} \quad [\text{m}]$$

dove P è il **perimetro del pavimento**. Per esempio, $B' = L/2$ per un pavimento quadrato di lato L .

La **trasmittanza equivalente** $U_{eq} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ del pavimento va calcolata a seconda del grado di isolamento:

Pavimenti **poco o non isolati** ($d_t < B'$):

$$U_{eq} = U_0 = \frac{2\lambda_g}{3B' + d_t} \log \left(\frac{3B' + d_t}{d_t} \right)$$

Pavimenti **ben isolati** ($d_t > B'$):

$$U_{eq} = U_0 = \frac{\lambda_g}{0.45B' + d_t}$$

Dispersioni attraverso pavimento appoggiato, isolamento aggiunt.

Se l'isolamento del pavimento dovesse risultare insufficiente e/o in caso di località molto fredde, è possibile prevedere **isolamenti perimetrali aggiuntivi orizzontali o verticali**. In tal caso la trasmittanza equivalente senza isolamento del pavimento U_0 viene ridotta:

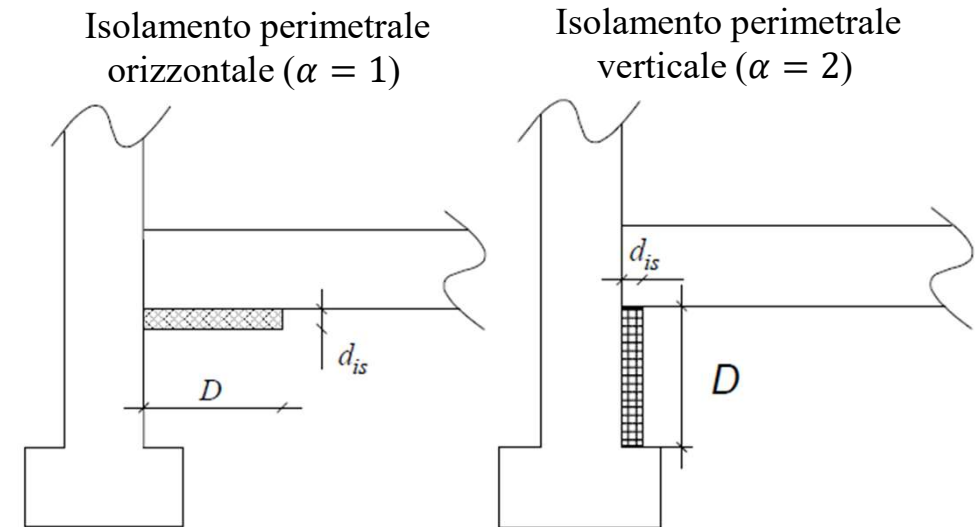
$$U_{eq} = U_0 - \frac{\Delta\psi}{B'}$$

dove $\Delta\psi \left[\frac{W}{mK} \right]$ è dato da:

$$\Delta\psi = 0.64\lambda_g \cdot \left[\log \left(\frac{\alpha D}{d_t} + 1 \right) - \log \left(\frac{\alpha D}{d_t + R''\lambda_g} + 1 \right) \right]$$

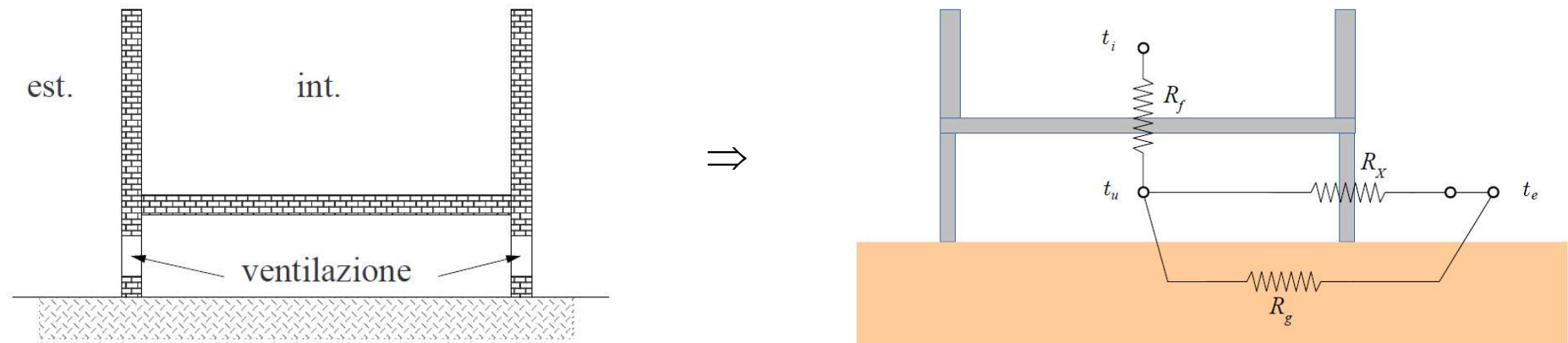
con $R'' = d_{is} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{is}} - \frac{1}{\lambda_g} \right) \left[\frac{m^2K}{W} \right]$

e λ_{is} **conduttività termica dell'isolante**.



Dispersioni attraverso pavimento su spazio aerato

Se l'isolamento del pavimento dovesse risultare insufficiente e/o in caso di località molto fredde, è possibile prevedere **isolamenti perimetrali aggiuntivi orizzontali o verticali**. In tal caso la trasmittanza equivalente senza isolamento del pavimento U_0 viene ridotta:



La resistenza totale R_{eq} tra interno (t_i) ed esterno (t_e) si ottiene considerando che R_f è in **serie** ad un'altra resistenza che è il **parallelo** di R_x e R_g :

$$R_{eq} = R_f + \frac{1}{\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_g}}$$

Dispersioni attraverso pavimento su spazio aerato

Ragionando in termini di **trasmittanze** ($R = \frac{1}{A \cdot U}$), come fatto finora, riferite **tutte alla stessa area A del pavimento**, si ottiene:

$$R_{eq} = R_f + \frac{1}{\frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_g}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{U_{eq}} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_X + U_g}$$

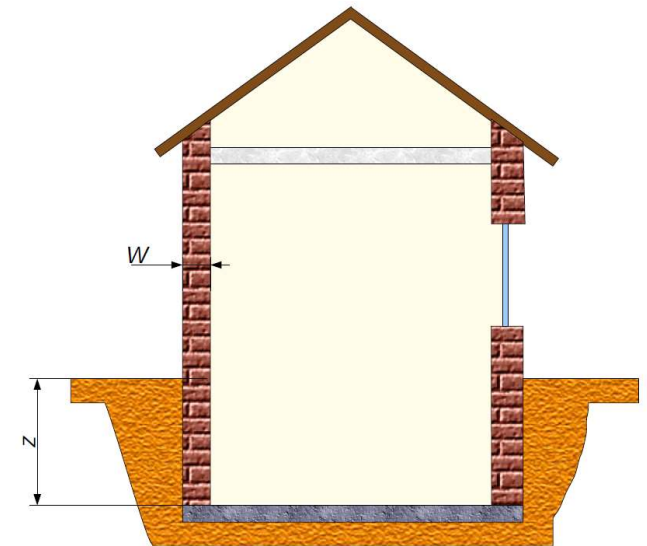
- U_f = trasmittanza della **parte sospesa di pavimento**: si calcola come parete multistrato
- U_g = trasmittanza **attraverso il terreno**: si calcola come U_0 per pavimento appoggiato al terreno
- U_X = trasmittanza per **conduzione attraverso le pareti verticali dello spazio aerato** e per **convezione dovuta all'aerazione**. In questo calcolo bisogna ricordare che l'area di riferimento utilizzata è sempre quella del pavimento A e non quella delle pareti verticali dello spazio aerato.

Dispersioni attraverso pavimento/pareti di vano interrato

Nel caso di **vano interrato** (basement, *b*) le dispersioni attraverso il terreno si comporranno sia di una parte **attraverso la porzione interrata delle pareti verticali** (profondità *z* del pavimento rispetto al livello del terreno), sia di una parte **attraverso il pavimento**. Essendoci due contributi riferiti ad aree diverse, è più agevole ragionare in termini di **coefficiente di trasmissione** $H_{tr,ig}$ come per le altre superfici dell'involucro:

$$H_{tr,ig} = A \cdot U_{bf} + A_z \cdot U_{bw} \quad \left[\frac{W}{K} \right]$$

- 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 delle porzione interrata delle pareti verticali**



Dispersioni attraverso pavimento/pareti di vano interrato

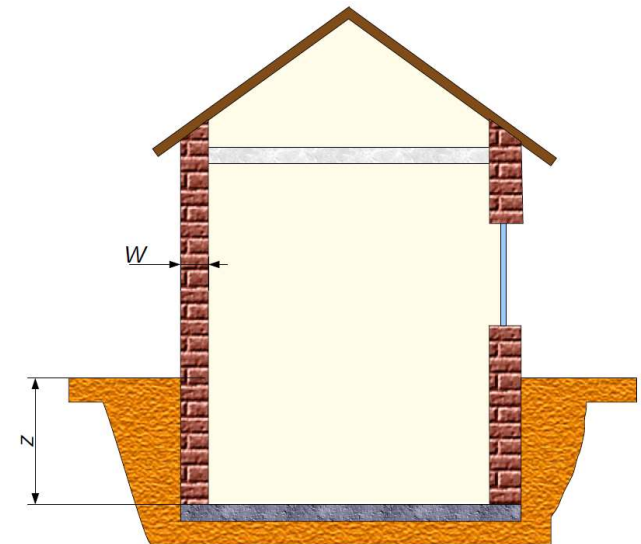
Per il calcolo della **trasmissione** U_{bw} **delle porzione interrata delle pareti verticali**, si considera nuovamente uno **spessore equivalente di terreno**, questa volta relativo però alle pareti verticali (e non più al pavimento):

$$d_w = \lambda_g \cdot (R''_{s,int} + R''_w + R''_{s,est}) \quad [\text{m}]$$

dove R''_w è la resistenza conduttiva specifica delle **pareti verticali del vano interrato**.

La trasmissione $U_{bw} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ è quindi data da:

$$U_{bw} = 0.64 \frac{\lambda_g}{z} \cdot \left(1 + \frac{d_t/2}{d_t + z} \right) \cdot \log \left(\frac{z}{d_w} + 1 \right)$$



Dispersioni per ventilazione

La **potenza dispersa per ventilazione** Q_{ve} [W oppure kW], in assenza di recuperatori di calore, dal primo principio per sistemi aperti (aria trattata come gas ideale con calore specifico costante) vale:

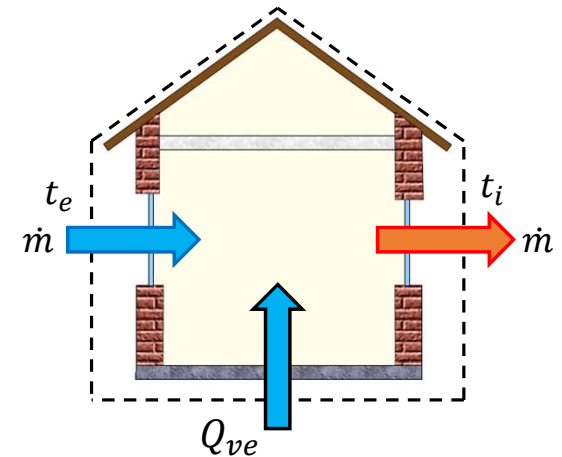
$$Q_{ve} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_i - t_e)$$

con $c_p = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$. In termini di **coefficiente di ventilazione** H_{ve} :

$$Q_{ve} = H_{ve} \cdot (t_i - t_e)$$

ossia $H_{ve} = \dot{m} \cdot c_p = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$ dove $\rho = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ è la densità dell'aria alle tipiche temperature interne di progetto ($t_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Senza sistemi di ventilazione, la **portata volumetrica d'aria di ventilazione** $\dot{V} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ da considerare è la massima tra la **portata minima per ragioni igieniche** $\dot{V}_{min}$ e quella di **infiltrazione** $\dot{V}_{inf}$ attraverso infissi e altre aperture.



Dispersioni per ventilazione: portate volumetriche

La **portata d'aria minima** $\dot{V}_{min}$ necessaria ad assicurare un sufficiente grado di ricambio d'aria per motivi di igiene/benessere è determinata dai **ricambi d'aria orari** n_{min} (attenzione alle unità di misura del tempo):

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

dove n_{min} varia tra $0.5 \frac{\text{ricambi}}{\text{ora}}$ per locali di abitazioni a $2.0 \frac{\text{ricambi}}{\text{ora}}$ per aule scolastiche e $V [\text{m}^3]$ il volume interno dell'ambiente.

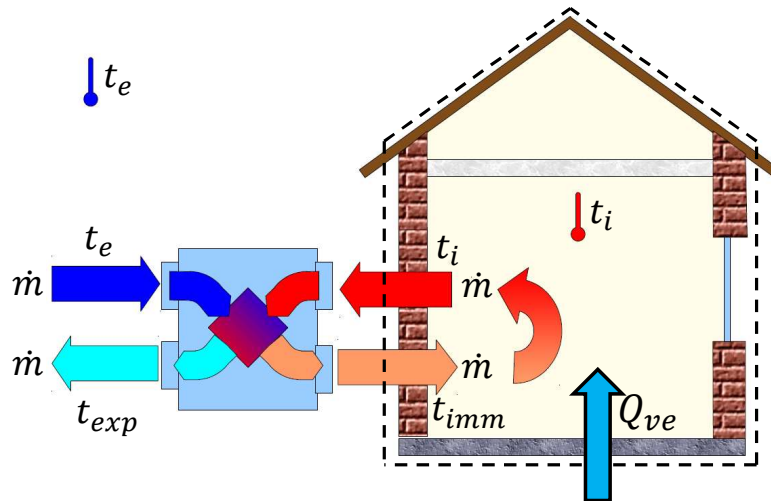
La **portata d'aria d'infiltrazione** $\dot{V}_{inf}$ è determinata in funzione delle **caratteristiche di tenuta e schermatura dell'involucro** (attenzione alle unità di misura del tempo):

$$\dot{V}_{inf} = (2 \cdot n_{50} \cdot e_i) \cdot V$$

dove n_{50} è il **numero di ricambi orari con salto di pressione 50 Pa** tra interno ed esterno e può variare tra $2 \frac{\text{ricambi}}{\text{ora}}$ per edifici ad alto grado di tenuta e $6 \frac{\text{ricambi}}{\text{ora}}$ per edifici a basso grado di tenuta. e_i è un **coefficiente di schermatura** che può variare tra 0.01 per edifici con una apertura a pesante schermatura e 0.05 per edifici con più aperture e nessuna schermatura.

Dispersioni per ventilazione: recuperatori di calore

La **potenza dispersa per ventilazione** Q_{ve} , nel caso di **ventilazione forzata**, può essere notevolment ridotta mediante **recuperatori di calore** che recuperano una parte dell'energia termica dell'aria calda che viene estratta dagli ambienti e che altrimenti verrebbe dispersa completamente all'esterno:

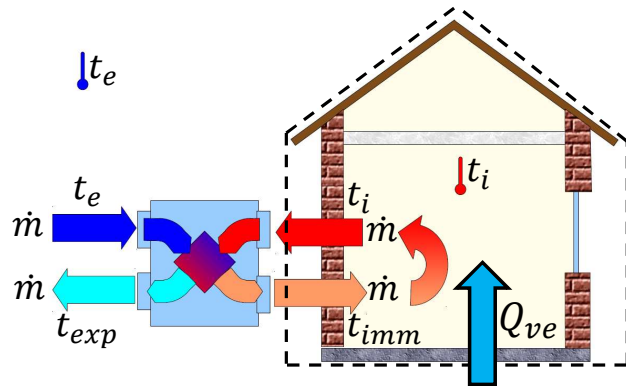


Applicando il primo principio per sistemi aperti:

$$Q_{ve} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_i - t_{imm})$$

dove t_{imm} è significativamente maggiore di t_e poiché la **corrente fredda** viene **riscaldata da quella calda uscente**.

Dispersioni per ventilazione: recuperatori di calore



I recuperatori sono caratterizzati dall'**efficienza** η , definita come il rapporto tra **potenza termica scambiata** e quella **massima scambiabile**:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{imm} - t_e)}{\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_i - t_e)} = \frac{t_{imm} - t_e}{t_i - t_e} \quad [-]$$

Più la **temperatura dell'aria immessa** t_{imm} si **avvicina** a quella dell'**aria interna** t_i , maggiore sarà l'efficienza η .

Scriviamo il salto $t_i - t_{imm}$, necessario a calcolare la potenza dispersa Q_{ve} , in funzione dell'efficienza:

$$t_i - t_{imm} = t_i - t_e + t_e - t_{imm} = (t_i - t_e) \cdot (1 - \eta)$$

La potenza dispersa sarà quindi:

$$Q_{ve} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_i - t_{imm}) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (1 - \eta) \cdot (t_i - t_e)$$

che è **ridotta di un fattore** $(1 - \eta)$ rispetto al **caso senza recuperatore**, dove si aveva $Q_{ve} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_i - t_e)$. I recuperatori hanno tipicamente **efficienze molto elevate** ($\eta=0.7-0.9$) e permettono quindi **riduzioni di dispersioni per ventilazione** che vanno **dal 70% al 90%**. In termini di coefficiente di ventilazione si avrà:

$$H_{ve} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (1 - \eta) = \dot{m}_{eq} \cdot c_p \quad \text{dove} \quad \dot{m}_{eq} = \dot{m} \cdot (1 - \eta) \text{ è una } \textbf{portata d'aria equivalente} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$