

<b>REL. TERMICA SOLAI</b>	<b><i>FASCICOLO TECNICO PER IL CALCOLO DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DI SOLAI A LASTRE TRALICCIATE ("PREDALLES") IN ACCORDO ALLA NORMA UNI EN ISO 6946:2008</i></b>
-----------------------------------	---

01	07.01.2010				
<b>Rev.</b>	<b>Data</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Redatto</b>	<b>Verificato da:</b>	<b>Approvato da:</b>

## INDICE

1	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE .....	4
2	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	4
3	DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI SOLAI.....	5
	3.1 Caratteristiche dei solai.....	5
4	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....	6
	4.1 Calcestruzzo .....	6
	4.2 Polistirene.....	6
5	CALCOLO DELLA RESISTENZA TERMICA .....	7
	5.1 Metodologia adottata.....	7
	5.2 Procedura di calcolo semplificata .....	7
	Individuazione dei materiali e della relativa conduttività termica di calcolo .....	7
	Individuazione delle resistenze termiche superficiali .....	7
	Suddivisione del solai in strati .....	7
	Calcolo della resistenza termica dei solai .....	7
	Calcolo della trasmittanza termica del solaio.....	8
	5.3 Metodo “misto” UNI EN ISO 6946 + UNI EN ISO 10211 .....	8
	Correzione della trasmittanza termica per la presenza di vuoti d’aria/inserti metallici .....	10
6	ESEMPIO DI CALCOLO PASSO A PASSO DI UN SOLAIO .....	11
	6.1 Geometria del solaio .....	11
	6.2 Caratteristiche termiche materiali .....	11
	6.3 Resistenze termiche superficiali .....	11
	6.4 Calcolo delle aree .....	12
	6.5 Individuazione di “strati” e “sezioni” .....	12
	6.6 Calcolo del limite superiore della resistenza termica .....	12
	6.7 Calcolo del limite inferiore della resistenza termica.....	12
	6.8 Calcolo della resistenza termica totale .....	13
	6.9 Rapporto tra $R'_T$ e $R''_T$ .....	13
	6.10 Calcolo dell’errore .....	13
	6.11 Calcolo della trasmittanza .....	13
	6.12 Metodo “misto” .....	13
	Calcolo della trasmittanza lineica $\psi_1$ (ponte termico nervatura longitudinale di bordo).....	14

<b>CO.PRE srl</b> <b>SOLAI PREFABBRICATI</b>	<b>FASCICOLO TECNICO PRESTAZIONI ENERGETICHE SOLAI</b>	<b>Rel. Termica solai</b>
		Pagina 3 di 17

	Calcolo della trasmittanza lineica $\psi_2$ (ponte termico nervatura centrale trasversale).....	14
	Calcolo della trasmittanza lineica $\psi_3$ (ponte termico nervatura centrale longitudinale) .....	15
	Calcolo della trasmittanza lineica $\psi_4$ (ponte termico nervatura trasversale di testa).....	15
	6.13 Calcolo della trasmittanza e della resistenza corrette .....	16
7	<b>RIEPILOGO RISULTATI</b> .....	16

<b>CO.PRE srl</b> <b>SOLAI PREFABBRICATI</b>	<b>FASCICOLO TECNICO PRESTAZIONI ENERGETICHE SOLAI</b>	<b>Rel. Termica solai</b>
		Pagina 4 di 17

## 1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Scopo della presente relazione è fornire indicazioni circa le caratteristiche energetiche di solai realizzati con lastre prefabbricate tralicciate in c.a., comunemente definiti "a predalles". Il presente fascicolo, predisposto su incarico di CO.PRE s.n.c., fornisce gli elementi necessari alla definizione della trasmittanza e della resistenza termica dei solai suddetti considerati "al rustico", ovvero tralasciando il contributo di eventuali strati di completamento/finitura, il cui apporto ai fini del contenimento energetico è demandato al Progettista Generale delle opere in cui i solai dell'Azienda vengono inseriti. Pertanto i valori di seguito definiti sono applicabili alla sola parte strutturale dei solai, per quanto il metodo di calcolo descritto ed utilizzato possa essere impiegato anche per la valutazione dei solai finiti.

Tutti i manufatti prefabbricati richiamati nella presente relazione e realizzati presso l'impianto di via Grigna n.7 a Figino Serenza, 22060 (CO) sono dotati di Marcatura CE ai sensi del DPR 246/93 ed in conformità alla norma armonizzata UNI EN 13747. La certificazione del sistema *FPC (Factory Production Control)* rilasciata dall'Ente Notificato secondo il sistema di attestazione 2+ certifica che il Sistema di Controllo della Produzione implementato ed attuato da CO.PRE s.n.c. è coerente e conforme alle norme di riferimento.

## 2 RIFERIMENTI NORMATIVI

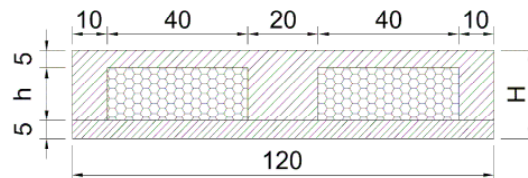
- Decreto Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato del 2 Aprile 1998 – *Modalità di certificazione delle caratteristiche e delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti ad essi connessi*;
- Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia;
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n. 192 – *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*;
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2006 n. 311 – *Disposizioni correttive ed integrative al Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia*;
- UNI 10351:1994 - *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*;
- UNI 10355:1994 - *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo*;
- UNI EN ISO 7345:1999 - *Isolamento termico - Grandezze fisiche e Definizioni*;
- UNI EN ISO 6946:2008 - *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*;
- UNI EN ISO 10456:2008 - *Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto*;
- UNI EN ISO 10211:2008 - *Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati*.

### 3 DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI SOLAI

#### 3.1 Caratteristiche dei solai

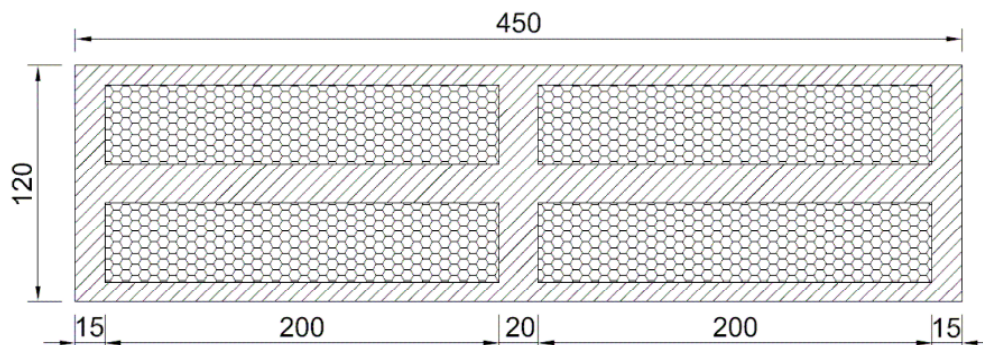
Gli elementi strutturali orizzontali, costituiti da una lastra tralicciata in c.a. alleggerita e completata in opera con un getto di calcestruzzo integrativo (di seguito definiti semplicemente "solai") considerati nella presente relazione rientrano nelle tipologie normalmente prodotte dall'Azienda.

In particolare, con riferimento all'immagine di seguito riportata, sono stati considerati:



<b>Tipologia del solaio</b>	<b>Altezza del solaio</b>	<b>Altezza lastra prefabbricata in c.a.</b>	<b>Altezza elemento di alleggerimento</b>	<b>Altezza getto di completamento</b>
-	cm	cm	cm	cm
5/8/5	H 18	5	8	5
5/10/5	H 20	5	10	5
5/12/5	H 22	5	12	5
5/14/5	H 24	5	14	5
5/15/5	H 25	5	15	5
5/16/5	H 26	5	16	5
5/18/5	H 28	5	18	5
5/20/5	H 30	5	20	5
5/22/5	H 32	5	22	5
5/24/5	H 34	5	24	5
5/26/5	H 36	5	26	5
5/28/5	H 38	5	28	5
5/30/5	H 40	5	30	5
5/40/5	H 50	5	40	5
5/50/5	H 60	5	50	5

Essendo le caratteristiche dimensionali dei solai molto variabili, al fine di determinare le caratteristiche termiche delle diverse tipologie prodotte, sono stati considerati dei solai tipo aventi le seguenti dimensioni geometriche:



A partire dalle dimensioni sopra indicate, vengono comunque definiti valori di resistenza e trasmittanza termica per metro quadro di superficie dei solai, utilizzabili nella maggior parte delle applicazioni in cui i solai sono impiegati. Casi particolari (come, da es., solai caratterizzati da ampie zone prive di alleggerimento), esulano dallo scopo della presente relazione e dovranno essere trattati *ad hoc*.

#### 4 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Per la definizione delle caratteristiche termiche dei materiali ci si è avvalsi delle indicazioni della norma UNI 10351:1994; qualora tale norma non riportasse dati necessari all'elaborazione del calcolo (in particolar modo per la definizione del calore specifico dei materiali), si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 10456:2008. Si ricorda che, in accordo alla norma UNI 10351, alla conduttività indicativa di riferimento  $\lambda_m$  viene normalmente applicata una maggiorazione percentuale  $m$  che tiene conto, nelle condizioni medie di esercizio, del contenuto percentuale di umidità e delle tolleranze sullo spessore degli elementi.

##### 4.1 Calcestruzzo

Per quanto concerne le caratteristiche termiche del calcestruzzo utilizzate nella valutazione dei solai oggetto della presente relazione, si adottano i valori prescritti dalle norme di riferimento a livello italiano (UNI 10351:1994).

UNI 10351		Densità	Conduttività	Maggiorazione	Conduttività di calcolo
		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_m$ [W/(m·K)]	%	$\lambda$ [W/(m·K)]
Calcestruzzo	Lastra e getto integrativo	2400	1.66	15	1.909

##### 4.2 Polistirene

Per gli elementi di alleggerimento si è fatto riferimento a blocchi in PSE (polistirene) di densità 10 kg/m<sup>3</sup>, aventi caratteristiche termiche non certificate. L'Azienda ha comunque la possibilità, su richiesta, di utilizzare nella produzione elementi in polistirene con caratteristiche termiche certificate, nel caso il Progettista Generale ritenga più opportuno l'impiego di tale materiale per aumentare il valore di resistenza termica del solaio. Nel calcolo seguente, in via cautelativa, è stato considerato:

	Densità	Conduttività	Maggiorazione	Conduttività di calcolo
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_m$ [W/(m·K)]	%	$\lambda$ [W/(m·K)]
PSE (alleggerimento)	10	0.040	10	0.045

## 5 CALCOLO DELLA RESISTENZA TERMICA

### 5.1 Metodologia adottata

Il calcolo della resistenza termica per tutte le tipologie di solai prima definiti viene effettuato in accordo al metodo di calcolo semplificato definito nella norma UNI EN ISO 6946:2008.

Nei casi in cui il metodo semplificato non possa essere applicato, ovvero qualora l'errore percentuale di calcolo, per come definito al punto 6.2.1 della norma UNI EN ISO 6946:2008, superi il 20% (rapporto  $R_{sup}/R_{inf} > 1,5$ ) viene adottato un metodo "misto", che permette di correggere i risultati del metodo semplificato con i contributi di ponti termici lineari. Tali ponti termici vengono definiti per i vari solai e calcolati attraverso modelli agli elementi finiti (metodo FEM), di cui alla norma UNI EN ISO 10211.

Allo scopo è stato utilizzato un codice di calcolo specializzato (Strauss7<sup>®</sup> – Rel. 2.3.3), già validato in origine dal produttore del software e la cui affidabilità è stata verificata dall'autore della presente, che ha elaborato ed analizzato i modelli di calcolo (*benchmark*) proposti dalla norma UNI EN ISO 10211 per la validazione interna, ottenendo risultati positivi.

Nel seguito vengono brevemente illustrati gli elementi essenziali del calcolo implementato, con le relative osservazioni finali, tralasciando l'illustrazione dei principi di funzionamento del codice FEM, che vanno ben oltre gli scopi del presente Fascicolo Tecnico.

### 5.2 Procedura di calcolo semplificata

Il metodo di calcolo semplificato previsto dalla norma UNI EN 6946 viene brevemente riassunto di seguito.

#### *Individuazione dei materiali e della relativa conduttività termica di calcolo*

Per quanto concerne le caratteristiche termiche dei materiali si rimanda a quanto definito in precedenza.

#### *Individuazione delle resistenze termiche superficiali*

In accordo alla norma UNI EN ISO 6946, si adottano le seguenti resistenze termiche superficiali:

Resistenza termica superficiale [m <sup>2</sup> K/W]	Direzione del flusso termico	
	Ascendente	Discendente
R <sub>si</sub>	0.10	0.17
R <sub>se</sub>	0.04	0.04

Trattandosi di solai, non viene considerato il caso di flusso orizzontale.

#### *Suddivisione del solaio in strati*

Per procedere con il calcolo, il solaio viene suddiviso negli strati j-esimi ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), omogenei o meno, che lo compongono; con "strato" si intende ogni porzione di materiale compresa tra due superfici piane parallele, perpendicolari al flusso termico. Nel caso dei solai in oggetto si considerano omogenei gli strati costituiti dalla lastra e dalla cappa in calcestruzzo superiore, mentre deve essere considerato come disomogeneo lo strato comprendente gli elementi di alleggerimento.

#### *Calcolo della resistenza termica dei solai*

Avendo, come detto, una successione di strato omogeneo/disomogeneo/omogeneo, si procede, in accordo alla UNI EN ISO 6946, con la suddivisione del solaio in sezioni e si determinano i limiti superiore ed inferiore delle resistenze termiche.

- **Suddivisione del solaio in sezioni**

Per sezione si intende la porzione di solaio comprendente uno o più strati omogenei; tale porzione è individuata da superfici parallele al flusso termico, che vanno a definire la m-esima ( $m = a, b, \dots, q$ ) sezione.

- **Calcolo delle aree relative dei materiali**

Si procede quindi con il calcolo delle aree relative delle diverse sezioni individuate, definite in proporzione all'area totale del solaio; la generica area relativa m-esima è, infatti, definita come:

<b>CO.PRE srl</b> <b>SOLAI PREFABBRICATI</b>	<b>FASCICOLO TECNICO PRESTAZIONI ENERGETICHE SOLAI</b>	<b>Rel. Termica solai</b>
		Pagina 8 di 17

$$f_m = A_m/A,$$

con

$A_m$  = area superficiale della generica sezione, in  $m^2$ ;

$A$  = area totale del solaio, in  $m^2$ .

Secondo tali assunzioni risulta quindi essere:  $f_a + f_b + f_c + \dots + f_q = 1.0$

- Calcolo del limite superiore della resistenza termica del solaio:  $R'_T$

Si calcola il limite superiore della resistenza termica  $R'_T$  mediante la formula:

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} = \frac{f_a}{\left( R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si} \right)} + \dots + \frac{f_b}{\left( R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si} \right)}$$

dove con  $R_{Tm}$  si indicano le resistenze termiche delle generiche sezioni m-esime.

- Calcolo del limite inferiore della resistenza termica del solaio:  $R''_T$

Si calcola il limite inferiore della resistenza termica  $R''_T$  dalla formula:

$$R''_T = R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{si}$$

dove con  $R_j$  si indicano le generiche resistenze termiche degli strati j-esimi

$$\left( \frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \right)$$

- Calcolo della resistenza termica totale per solaio a lastre alleggeriti:  $R_T$

Noti i limiti superiore ed inferiore della resistenza termica, è possibile calcolare la resistenza totale come:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

L'approssimazione del metodo di calcolo viene determinate attraverso la stima dell'errore espressa come:

$$e = \frac{R'_T - R''_T}{2 \cdot R_T} \cdot 100$$

La UNI EN ISO 6946 definisce che il metodo semplificato è applicabile in tutti quei casi in cui il rapporto tra limite superiore e limite inferiore della resistenza termica non sia superiore al 1.5. A questo rapporto corrisponde un errore relativo pari al 20%.

E' quindi necessario, per le varie tipologie di solaio, determinare il rapporto  $R'_T/R''_T$  e valutare il relativo errore, accertando la possibilità o meno di limitarsi all'applicazione del metodo semplificato sopra descritto.

#### *Calcolo della trasmittanza termica del solaio*

Una volta determinata la resistenza termica del solaio, la trasmittanza termica  $U$  risulta pari a:

$$U = \frac{1}{R_T} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### **5.3 Metodo "misto" UNI EN ISO 6946 + UNI EN ISO 10211**

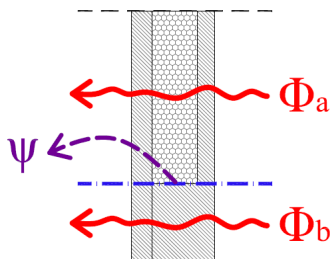
Nel caso in cui il metodo semplificato della UNI EN ISO 6946 fornisca un errore relativo maggiore al 20% - in accordo alla stessa norma (punto 6.2.1) - il metodo semplificato non è applicabile. Il metodo semplificato risulta, infatti, poco preciso in presenza di strati eterogenei costituiti da materiali con conducibilità molto diverse tra loro, come avviene proprio nel caso dei solai, in cui, nella generica sezione alleggerita, il calcestruzzo è accoppiato al polistirene.

In questi casi si ricorre al metodo di calcolo "misto" che, partendo dalle indicazioni fornite nella UNI EN ISO 6946:2008, permette di considerare l'effetto dei ponti termici (lineari e/o puntuali) nel calcolo della trasmittanza termica, avvalendosi di un metodo numerico conforme alla UNI EN ISO 10211 (secondo quanto stabilito al 6.2.1, nota 1, della stessa UNI EN 6946). L'approccio "misto" permette di considerare le diverse



lito al 6.2.1, nota 1, della stessa UNI EN 6946). L'approccio "misto" permette di considerare le diverse "sezioni" in cui è suddiviso il solaio in modo indipendente, considerando, secondo l'analogia elettrica, le resistenze delle singole sezioni "in parallelo".

In questo modo i flussi di calore 1-D (monodimensionali) che attraversano le diverse sezioni del solaio vengono sommati tra di loro ed a tale somma vengono aggiunti gli effetti dei ponti termici relativi all'interfaccia  $\psi$ , definita come *piano di costruzione adiabatica*.



Il flusso termico, in riferimento alla figura precedente, risulta così pari a:

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_b$$

Essendo ciascuna sezione costituita da strati omogenei, si può considerare come flusso approssimato:

$$\Phi_{approx} = \Phi_a + \Phi_b = U_{tot} A \cdot (\theta_i - \theta_e) = (U_a A_a + U_b A_b) (\theta_i - \theta_e)$$

si definisce il coefficiente di dispersione termica  $H_{approx}$  come:

$$H_{approx} = U_a A_a + U_b A_b$$

A tale coefficiente devono quindi essere aggiunti gli effetti dei ponti termici lineari relativi alle superfici di separazione delle due sezioni. In accordo alla UNI EN ISO 10211 si considera l'effetto del ponte termico introducendo la trasmittanza lineica  $\psi$  [W/mK], determinata attraverso calcolo numerico con modellazione agli elementi finiti. Ne deriva che il coefficiente di dispersione termica corretto viene assunto pari a:

$$H_{corretto} = U_a A_a + U_b A_b + \psi \cdot l$$

ove  $l$  corrisponde allo sviluppo lineare del ponte termico espresso in m.

Nel modello di calcolo utilizzato non vengono presi in considerazione i ponti termici puntuali relativi ai quattro spigoli del solaio. Si evince infatti, da altri esempi analizzati, che tali ponti termici forniscono un contributo assolutamente trascurabile, se non addirittura a "favore di sicurezza". Cioè il non considerare tali apporti massimizza il valore della trasmittanza complessiva, fornendo un valore cautelativo.

Per la determinazione dei ponti termici lineari si è fatto ricorso a modelli FEM piani 2-D (bi-dimensionali), assumendo una profondità della sezione unitaria. In accordo alla ISO 10211 per la valutazione degli effetti dei ponti termici all'interfaccia delle sezioni sono stati considerati piani di taglio distanti 1.0 m dall'interfaccia calcestruzzo/polistirene (*piano di costruzione*) al fine di essere certi di trovarsi in zone con flusso di calore perfettamente perpendicolare alle superfici esterne dell'elemento in esame. Dai modelli agli elementi finiti è stato possibile ricavare, per ogni situazione relativa alle diverse nervature presenti nel solaio, il flusso termico in presenza di determinate condizioni al contorno. In particolare, sono state assunte le seguenti condizioni al contorno.

*In tutti i modelli:*

- temperatura interna: +20 °C;
- temperatura esterna: ±0.0 °C;
- vincoli di estremità del solaio: adiabatici;

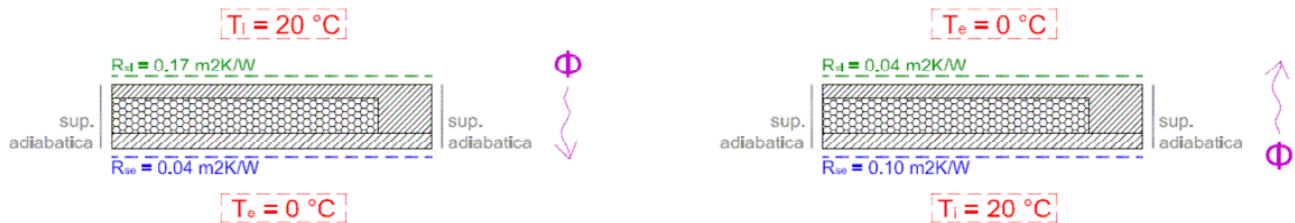
*Considerando un flusso discendente:*

- resistenza termica superficiale convenzionale estradosso del solaio:  $R_{si}=0.17 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;

- resistenza termica superficiale convenzionale intradosso del solaio:  $R_{se}=0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;

Considerando un flusso ascendente:

- resistenza termica superficiale convenzionale estradosso del solaio:  $R_{se}=0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;
- resistenza termica superficiale convenzionale intradosso del solaio:  $R_{si}=0.10 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;



è stato calcolato il flusso  $\Phi_{EF}$  in regime stazionario relativo alla singola sezione, da cui è possibile ricavare:

$$H_{E.F.} = \frac{\Phi_{EF}}{(\theta_i - \theta_e)}$$

Noti  $H_{approx}$  (definito attraverso il calcolo analitico) e  $H_{E.F.}$  (ottenuto dal modello discretizzato agli elementi finiti) è possibile calcolare:

$$\psi = \frac{H_{E.F.} - H_{approx}}{l} = \frac{H_{E.F.} - \sum U_i A_i}{l}$$

che fornisce l'entità del ponte termico lineare nel calcolo delle prestazioni energetiche dell'elemento esaminato.

E' quindi possibile calcolare il coefficiente di dispersione termica corretta del solaio mediante la formula:

$$H_{corretto} = U_a A_a + U_b A_b + \psi_i \cdot l_i$$

con  $\psi_i$  trasmittanza lineica dell'i-esimo ponte termico lineare di lunghezza  $l_i$  da cui risulta la trasmittanza termica totale corretta:

$$U_{corretta} = \frac{H_{corretto}}{A}$$

con  $A$  = area totale del solaio.

La resistenza termica totale di riferimento per il solaio sarà quindi:

$$R_{T,corretta} = \frac{1}{U_{corretta}}$$

#### Correzione della trasmittanza termica per la presenza di vuoti d'aria/inserti metallici

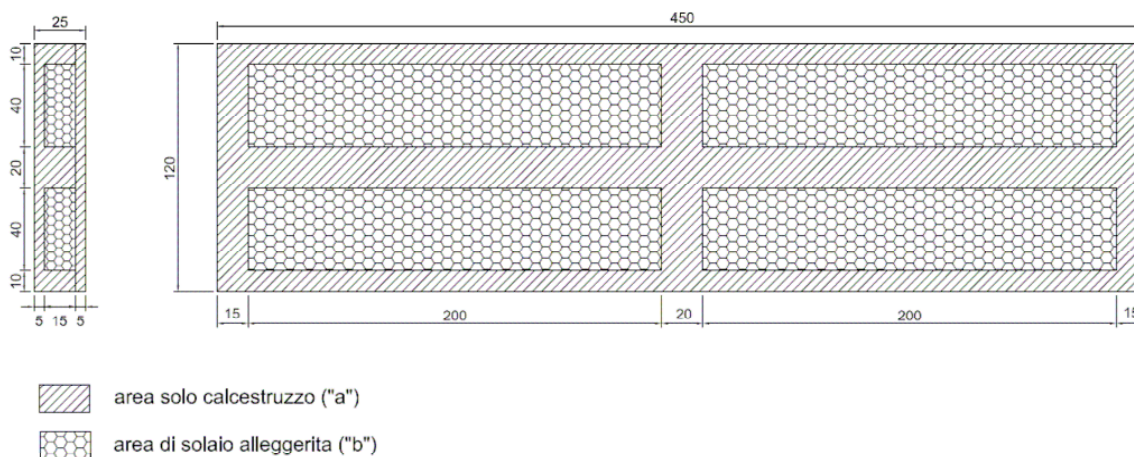
Non essendo presenti vuoti d'aria e/o elementi metallici all'interno dello spessore isolante (inteso in questo caso come alleggerimento), non vengono considerate correzioni della trasmittanza termica calcolata.

## 6 ESEMPIO DI CALCOLO PASSO A PASSO DI UN SOLAIO

Viene riportato di seguito un esempio di calcolo sviluppato passo a passo per un solaio-tipo (si considera il solaio H25 - 5+15+5), considerando un flusso termico discendente.

Lo schema di calcolo proposto è stato poi esteso a tutte le tipologie di solaio considerate.

### 6.1 Geometria del solaio



Si considera cioè un solaio scomponibile in tre strati e due sezioni.

Dimensioni geometriche		[m]
Lunghezza	$L$	4.50
Larghezza	$B$	1.20
Spessore totale solaio	$S_n$	0.25
Spessore lastra inferiore	$S_p$	0.05
Spessore strato di alleggerimento	$S_a$	0.15
Spessore cappa superiore in c.a.	$S_e$	0.05
Larghezza nervature longitudinali esterne	$b_e$	0.10
Larghezza nervatura longitudinale interna	$b_i$	0.20
Larghezza nervature trasversali esterne	$T_e$	0.15
Larghezza nervatura trasversale interna	$T_i$	0.20

### 6.2 Caratteristiche termiche materiali

Strato	Materiale	Spessore	$\lambda_m$	m	$\lambda$	P
		[m]	[W/mK]	%	[W/mK]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Lastra in c.a.	Calcestruzzo	0.05	1.66	15	1.909	2400
Alleggerimento	Polistirene	0.15	0.04	10	0.045	10
Cappa in c.a.	Calcestruzzo	0.05	1.66	15	1.909	2400

### 6.3 Resistenze termiche superficiali

Resistenza termica superficiale [m <sup>2</sup> K/W]	Direzione del flusso termico	
	Ascendente	Discendente
$R_{si}$	0.10	0.17
$R_{se}$	0.04	0.04

#### 6.4 Calcolo delle aree

Area totale del solaio:

$$A = 4.50 \times 1.20 = 5.40 \text{ m}^2$$

Area calcestruzzo delle nervature:

$$A_a = 4.50 \times 1.20 - 4 \times (2.00 \times 0.40) = 2.20 \text{ m}^2$$

Area della parte alleggerita:

$$A_b = 4 \times (2.00 \times 0.40) = 3.20 \text{ m}^2$$

Calcolo delle aree relative:

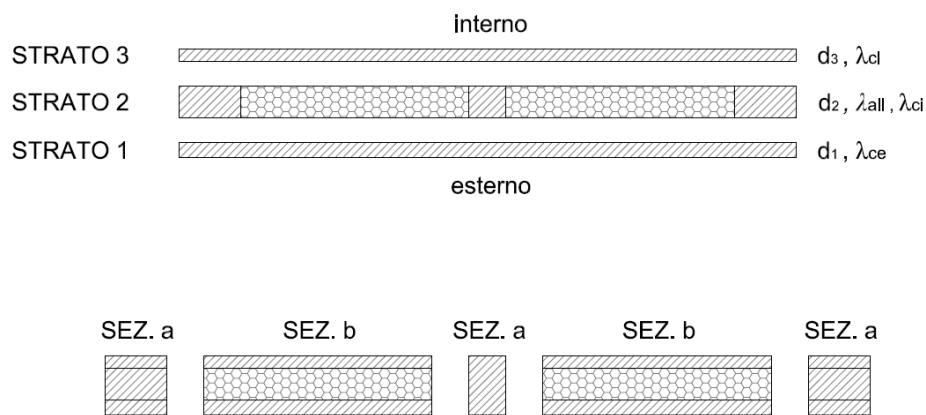
$$f_a = A_a/A = 0.407$$

(area relativa di solo calcestruzzo)

$$f_b = A_b/A = 0.593$$

(area relativa della parte di solaio alleggerita)

#### 6.5 Individuazione di "strati" e "sezioni"



#### 6.6 Calcolo del limite superiore della resistenza termica

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b} = \frac{f_a}{\left( R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_{c.est}} + \frac{d_2}{\lambda_{c.int}} + \frac{d_3}{\lambda_{c.int}} + R_{si} \right)} + \frac{f_b}{\left( R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_{c.est}} + \frac{d_2}{\lambda_{all}} + \frac{d_3}{\lambda_{c.int}} + R_{si} \right)} =$$

$$= \frac{0.407}{\left( 0.04 + \frac{0.05}{1.909} + \frac{0.15}{1.909} + \frac{0.05}{1.909} + 0.17 \right)} + \frac{0.593}{\left( 0.04 + \frac{0.05}{1.909} + \frac{0.15}{0.045} + \frac{0.05}{1.909} + 0.17 \right)} = 1.359 \frac{W}{m^2K}$$

$$R'_T = 0.735 \frac{m^2K}{W}$$

#### 6.7 Calcolo del limite inferiore della resistenza termica

$$R''_T = R_{se} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{si} = R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\frac{d_2/\lambda_{a2}}{f_a} + \frac{d_2/\lambda_{b2}}{f_b}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{si} =$$

$$= 0.04 + \frac{0.05}{1.909} + \frac{1}{\frac{0.407}{0.15/1.909} + \frac{0.593}{0.15/0.045}} + \frac{0.05}{1.909} + 0.17 = 0.449 \frac{m^2K}{W}$$

$$R''_T = 0.449 \frac{m^2K}{W}$$

### 6.8 Calcolo della resistenza termica totale

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} = \frac{0.735 + 0.449}{2} = 0.592 \frac{m^2K}{W}$$

### 6.9 Rapporto tra $R'_T$ e $R''_T$

$$0.735 / 0.449 = 1.64 > 1.5$$

Il rapporto supera il massimo valore ammesso dalla UNI EN ISO 6946.

### 6.10 Calcolo dell'errore

$$e = \frac{R'_T - R''_T}{2 \cdot R_T} \cdot 100 = \frac{0.735 - 0.449}{2 \cdot 0.592} \cdot 100 = 24.2\%$$

L'errore supera il valore del 20% pertanto il metodo semplificato, per questa tipologia di solaio, non può essere utilizzato.

### 6.11 Calcolo della trasmittanza

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0.592} = 1.689 \frac{W}{m^2K}$$

### 6.12 Metodo "misto"

Essendo il rapporto tra  $R'_T / R''_T > 1.5$ , il metodo semplificato della UNI EN 6946 non è applicabile. Pertanto si procede, per il solaio in esame, con il calcolo secondo il metodo "misto" UNI EN ISO 6946 + UNI EN ISO 10211. In riferimento alle 2 sezioni prima descritte si calcolano:

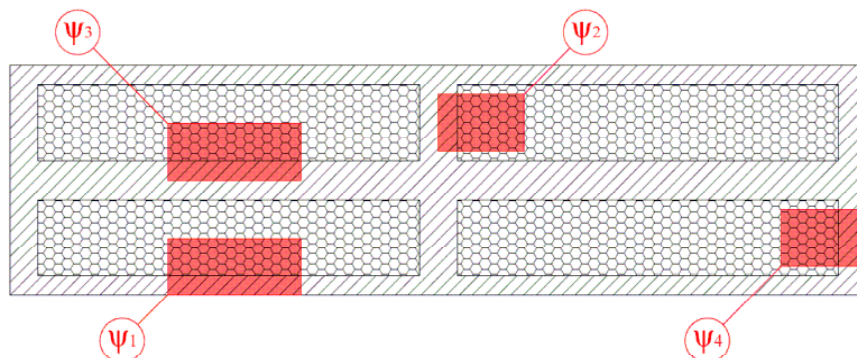
	$R_T$	$U$	$A$
	$m^2K/W$	$W/m^2K$	$m^2$
Sezione a	0.341	2.933	2.20
Sezione b	3.596	0.278	3.20

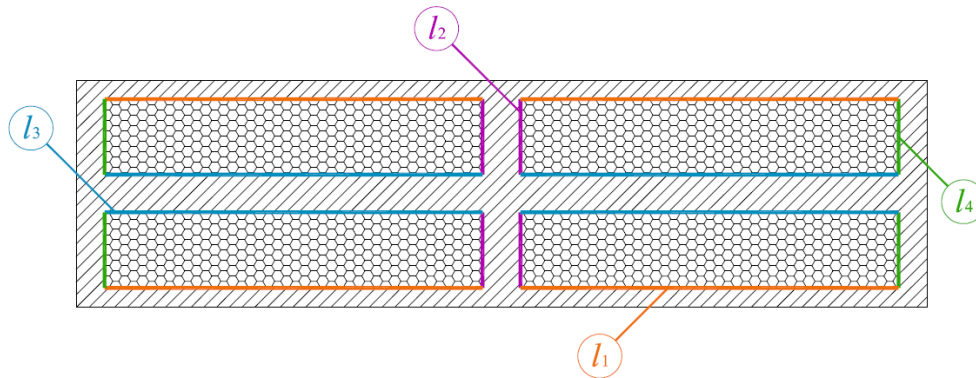
Il coefficiente di dispersione  $H_{approx}$  relativo al solaio è uguale a:

$$H_{approx, pannello} = U_a A_a + U_b A_b = 2.933 \cdot 2.20 + 0.278 \cdot 3.20 = 7.3423 \left[ \frac{W}{K} \right]$$

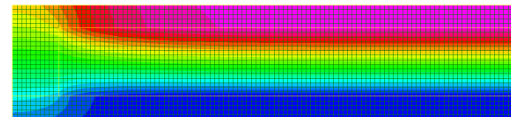
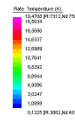
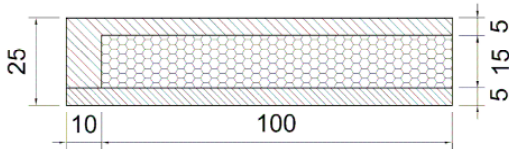
con il pedice "a" ad indicare la sezione di solo calcestruzzo ed il pedice "b" la parte alleggerita.

Si prendono in considerazione i quattro possibili ponti termici, analizzati con altrettanti modelli 2-D agli elementi finiti.





Calcolo della trasmittanza lineica  $\psi_1$  (ponte termico nervatura longitudinale di bordo)



$\Phi_{EF}$	14.1496	[W]
$\Delta T$	20	[K]
$H_{EF}$	0.70748	[W/K]

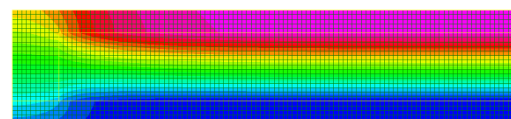
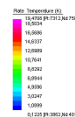
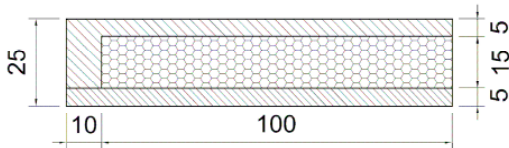
Sezione	$R_T$	$U$	$A$	$UA$
	$m^2 K/W$	$W/m^2 K$	$m^2$	$W/K$
Sezione a	3.596	0.278	1.00	0.27811
Sezione b	0.341	2.933	0.1	0.29329

$$H_{approx} = 0.57140$$

$$\psi_1 = (H_{EF} - H_{approx}) / l = (0.70748 - 0.57140) / 1.00 = 0.13608 [W/m \cdot K]$$

$$l_1 = 8.00 [m]$$

Calcolo della trasmittanza lineica  $\psi_2$  (ponte termico nervatura centrale trasversale)



$\Phi_{EF}$	14.1496	[W]
$\Delta T$	20	[K]
$H_{EF}$	0.70748	[W/K]

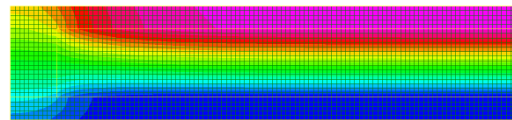
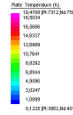
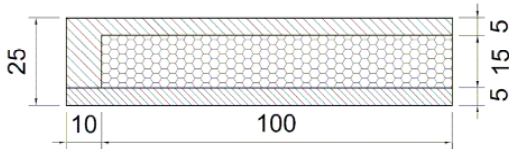
<b>Sezione</b>	<b><math>R_T</math></b>	<b><math>U</math></b>	<b><math>A</math></b>	<b><math>UA</math></b>
	$m^2K/W$	$W/m^2K$	$m^2$	$W/K$
Sezione a	3.596	0.278	1.00	0.27811
Sezione b	0.341	2.933	0.1	0.29329

$$H_{approx} = 0.57140$$

$$\psi_2 = (H_{EF} - H_{approx})/l = (0.70748 - 0.57140)/1.00 = 0.13608 [W/m \cdot K]$$

$$l_2 = 1.60 [m]$$

Calcolo della trasmittanza lineica  $\psi_3$  (ponte termico nervatura centrale longitudinale)



$\Phi_{EF}$	14.1496	[W]
$\Delta T$	20	[K]
$H_{EF}$	0.70748	[W/K]

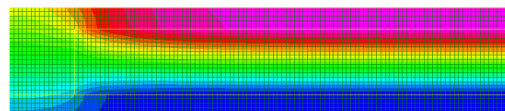
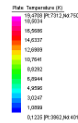
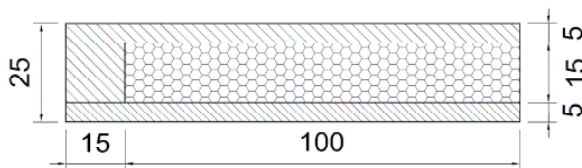
<b>Sezione</b>	<b><math>R_T</math></b>	<b><math>U</math></b>	<b><math>A</math></b>	<b><math>UA</math></b>
	$m^2K/W$	$W/m^2K$	$m^2$	$W/K$
Sezione a	3.596	0.278	1.00	0.27811
Sezione b	0.341	2.933	0.1	0.29329

$$H_{approx} = 0.57140$$

$$\psi_3 = (H_{EF} - H_{approx})/l = (0.70748 - 0.57140)/1.00 = 0.13608 [W/m \cdot K]$$

$$l_3 = 8.00 [m]$$

Calcolo della trasmittanza lineica  $\psi_4$  (ponte termico nervatura trasversale di testa)



$\Phi_{EF}$	17.1891	[W]
$\Delta T$	20	[K]
$H_{EF}$	0.859455	[W/K]

<b>Sezione</b>	$R_T$	$U$	$A$	$UA$
	$m^2K/W$	$W/m^2K$	$m^2$	$W/K$
Sezione a	3.596	0.278	1.00	0.27811
Sezione b	0.341	2.933	0.15	0.43994

$$H_{approx} = 0.71804$$

$$\psi_4 = (H_{EF} - H_{approx}) / l = (0.85945 - 0.71804) / 1.00 = 0.14141 [W/m \cdot K]$$

$$l_4 = 1.60 [m]$$

### 6.13 Calcolo della trasmittanza e della resistenza corrette

$$U_{corretta} = (U_a A_a + U_b A_b + \psi_1 l_1 + \psi_2 l_2 + \psi_3 l_3 + \psi_4 l_4) / A =$$

$$= (H_{approx, pannello} + \psi_1 l_1 + \psi_2 l_2 + \psi_3 l_3 + \psi_4 l_4) / A = 1.85 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Il valore di resistenza termica è pertanto pari a:

$$R_{corretta} = \frac{1}{U_{corretta}} = \frac{1}{1.85} = 0.54 \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

## 7 RIEPILOGO RISULTATI

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva delle caratteristiche energetiche dei solai analizzati, in cui vengono definite resistenza e trasmittanza termica **sia considerando l'effetto dei coefficienti liminari** (resistenze termiche superficiali) **che trascurandone la presenza** (caratteristiche del solo solaio).

Si ricorda che il **flusso termico discendente** è relativo al caso di solai su spazi aperti, solai su pilotis e simili (casi in cui l'ambiente più freddo si trova al di sotto del solaio).

Il **flusso termico ascendente** si verifica invece nel caso di solai di copertura o simili (casi in cui l'ambiente più freddo si trova al di sopra del solaio).



**TABELLA RIASSUNTIVA CARATTERISTICHE ENERGETICHE DEI SOLAI**

Altezza solaio	Tipo solaio	Direzione flusso	R <sub>si</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>se</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>T</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	U <sub>T</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	Errore [%]	Φ <sub>EF1</sub> [W/m]	Ψ <sub>1</sub> [W/mK]	Φ <sub>EF2</sub> [W/m]	Ψ <sub>2</sub> [W/mK]	Φ <sub>EF3</sub> [W/m]	Ψ <sub>3</sub> [W/mK]	Φ <sub>EF4</sub> [W/m]	Ψ <sub>4</sub> [W/mK]	con liminari		senza liminari	
																U <sub>corretta</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	R <sub>corretta</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	U <sub>solo solaio</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	R <sub>solo solaio</sub> [m <sup>2</sup> K/W]
h 18	5/8/5	discendente	0.17	0.04	0.488	2.049	25.8	19.6758	0.16500	19.6758	0.16500	19.6758	0.16500	23.0355	0.16867	2.22	0.45	4.17	0.24
		ascendente	0.10	0.04	0.391	2.558	25.4	21.9784	0.16453	21.9784	0.16453	21.9784	0.16453	26.2915	0.16677	2.63	0.38	4.17	0.24
h 20	5/10/5	discendente	0.17	0.04	0.520	1.923	25.6	17.5522	0.15744	17.5522	0.15744	17.5522	0.15744	20.8144	0.16170	2.09	0.48	3.70	0.27
		ascendente	0.10	0.04	0.420	2.381	24.6	19.5043	0.15252	19.5043	0.15252	19.5043	0.15252	23.6429	0.15517	2.45	0.41	3.70	0.27
h 22	5/12/5	discendente	0.17	0.04	0.549	1.821	25.1	15.9557	0.14892	15.9557	0.14892	15.9557	0.14892	19.1254	0.15367	1.99	0.50	3.45	0.29
		ascendente	0.10	0.04	0.448	2.232	23.8	17.6480	0.14085	17.6480	0.14085	17.6480	0.14085	21.6261	0.14386	2.31	0.43	3.45	0.29
h 24	5/14/5	discendente	0.17	0.04	0.578	1.730	24.5	14.6918	0.14029	14.6918	0.14029	14.6918	0.14029	17.7737	0.14546	1.89	0.53	3.13	0.32
		ascendente	0.10	0.04	0.475	2.105	22.9	16.1811	0.13001	16.1811	0.13001	16.1811	0.13001	20.0106	0.13332	2.18	0.46	3.13	0.32
h 25	5/15/5	discendente	0.17	0.04	0.592	1.689	24.2	14.1496	0.13608	14.1496	0.13608	14.1496	0.13608	17.1891	0.14141	1.85	0.54	3.03	0.33
		ascendente	0.10	0.04	0.489	2.045	22.5	15.5526	0.12494	15.5526	0.12494	15.5526	0.12494	19.3118	0.12837	2.12	0.47	3.03	0.33
h 26	5/16/5	discendente	0.17	0.04	0.606	1.650	23.9	13.6548	0.13497	13.6548	0.13497	13.6548	0.13497	16.6529	0.13744	1.80	0.56	2.90	0.35
		ascendente	0.10	0.04	0.502	1.992	22.0	14.9798	0.12012	14.9798	0.12012	14.9798	0.12012	18.6710	0.12365	2.06	0.49	2.90	0.35
h 28	5/18/5	discendente	0.17	0.04	0.633	1.580	23.2	12.7815	0.12410	12.7815	0.12410	12.7815	0.12410	15.6995	0.12981	1.72	0.58	2.70	0.37
		ascendente	0.10	0.04	0.528	1.894	21.2	13.9702	0.11115	13.9702	0.11115	13.9702	0.11115	17.5325	0.11485	1.96	0.51	2.70	0.37
h 30	5/20/5	discendente	0.17	0.04	0.660	1.515	22.6	12.0312	0.11673	12.0312	0.11673	12.0312	0.11673	14.8727	0.12263	1.65	0.61	2.50	0.40
		ascendente	0.10	0.04	0.554	1.805	20.4	13.1052	0.10307	13.1052	0.10307	13.1052	0.10307	16.5468	0.10688	1.87	0.54	2.50	0.40
h 32	5/22/5	discendente	0.17	0.04	0.687	1.456	22.0	11.3768	0.10990	11.3768	0.10990	11.3768	0.10990	14.1450	0.11591	1.59	0.63	2.38	0.42
		ascendente	0.10	0.04	0.580	1.724	19.7	-	-	-	-	-	-	-	-	1.72	0.58	2.27	0.44
h 34	5/24/5	discendente	0.17	0.04	0.713	1.403	21.4	10.7990	0.10358	10.7990	0.10358	10.7990	0.10358	13.4970	0.10965	1.53	0.66	2.22	0.45
		ascendente	0.10	0.04	0.606	1.650	19.0	-	-	-	-	-	-	-	-	1.65	0.61	2.15	0.47
h 36	5/26/5	discendente	0.17	0.04	0.739	1.353	20.8	10.2836	0.09773	10.2836	0.09773	10.2836	0.09773	12.9144	0.10383	1.47	0.68	2.13	0.47
		ascendente	0.10	0.04	0.631	1.585	18.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1.58	0.63	2.04	0.49
h 38	5/28/5	discendente	0.17	0.04	0.765	1.307	20.2	9.8201	0.09233	9.8201	0.09233	9.8201	0.09233	12.3864	0.09841	1.42	0.71	2.00	0.50
		ascendente	0.10	0.04	0.657	1.522	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	1.52	0.66	1.93	0.52
h 40	5/30/5	discendente	0.17	0.04	0.791	1.264	19.7	-	-	-	-	-	-	-	-	1.26	0.79	1.72	0.58
		ascendente	0.10	0.04	0.682	1.466	17.1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.47	0.68	1.85	0.54
h 50	5/40/5	discendente	0.17	0.04	0.919	1.088	17.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1.09	0.92	1.41	0.71
		ascendente	0.10	0.04	0.808	1.238	14.7	-	-	-	-	-	-	-	-	1.24	0.81	1.50	0.67
h 60	5/50/5	discendente	0.17	0.04	1.045	0.957	15.4	-	-	-	-	-	-	-	-	0.96	1.05	1.20	0.84
		ascendente	0.10	0.04	0.934	1.071	12.8	-	-	-	-	-	-	-	-	1.07	0.93	1.26	0.79