

Domenico Leone

RESPONSABILITÀ PROGETTUALE E CALCOLO DI ELEMENTI DI COPERTURA E TAMPONAMENTO IN ACCIAIO E MISTE

Parte 1



RESPONSABILITÀ PROGETTUALE E CALCOLO DI ELEMENTI DI COPERTURA E TAMPONAMENTO IN ACCIAIO E MISTE

Domenico Leone

Il prof. Domenico Leone vanta un'esperienza più che trentennale nel campo della progettazione e realizzazione di strutture metalliche sia in campo industriale che infrastrutturale e civile ed è titolare del laboratorio di "Costruzione dell'Architettura" presso la facoltà di Architettura di Genova in qualità di professore a contratto.

E' consulente di azienda avendo occupato in precedenza il ruolo di Responsabile del settore di progettazione di opere in carpenteria metallica prima presso la Società Italmont S.p.A. e successivamente presso le Società SMSDemag e Paul-Wurth S.p.A.

Ha partecipato alla progettazione di grandi impianti industriali di produzione e trasformazione dell'acciaio e ne ha seguito la realizzazione con le imprese costruttrici e di montaggio acquisendo ampia esperienza in tutti i settori del ciclo di esecuzione delle opere metalliche.

Per il suo impegno in campo internazionale vanta ampia conoscenza delle norme di settore utilizzate in varie nazioni con particolare riguardo agli Eurocodici.

Ha esercitato ed esercita tuttora attività formativa in ambito Aziendale, Universitario, Pubblico, Privato e dell'Ordine Professionale.

È autore del libro "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali nonché di numerosi programmi di calcolo automatico dedicati sia alla progettazione di strutture in acciaio di impianti industriali che alla progettazione di componenti strutturali e di dettaglio proprie degli edifici civili e delle infrastrutture (pacchetto SAITU edito da STA DATA S.r.l.) in base agli Eurocodici ed alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto dell'autore.

S.T.A. DATA srl

Corso Raffaello, 12 - 10126 Torino

tel. 011 6699345 www.stadata.com

Premessa

Gli elementi di tamponatura e completamento di una struttura civile o industriale sono oggi universalmente considerati componenti strutturali oggetto di progettazione al pari delle strutture secondarie e principali cui sono collegati.

Una definizione generale individua col termine “struttura” qualunque parte della costruzione atta a trasferire carichi e azioni su altre strutture collegate; ciascuna “componente strutturale” è quindi oggetto di progettazione (DBF “*design by formula*” e/o DBA “*design by analysis*”) per verificarne l’idoneità alla funzione preposta, ovvero a resistere alle azioni sollecitanti.

Un parere chiesto dall’AIPPEG al Servizio Tecnico Centrale del Ministero dei Lavori Pubblici circa la necessità di qualificazione degli acciai per lamiere grecate e pannelli metallici coibentati chiarisce il concetto di “componente strutturale” nell’estratto di seguito riportato.

*“.....omissis.....ove le lastre in argomento siano chiamate a svolgere distinte funzioni statiche (come, ad esempio, nel caso vengano utilizzate come **tamponature**, svolgendo quindi in tal caso anche un **ruolo strutturale** come “distributori” dell’azione del vento) è necessario che l’acciaio di tali pannelli sia qualificato, proprio per la relativa destinazione d’uso che ricade nell’ambito dei “materiali e prodotti per uso strutturale” e, quindi, rientrante in uno dei casi A), B) o C) del paragrafo 11.1 delle suddette Norme Tecniche per le Costruzioni. “*

La classificazione degli elementi di tamponatura degli edifici come “parte strutturale” implica non solo la qualificazione dei prodotti e dei produttori ma anche l’obbligo di redigere relazioni di calcolo statico al pari delle strutture portanti (secondarie e principali) che ne giustificano l’impiego sotto le azioni di progetto non ultima la resistenza al fuoco.

Un successivo parere tecnico richiesto sempre dall’AIPPEG al Prof. Luca Sanpaolesi, di seguito riportato, ribadisce il concetto sopra esposto:

La distinzione tra struttura semplice (cioè uso come semplice elemento di copertura soggetto al peso proprio + neve + vento + temperatura o come pannello di facciata soggetto al peso proprio + vento + + temperatura) e struttura che partecipa alla stabilità dell’opera (ad esempio contribuendo a controventare il capannone) è irrilevante ai fini strutturali.

Infatti in ogni caso la lamiera grecata o i pannelli esplicano una funzione strutturale più o meno importante (ma sempre strutturale) contribuendo a sostenere i carichi.

A rigore anche la funzione “autoportante” che il S.T.T dichiara esercitate dalle lamiere grecate o pannelli che sostengono il solo materiale isolante (ad esempio come pannellatura interna al capannone) si dovrebbe considerare portante, ma è chiaramente condivisibile l’indicazione del S.T.C di escludere questo caso, data la modesta funzione portante in gioco.

Su questo pertanto non credo necessario precisare altro, e ritengo la questione assolutamente definita.

I criteri di calcolo previsti dalla normativa europea, in parte ripresi dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) si riferiscono alle seguenti componenti strutturali:

- Lamiere grecate semplici in acciaio e alluminio per coperture o pareti
- Solai con lamiera grecata collaborante (fase iniziale di getto e fase finale collaborante)

- Pannelli sandwich coibentati per coperture e pareti

I produttori delle componenti strutturali citate mettono a disposizione dei progettisti cataloghi che spesso contengono tabelle di capacità di carico in cui i valori indicati sono di dubbia provenienza ossia se di natura solo sperimentale (con o senza estrapolazione e analisi statistica dei risultati dei test) o analitico-sperimentale oppure solo analitica; in quest'ultimo caso spesso non è noto in base a quale combinazione di carichi normativa siano state ottenute le capacità di carico tabellate o almeno quali siano le limitazioni d'uso delle tabelle.

È chiaro che un produttore può solo dare informazioni puramente indicative della capacità di carico degli elementi di tamponatura e completamento (solai collaboranti) di una struttura poiché la situazione reale che un progettista deve esaminare dipende sia dalla specifica di contratto del cliente sia dall'applicazione rigorosa della norma al caso specifico (condizioni ambientali, limitazioni di servizio ecc.).

Si pensi solo alle condizioni e combinazioni di carico che devono essere esaminate in un progetto completo di elementi di completamento strutturale ovvero:

- presenza o meno di un carico permanente portato, come ad esempio pannelli solari per il fotovoltaico, pavimentazioni o erbari o controsoffittature, il cui valore è trattato con un preciso coefficiente di sicurezza nella combinazione dei carichi
- tipo di carico variabile; se di esercizio o di neve nonché se di breve o di lunga durata che, nel caso di pannelli sandwich, può produrre effetti non trascurabili di scorrimento (creep)
- gradiente termico tra le facce dovuto a fattori meteorologici o per cause di incendio.
- azione del vento in pressione e depressione combinata con altre azioni.

È evidente che oggi un progettista non può definire esaustiva una relazione di calcolo di una costruzione dichiarando per gli elementi di completamento strutturale una capacità di carico desunta da tabelle di portata bensì è suo dovere produrre, per questi elementi, un calcolo di verifica in conformità alle norme vigenti.

È però compito dei produttori fornire ai progettisti alcuni parametri caratteristici dell'elemento strutturale ricavabili solo da prove su campione e/o su larga scala per poter eseguire i calcoli in conformità alla normativa applicata.

L'interazione produttore-progettista caratterizza queste tipologie costruttive ed è necessaria per poter eseguire un progetto completo delle componenti qui citate attribuendo a ciascuno la responsabilità che gli compete ovvero, al progettista la garanzia di stabilità dell'opera e al produttore la dichiarazione certificata delle caratteristiche del prodotto necessarie all'esecuzione dei calcoli.

Utile indicazioni su “come eseguire il progetto di componenti strutturali complementari” sono riportate nel volume “Elementi di Completamento Strutturale in acciaio” di Domenico Leone e Adriano Castagnone edito da Wolters Kluwer e corredato da software di calcolo automatico.

Di seguito viene proposto un esempio di relazione di calcolo (commentata) per la verifica di resistenza di un pannello sandwich coibentato tipo deck di copertura così come deve essere eseguita da un progettista per la denuncia al Genio Civile.

PROGETTO PANNELLO DI COPERTURA DECK SEMPLICEMENTE APPOGGIATO

RELAZIONE DI CALCOLO

Pannello tipo deck a 4 greche su larghezza $B = 1$ m con anima in schiuma poliuretanic rigida, semplicemente appoggiato su luce di 4 m, utilizzato come copertura pedonabile di un capannone industriale sito in.....da progettare sia per **carico neve persistente** che per **carico di esercizio equivalente** .

1 - carichi di progetto, combinazioni e sicurezza

- azioni permanenti che comprendono:

- peso proprio del pannello: $p_p = 0,138 \text{ kN/m}^2/\text{m}$
- carichi uniformemente distribuiti permanentemente legati al pannello (lastre solari o impianti fissi). $p_g = 0,000 \text{ kN/m}^2/\text{m}$

- azioni variabili di lunga durata:

- carico della neve (per combinazione nel lungo termine): $p = 1,65 \text{ kN/m}^2/\text{m}$

- azioni variabili di breve durata:

- carico uniforme di esercizio (**alternativo alla neve**): $q = 1,65 \text{ kN/m}^2/\text{m}$
- azione del vento in pressione pari a: $w_p = 0,0 \text{ kN/m}^2/\text{m}$
- azione del vento in depressione pari a: $w_d = -0,7 \text{ kN/m}^2/\text{m}$
- effetti climatici che producono un gradiente termico tra le facce con le seguenti temperature:

faccia esterna: $T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ con carico neve ; $T_1 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ in esercizio

faccia interna: $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ con carico neve ; $T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ in esercizio

L'effetto dello scorrimento (creep) è considerato nel progetto tenendo conto che si tratta di un pannello di copertura soggetto anche ad un carico variabile "quasi permanente" dovuto alla neve la cui presenza durante l'anno può essere considerata "normale".

I carichi sopra citati sono combinati nel seguente modo per la verifica di resistenza allo S.L.U. :

$$S_d = \gamma_G G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki}$$

Per lo stato limite di servizio sono previsti dalla norma EN 14509 i seguenti limiti di deformazione:

Tetti e soffitti	- carico a breve termine	luce/200
	- carico a lungo termine (con scorrimento)	luce/100
Pareti		luce/100

La combinazione degli effetti delle azioni per lo S.L.S. da eseguire per il controllo della deformazione è la **combinazione frequente** data dalla seguente espressione:

$$S_d = \sum_{j \geq 1} G_{kj} + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \psi_{1i} Q_{ki}$$

Il valore dei coefficienti di combinazione e sicurezza sia per lo S.L.U. che per lo S.L.S. è di seguito riportato:

Table E.6 – Values of combination coefficients ψ_0 and ψ_1

Combination coefficients	Factors		
	Snow	Wind	Temperature
ψ_0	0,6	0,6	0,6 / 1,0 ^a
ψ_1	0,75 / 1,0 ^b	0,75 / 1,0 ^b	1,0

^a Coefficient $\psi_0 = 1,0$ is used if the winter temperature $T_1 = 0$ °C is combined with snow.

^b Coefficient $\psi_1 = 0,75$ for snow and wind is used if the combination includes the action effects of two or more variable actions and coefficient $\psi_1 = 1,0$ for snow and wind is used if there is, in the combination, only a single action effect representing the variable actions and it is caused by either the sole snow load or the sole wind load, acting alone.

NOTE Table E.6 should be read in conjunction with Table E.8

Nota: il fattore di combinazione per la temperatura $\psi_0 = 1$ è usato con il carico neve persistente mentre con il carico di esercizio equivalente (variabile di breve durata) si usa $\psi_0 = 0,6$

I coefficienti di sicurezza delle combinazioni sono riportati nella seguente tabella estratta dalla norma EN 14509 :

Table E.8 – Load factors γ_F

Actions	Limit state	
	Ultimate limit state	Serviceability limit state
Permanent actions G	1,35 (1,00)	1,00
Variable actions	1,50	1,00
Temperature actions	1,50 ^a	1,00
Creep effects	1,00	1,00

^a Temperature actions may be replaced by 1,35 when regulatory provisions valid in the country of use of the panel so require.

I coefficienti di sicurezza per il materiale da applicare ai valori caratteristici delle resistenze di ciascuna componente del pannello sono riportati nella tabella che segue.

Tabella E.9 – Fattori di sicurezza del materiale γ_M

Proprietà alle quali applicare γ_M	Stato limite	
	Stato limite ultimo	Stato limite di servizio
Snervamento di una faccia metallica	1,1	1,0
Raggrinzamento di una faccia metallica in campata ($v \leq 0,09$)	1,25	1,1
Raggrinzamento di una faccia metallica ad un appoggio intermedio (interazione con reazione all'appoggio)	1,25 ^a	1,1
Taglio dell'anima ($v \leq 0,16$)	1,5	1,1
Rottura a taglio di una faccia profilata	1,1	1,0
Schiacciamento dell'anima ($v \leq 0,13$)	1,4	1,1
Resistenza alla reazione all'appoggio di una faccia profilata	1,1	1,0
Rottura di un fissaggio	1,33 ^b	1,0 ^b
Rottura di un elemento in un punto di connessione	1,33 ^b	1,0 ^b

^a Il fattore del materiale per il raggrinzamento allo stato limite ultimo è necessario se il calcolo è basato su analisi elastica o se una resistenza a flessione non-nulla all'appoggio intermedio è utilizzata in un calcolo basato sull'analisi plastica.

^b Se il valore caratteristico della resistenza di un fissaggio non è basata su uno adeguato numero di prove tale da ottenere un valore statisticamente attendibile, devono essere usati valori più elevati dei fattori di sicurezza del materiale.

Il calcolo di verifica al raggrinzamento è eseguito facendo riferimento al valore della resistenza ottenuto da prove di carico eseguite dal produttore con il seguente valore caratteristico.

- **tensione di raggrinzamento della faccia esterna:** $\sigma_{we} = 101,3 \text{ N/mm}^2$
- **tensione di raggrinzamento di progetto:** $\sigma_{wd} = \sigma_{we} / \gamma_M = 81,00 \text{ N/mm}^2$

2 – Caratteristiche del pannello

- spessore dell'anima del pannello:	$d_c = 79,48$ mm (riferito all'asse delle facce)
- altezza totale del pannello:	$D = 130$ mm
- faccia esterna piana in acciaio	S 250 GD
- faccia interna piana in acciaio	S 250 GD
- spessore nominale faccia esterna:	$t_{1n} = 0,60$ mm
- spessore di progetto faccia esterna:	$t_{1d} = 0,57$ mm
- spessore nominale faccia interna:	$t_{2n} = 0,50$ mm
- spessore di progetto faccia interna:	$t_{2d} = 0,47$ mm
- materiale dell'anima: schiuma poliuretanic	rigida
densità:	40 kg/m ³
resistenza a compressione:	0,104 MPa
resistenza a taglio (breve termine):	0,130 MPa
resistenza a taglio (2000 ore):	0,065 MPa
resistenza a taglio (100000 ore):	0,049 MPa
coeff. di scorrimento per neve:	2,4
coeff. di scorrimento per permanenti:	7,0

3 – Schema statico e geometria della sezione

Il pannello è **semplicemente appoggiato** su luce di 4 m

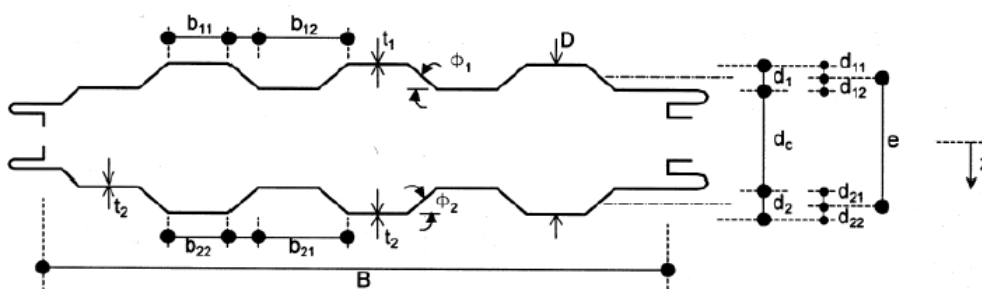
La profondità di appoggio è 50 mm con fattore di distribuzione $k = 0,5$

Il pannello è di seguito rappresentato:



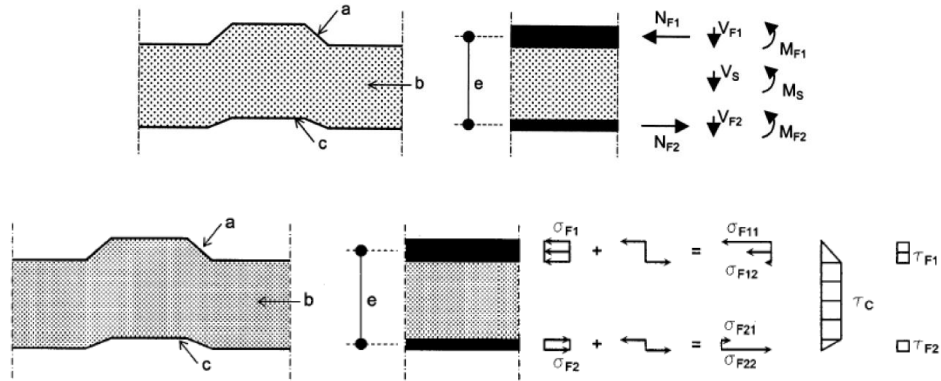
Il progetto è basato sull'analisi elastica sia per lo stato limite di servizio che per lo stato limite ultimo.

Il modello di riferimento normativo è di seguito riportato:



Il momento flettente sia in campata che sugli appoggi interni di pannelli continui viene trasformato in una coppia di forze (compressione e trazione) che agiscono nel piano baricentrico delle due facce. Il taglio agisce direttamente sull'anima

Momento flettente e taglio sono distribuiti tra le componenti del pannello secondo il criterio illustrato dalle seguenti figure



Le tensioni di flessione sono date da:

$$\sigma_{F1} = -\frac{N_{F1}}{A_{F1}} = -\frac{M_S}{e A_{F1}}, \quad \sigma_{F2} = \frac{N_{F2}}{A_{F2}} = \frac{M_S}{e A_{F2}}$$

$$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} - \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{11}, \quad \sigma_{F12} = \sigma_{F1} + \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{12}$$

$$\sigma_{F21} = \sigma_{F2} - \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{21}, \quad \sigma_{F22} = \sigma_{F2} + \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{22}$$

Le tensioni di taglio sono date da:

$$\tau_C = \frac{V_S}{eB} \quad \text{in cui } B \text{ è la larghezza del pannello}$$

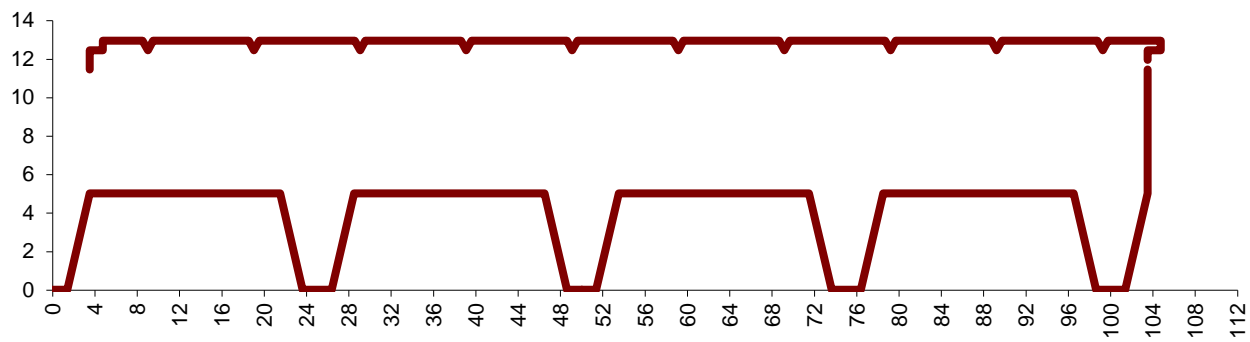
$$\tau_{F1} = \frac{V_{F1}}{n_1 s_{w1} t_1}, \quad \tau_{F2} = \frac{V_{F2}}{n_2 s_{w2} t_2}$$

n_1 e n_2 sono rispettivamente il numero di anime della faccia profilata 1 e 2 del pannello

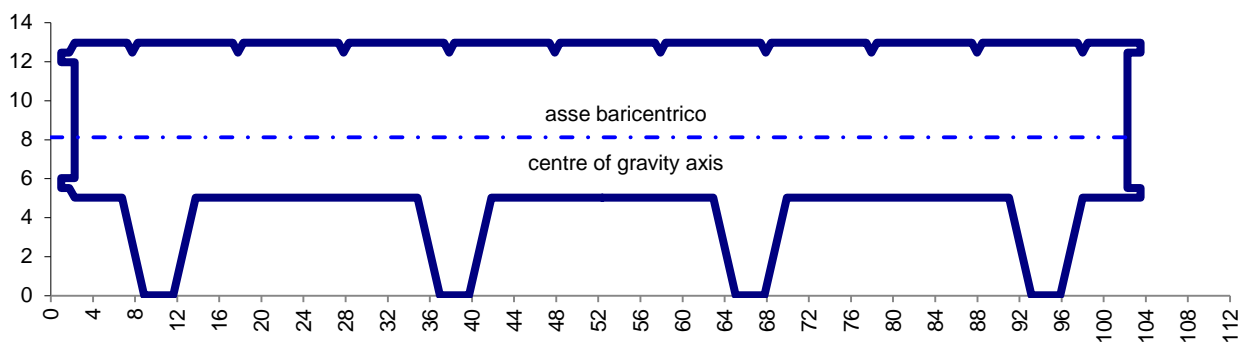
t_1 e t_2 sono rispettivamente lo spessore della faccia profilata 1 e 2 del pannello

Il modello elaborato dal programma di calcolo automatico "Sandwich" è di seguito riportato sia nella sua conformazione reale che in quella di calcolo:


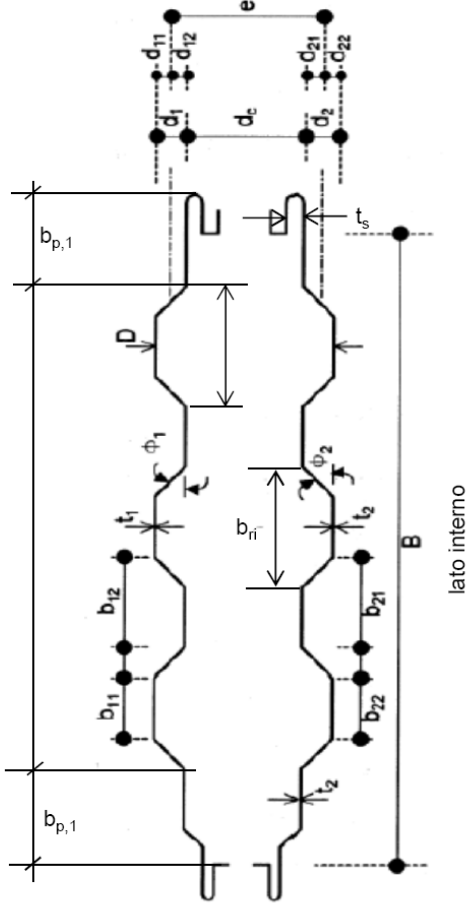
modello reale:



modello di calcolo:



Le caratteristiche geometriche del pannello, automaticamente calcolate, sono di seguito riportate:

MODELLO DI CALCOLO			
lato esterno			
			
lato interno			
			
Altezza totale del profilo	D = mm	130,00	
Altezza anima interna	d _c = mm	79,48	
Larghezza totale del pannello	B _t = mm	1025	
Larghezza tra le estremità	B = mm	1000	
Spessore di progetto faccia est.	t ₁ = mm	0,57	
Spessore di progetto faccia int.	t ₂ = mm	0,47	
Lunghezza spine di innesto	s = mm	12,5	
N° irrigidimenti faccia esterna	n _s =	10	
N° irrigidimenti faccia interna	n _i =	4	
Dist. I° irrigidim. esterno-bordo	b _{p,1} = mm	50,00	
Dist. I° irrigidim. interno-bordo	b _{p,1} = mm	50,00	
Dist. I° piega anima da faccia est.	h _a = mm		
Dist. II° piega anima da faccia est.	h _b = mm		
Larghezza irrigidimento esterno	b _{ri} = mm	10,00	
Larghezza irrigidimento interno	b _{ri} = mm	70,00	
Spessore spine di innesto	t _s = mm	5,00	
Altezza irrigidim. esterno trapezio	u _{tf} = mm		
Altezza irrigidim. interno trapezio	u _{ti} = mm	50,00	
Inclinazione irrigidimento esterno	α _{sf} = deg	45,00	
Inclinazione irrigidimento interno	α _{si} = deg	67,00	
Inclinazione piega dell'anima	α _a = deg		
Altezza irrigidimento esterno	d ₁ = mm	5,00	
Altezza irrigidimento interno	d ₂ = mm	50,00	
Eccentricità tra i baric. delle facce	e = mm	91,574	
Distanza baric. est.-bordo irrigid.	d ₁₁ = mm	4,049	
Distanza baric. est.-asse faccia	d ₁₂ = mm	0,951	
Distanza baric. int.-bordo irrigid.	d ₂₂ = mm	36,955	
Distanza baric. int.-asse faccia	d ₂₁ = mm	13,045	
Area della sezione metallica	A = cm ²	13,26	
Posizione asse baricentrico	z _G = mm	81,3	
Momento di inerzia faccia esterna	I _{ext} = cm ⁴	0,195	
Momento di inerzia faccia interna	I _{int} = cm ⁴	24,147	
Modulo di resist. faccia esterna	W _{el,c} = cm ³	2,046	
Modulo di resist. faccia interna	W _{el,t} = cm ³	6,534	
Area di taglio faccia esterna	A _{v,F1} = cm ²	0,81	
Area di taglio faccia interna	A _{v,F2} = cm ²	2,04	
Peso unitario del pannello	p = kg/m²	13,83	

Per il pannello **semplicemente appoggiato** i parametri di calcolo sono definiti dalla norma EN 14509 – allegato **E** ovvero:

Rigidezza flessionale del pannello B_s:

$$B_s = \frac{E_{F1} A_{F1} E_{F2} A_{F2} e^2}{E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2}}$$

Assumendo come riferimento la geometria dell'intero pannello si ha, per il caso in esame:

$$E_{F1} = E_{F2} = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{F1} = \text{area della faccia esterna} = 6,39 \text{ cm}^2$$

$$A_{F2} = \text{area della faccia interna} = 6,87 \text{ cm}^2$$

$$e = \text{eccentricità tra i baricentri delle facce} = 91,574 \text{ mm}$$

$$B_s = 5,829 \cdot 10^6 \text{ kNcm}^2$$

Fattore di taglio in campata k (EN 14509 tabella E.10.1):

$$k = \frac{3B_s}{L^2 G_c A_c}$$

Assumendo G_c (modulo di taglio) pari a $3,2 \text{ N/mm}^2$ per azioni di breve durata ed essendo A_c (area del materiale in anima) = $886,87 \text{ cm}^2$ (intero pannello)

$$k = 0,385$$

per azioni di lunga durata: $G_{ct,perm} = G_c / (1 + \phi_{perm}) = 3,2 / (1 + 7) = 0,4$
 $G_{ct,neve} = G_c / (1 + \phi_{neve}) = 3,2 / (1 + 2,4) = 0,941$

$$k_{perm} = 3,081$$

$$k_{neve} = 1,31$$

Fattore di riduzione β per carico uniforme (EN 14509 tabella E.10.2):

$$\beta = \frac{B_{F1}}{B_{F1} + \frac{B_s}{1 + 3,2 \cdot k}}$$

In cui:

B_{F1} = rigidezza della faccia profilata: $B_{F1} = E_{F1} \cdot I_{F1} = 507094 \text{ kNcm}^2$

Per azioni di breve durata: $\beta = 0,1626$

Per azioni di lunga durata: $\beta_{perm} = 0,4858$

$$\beta_{neve} = 0,3111$$

Fattore di riduzione β per differenza di temperatura tra le facce (EN 14509 tabella E.10.2):

$$\beta = \frac{B_{F1}}{B_{F1} + \frac{B_s}{1 + 2,67k}}$$

In cui:

k = fattore di taglio per azioni di breve durata

$$\beta_T = 0,1500$$

Per la verifica di resistenza in campata si applica la norma EN 14509- allegato E considerando il momento flettente globale ripartito tra faccia profilata e anima secondo il seguente criterio:

Azioni nel lungo termine:

$$M_{F1,q} = M \cdot \beta$$

$$M_{S,q} = M \cdot (1-\beta)$$

Per lo stato limite ultimo, assumendo $\gamma_G = 1$ e $\gamma_Q = 1$ per le **azioni variabili di lunga durata**, con un peso proprio del pannello pari a $p_p = 13,83 \text{ daN/m}^2/\text{m}$ si ha:

$$q = 1,0 \cdot 0,138 + 1,0 \cdot 1,65 = \mathbf{1,788} \text{ kN/m}^2/\text{m}$$

$$M_{\text{tot}} = \mathbf{1/8} \cdot q \cdot L^2 = \mathbf{357,6} \text{ kNcm/m} \text{ per combinazione allo S.L.U.}$$

$$M_{F1,q} = M_{\text{perm}} \cdot \beta_{\text{perm}} + M_{\text{neve}} \cdot \beta_{\text{neve}} = 116,06 \text{ kNcm/m} \quad (\text{S.L.U.})$$

$$M_{S,q} = M_{\text{perm}} \cdot (1-\beta_{\text{perm}}) + M_{\text{neve}} \cdot (1-\beta_{\text{neve}}) = 241,54 \text{ kNcm/m} \quad (\text{S.L.U.})$$

Differenza di temperatura:

$$M_{F1,T} = -B_{F1} \cdot \theta \cdot (1-\beta_T)$$

$$M_{S,T} = B_{F1} \cdot \theta \cdot (1-\beta_T)$$

$$\theta = (\alpha_2 \cdot T_2 - \alpha_1 \cdot T_1) / e = 0,000012 \cdot (20 - 0) / 9,1574 = 2,62 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$$

Momento flettente totale

$$M_{F1,\text{tot}} = M_{F1,q} + M_{F1,T}$$

$$M_{S,\text{tot}} = M_{S,q} + M_{S,T}$$

Per la valutazione degli effetti nel lungo termine il gradiente di temperatura non viene tenuto in conto nella verifica allo S.L.U. essendo un'azione variabile di breve durata. Il suo effetto è tenuto in conto nella verifica di deformazione per lo S.L.S. pertanto:

$$M_{F1,\text{tot}} = M_{F1,q} = \mathbf{116,06} \text{ kNcm/m}$$

$$M_{S,\text{tot}} = M_{S,q} = \mathbf{241,54} \text{ kNcm/m}$$

Azioni nel breve termine:

Con lo stesso criterio vengono calcolati i momenti flettenti per le **azioni nel breve termine allo S.L.U.** tenendo conto in questo caso dell'effetto del gradiente termico sulla faccia profilata con temperatura esterna $T_1 = 55^\circ\text{C}$ e temperatura interna $T_2 = 25^\circ\text{C}$.

$$M_{F1,q} = M \cdot \beta$$

$$M_{S,q} = M \cdot (1-\beta)$$

Per lo stato limite ultimo, assumendo $\gamma_G = 1,35$ e $\gamma_Q = 1,5$ per le **azioni variabili di breve durata**, con un peso proprio del pannello pari a $p_p = 13,83 \text{ daN/m}^2/\text{m}$ si ha:

$$q = 1,35 \cdot 0,138 + 1,5 \cdot 1,65 = \mathbf{2,6613} \text{ kN/m}^2/\text{m}$$

$M_{tot} = 1/8 \cdot q \cdot L^2 = 532,26$ kNcm/m per combinazione allo S.L.U.

$$M_{F1,q} = \beta \cdot (M_{perm} + M_{neve}) = 86,56 \quad \text{kNcm/m} \quad (\text{S.L.U.})$$

$$M_{S,q} = (1-\beta) \cdot (M_{perm} + M_{neve}) = 445,7 \quad \text{kNcm/m} \quad (\text{S.L.U.})$$

Differenza di temperatura:

$$M_{F1,T} = -B_{F1} \cdot \theta \cdot (1 - \beta_T)$$

$$M_{S,T} = B_{F1} \cdot \theta \cdot (1 - \beta_T)$$

$$\theta = (\alpha_2 \cdot T_2 - \alpha_1 \cdot T_1) / e = 0,000012 \cdot (25 - 55) / 9,1574 = -3,93 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$$

$$M_{F1,T} = 15,26 \quad \text{kNcm/m} \quad (\text{S.L.U.})$$

$$M_{S,T} = -15,26 \quad \text{kNcm/m} \quad (\text{S.L.U.})$$

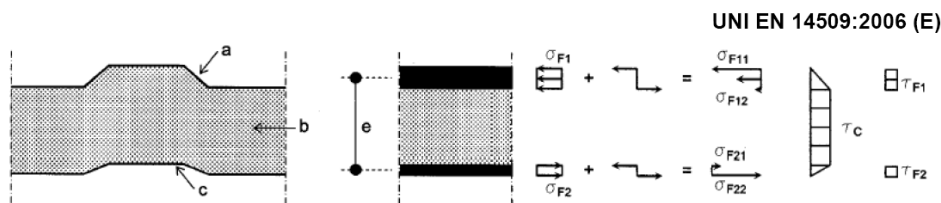
Momento flettente totale

$$M_{F1,tot} = M_{F1,q} + M_{F1,T} = 101,81 \text{ kNcm/m}$$

$$M_{S,tot} = M_{S,q} + M_{S,T} = 430,45 \text{ kNcm/m}$$

Verifica faccia inferiore tesa

La tensione massima è calcolata al lembo teso della profilatura interna in base al criterio precedentemente riportato e rappresentato nella seguente figura in cui la greca interna è sporgente e la greca esterna è di altezza < 5 mm quindi trascurabile:



La tensione massima di trazione è data come **somma** dell'effetto prodotto dal momento M_S (tensione uniforme di trazione) e di quello dovuto alla componente del momento globale attribuita alla faccia inferiore (M_{F1})

La tensione di trazione massima, riferita alla effettiva larghezza del pannello (*), vale quindi:

- azioni di breve durata (esercizio normale)

$$\sigma_{F22} = [430,45 / (9,1574 \cdot 6,87) + 101,81 / 24,147 \cdot 3,6955] \cdot B_e(\text{mm})/1000 \quad (\text{kN/cm}^2)$$

$$\sigma_{F22} = 227,0 \text{ N/mm}^2 < 227,3 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{per acciaio S 250 GD e } \gamma_M = 1,1)$$

- azioni di lunga durata (neve persistente)

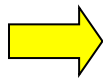
$$\sigma_{F22} = [241,54 / (9,1574 \cdot 6,87) + 116,06 / 24,147 \cdot 3,6955] \cdot B_e(\text{mm})/1000 \quad (\text{kN/cm}^2)$$

$$\sigma_{F22} = 218,7 \text{ N/mm}^2 < 227,3 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{per acciaio S 250 GD e } \gamma_M = 1,1)$$

(*) il riferimento è fatto alla effettiva larghezza $B_e = (B_i+B)/2 = (1025+1000)/2 = 1012,5 \text{ mm}$ del pannello poiché a questa sono riferite le caratteristiche geometriche della sezione (aree e inerzie)

Di seguito viene riportata la tabella riepilogativa delle sollecitazioni dimensionanti sia per lo S.L.U. che per lo S.L.S. per **azioni nel lungo termine** come risultato del calcolo eseguito col software “Sandwich” . In grigio è riportato il calcolo di verifica preliminare che consente di definire la condizione di verifica del pannello (se per azioni nel breve oppure nel lungo termine); nel caso in esame la tensione massima ($218,7 \text{ N/mm}^2$) si registra al lembo teso della greca inferiore per effetto delle azioni nel lungo termine mentre, a parità di condizioni e con stesso gradiente termico ($\Delta T = T_1 - T_2 = 0-20 = -20^\circ\text{C}$ come nel caso di **neve non persistente**), le azioni nel breve termine produrrebbero una tensione di trazione pari a $182,33 \text{ N/mm}^2$.

PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA ED UNA PIANA									
SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.				SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.					
u.m./m kN ; cm	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME		u.m./m kN ; cm	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME	
campata	$M_{F,i} =$	116,06	$M_{F,i} =$	13,41	campata	$M_{F,i} =$	90,40	$M_{F,i} =$	13,41
	$M_S =$	241,54	$M_S =$	14,19		$M_S =$	184,70	$M_S =$	14,19
appoggio	$M_{F,i} =$	0,00	$M_{F,i} =$	0,00	appoggio	$M_{F,i} =$	0,00	$M_{F,i} =$	0,00
	$M_S =$	0,00	$M_S =$	0,00		$M_S =$	0,00	$M_S =$	0,00
reazione	$F_{S,a} =$	3,58	$F_{S,a} =$	-1,82	reazione	$F_{S,a} =$	2,75	$F_{S,a} =$	-1,12
sollecitazioni per la condizione di scorrimento						sollecitazioni per la condizione di scorrimento			



S.L.U. - campata		S.L.U. - appoggio		S.L.U. - campata		S.L.U. - appoggio	
c.c normali	scorrimento	c.c normali	scorrimento	c.c normali	scorrimento	c.c normali	scorrimento
69,61	116,06	0,00	0,00				
462,65	241,54	0,00	0,00				
-40,96	13,41	0,00	0,00				
-141,44	14,19	0,00	0,00				
182,33	218,71	0,00	0,00	0,00	227,27	200,00	200,00
80,09	41,81	0,00	0,00	0,00	81,00	200,00	200,00
S.L.S. - campata		S.L.S. - appoggio		S.L.S. - campata		S.L.S. - appoggio	
c.c normali	scorrimento	c.c normali	scorrimento	c.c normali	scorrimento	c.c normali	scorrimento
33,44	90,40	0,00	0,00				
241,66	184,70	0,00	0,00				
-29,58	13,41	0,00	0,00				
-82,82	14,19	0,00	0,00				
90,71	169,80	0,00	0,00	0,00	250,00	227,27	227,27
41,83	31,97	0,00	0,00	0,00	227,27	227,27	227,27

La tabella seguente riporta le sollecitazioni sia per lo S.L.U. che per lo S.L.S **per azioni nel breve termine** a **parità di carico uniformemente distribuito** ma considerando un gradiente termico tra le facce pari a:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 55-25 = +30^\circ\text{C}$$

PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA ED UNA PIANA									
SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.				SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.					
u.m./m kN ; cm	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME		u.m./m kN ; cm	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME	
campata	$M_{F,i} =$	101,81	$M_{F,i} =$	-19,50	campata	$M_{F,i} =$	54,91	$M_{F,i} =$	-8,11
	$M_S =$	430,45	$M_S =$	-162,90		$M_S =$	220,19	$M_S =$	-104,29
appoggio	$M_{F,i} =$	0,00	$M_{F,i} =$	0,00	appoggio	$M_{F,i} =$	0,00	$M_{F,i} =$	0,00
	$M_S =$	0,00	$M_S =$	0,00		$M_S =$	0,00	$M_S =$	0,00
reazione	$F_{S,a} =$	5,32	$F_{S,a} =$	-1,82	reazione	$F_{S,a} =$	2,75	$F_{S,a} =$	-1,12
sollecitazioni per la condizione normale						sollecitazioni per la condizione normale			

Verifica faccia superiore compressa

La faccia compressa del pannello è poco profilata e quindi soggetta al fenomeno del raggrinzamento.

La tensione caratteristica di raggrinzamento, determinata sperimentalmente dal produttore, vale:

$\sigma_{we} = 101,3 \text{ N/mm}^2$; applicando un coeff. di sicurezza $\gamma_M = 1,25$ corrispondente ad una **deviazione standard $\delta \leq 0,09$ sulla serie di test eseguiti dal produttore**, la tensione di progetto vale:

$$\sigma_{we} = 81 \text{ N/mm}^2$$

Nel caso in esame la faccia esterna non è profilata per cui l'effetto del momento locale è nullo e la tensione è generata solo dal momento M_S attribuito all'anima:

- azioni di lunga durata (neve persistente con $\Delta T = -20^\circ\text{C}$)

$$\sigma_{F11} = [241,54 / (9,1574 \cdot 6,39)] \cdot B(\text{mm})/1000 \text{ (kN/cm}^2) = \mathbf{41,8} \text{ N/mm}^2 < 81 \text{ N/mm}^2$$

- azioni di breve durata (neve **non** persistente con $\Delta T = -20^\circ\text{C}$)

$$\sigma_{F11} = [462,65 / (9,1574 \cdot 6,39)] \cdot B(\text{mm})/1000 \text{ (kN/cm}^2) = \mathbf{80,1} \text{ N/mm}^2 < 81 \text{ N/mm}^2$$

- azioni di breve durata (normale esercizio con $\Delta T = +30^\circ\text{C}$)

$$\sigma_{F11} = [430,45 / (9,1574 \cdot 6,39)] \cdot B(\text{mm})/1000 \text{ (kN/cm}^2) = \mathbf{74,5} \text{ N/mm}^2 < 81 \text{ N/mm}^2$$

La verifica a compressione della faccia poco profilata evidenzia che la condizione dimensionante per lo S.L.U. è dovuta all'effetto delle azioni nel breve termine assumendo lo stesso carico di progetto della neve ($1,65 \text{ kN/m}^2/\text{m}$) considerata non persistente.

Verifica a taglio dell'anima:

è eseguita in base alla seguente espressione:

$$\tau_c = \frac{V_s}{eB} < f_{sc} / \gamma_{Ms}$$

f_{sc} = resistenza a taglio dell'anima:

- azioni nel breve termine : $f_{sc} = 0,130 \text{ N/mm}^2$
- azioni nel lungo termine (2000 ore per neve) $f_{sc} = 0,065 \text{ N/mm}^2$
- azioni nel lungo termine (100000 ore per permanenti) $f_{sc} = 0,049 \text{ N/mm}^2$

- azioni nel breve termine (esercizio normale o neve non persistente):

$$V_s = \mathbf{5,32} \text{ kN/m}$$

$$\tau_c = 5,32 \cdot (B(\text{mm}) / 1000) / (9,1574 \cdot 1,00) = \mathbf{0,059} \text{ kN/cm}^2 < 0,130/1,5 = \mathbf{0,087} \text{ N/mm}^2$$

- azioni nel lungo termine (neve persistente):

$$V_s = \mathbf{3,38} \text{ kN/m}$$

$$\tau_c = 3,58 \cdot (B(\text{mm}) / 1000) / (9,1574 \cdot 1,00) = \mathbf{0,040} \text{ kN/cm}^2 < 0,065/1,5 = \mathbf{0,043} \text{ N/mm}^2$$

Nota: la resistenza a taglio per azioni permanenti nel lungo termine (100000 ore) viene qui equiparata a quella per azione della neve nel lungo termine (2000 ore) che ha un peso molto superiore al peso proprio del pannello. **Nel caso di carichi permanenti aggiunti (p.e. lastre solari) è bene riferirsi a valori della resistenza a taglio nel lungo termine minori di quella dovuta alla neve.**

Resistenza alla reazione di appoggio della faccia profilata:

non essendo dato alcun riferimento dalla norma EN 14509, la verifica è eseguita in base alla norma EN 1993-1-3 (& 6.1.7.3) per le lamiere grecate trascurando la resistenza del materiale dell'anima:

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_a / t} \right] \left(2,4 + (\phi/90)^2 \right) / \gamma_{M1}$$

l_a = larghezza di appoggio = 50 mm

α = fattore di distribuzione = 0,075 per appoggio di estremità

t = spessore della faccia profilata = 0,47 mm (rapporto raggio/spessore assunto uguale a 1)

γ_{M1} = coefficiente di sicurezza per il materiale = 1,1

ϕ = angolo di inclinazione delle anime degli irrigidimenti = 67°

- effetti nel lungo termine (neve persistente):

$$R_{w,Rd} = \mathbf{4,55} \text{ kN} > 3,58 \cdot B(\text{mm})/1000 = 3,62 \text{ kN} (*)$$

- effetti nel breve termine (normale esercizio o neve non persistente):

$$R_{w,Rd} = \mathbf{4,55} \text{ kN} > 5,32 \cdot B(\text{mm})/1000 = 5,39 \text{ kN} (*)$$

(*) riferito alla larghezza efficace del pannello

In condizioni di normale esercizio la condizione di resistenza non è soddisfatta per cui è necessario prevedere una maggior larghezza di appoggio: se si assumesse $l_a = 80$ mm la verifica sarebbe soddisfatta:

$$R_{w,Rd} = \mathbf{5,44} \text{ kN} > 5,32 \cdot B(\text{mm})/1000 = 5,39 \text{ kN} (*)$$

Verifica di deformazione:

è eseguita in base alla seguente espressione (tab. E.10.2 – EN 14509)

$$\frac{5qL^4}{384B_s} (1 + 3,2k)(1 - \beta)$$

e tenendo conto del gradiente termico, anche in base alla seguente:

$$\frac{\theta L^2}{8}(1-\beta)$$

in cui:

$$\theta = \frac{\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1}{e}$$

- azioni nel lungo termine (**neve persistente**) e nel breve termine (**neve non persistente**):

VERIFICA DI DEFORMAZIONE - & E.5.5 b					
		Az. Max.	Az. Min.		
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	14,89	-6,08	mm	(rif. larghezza effettiva pannello)
gradiente termico	$f_{max,2} =$	4,46	4,46	mm	
combinazione frequente	$f_{max} =$	19,34	1,63	mm	< 20,00 mm per tetti
VERIFICA ALLO SCORRIMENTO - PANNELLO DI COPERTURA - & E.5.4					
		Az. Max.			
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	30,08		mm	(rif. larghezza effettiva pannello)
gradiente termico	$f_{max,2} =$	4,46		mm	
combinazione frequente	$f_{max} =$	34,54		mm	< 40,00 mm

Nota: il gradiente termico negativo (temperatura della faccia esterna minore della temperatura della faccia interna) provoca una deformazione verso il basso che si somma a quella del carico gravitazionale sia per azioni nel breve termine che per azioni nel lungo termine.

- **azioni nel breve termine (esercizio normale):**

il gradiente termico positivo genera una deformazione verso l'alto come rappresentato nella parte di foglio di calcolo del programma "Sandwich"

VERIFICA DI DEFORMAZIONE - & E.5.5 b				
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	Az. Max. 14,89	Az. Min. -6,08	mm (rif. larghezza effettiva pannello)
gradiente termico	$f_{max,2} =$	-6,68	-6,68	mm
combinazione frequente	$f_{max} =$	10,88	10,09	mm < 20,00 mm per tetti
VERIFICA ALLO SCORRIMENTO - PANNELLO DI COPERTURA - & E.5.4				
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	Az. Max. 4,46		mm (rif. larghezza effettiva pannello)
gradiente termico	$f_{max,2} =$	-6,68		mm
combinazione frequente	$f_{max} =$	2,22		mm < 40,00 mm

A completamento del calcolo effettuato si riporta di seguito la tabella riepilogativa delle verifiche di resistenza effettuate:

Casi di carico	Faccia superiore raggrinzamento N/mm ²	Faccia inferiore trazione N/mm ²	Anima taglio N/mm ²	Appoggio reazione kN
Azione neve nel lungo termine e $\Delta T = -20^{\circ}C$	41,8 < 81	218,7 < 227,3	0,040 < 0,043	4,55 > 3,62
Azione neve nel breve termine e $\Delta T = -20^{\circ}C$	80,1 < 81	182,3 < 227,3	0,059 < 0,087	4,55 < 5,39 Con $l_a = 80$ mm 5,44 > 5,39
Carico di esercizio nel breve termine e $\Delta T = +30^{\circ}C$	74,5 < 81	227,0 < 227,3	0,059 < 0,087	4,55 < 5,39 Con $l_a = 80$ mm 5,44 > 5,39

Nella seconda parte dell'articolo è presentato il calcolo automatico del pannello deck come eseguito dal **programma Sandwich** per il caso di azioni nel lungo termine con l'effetto prodotto dallo scorrimento (creep).