



PANNELLI SANDWICH CONTINUI CON UNA FACCIA PROFILATA

Domenico Leone



PANNELLI SANDWICH CONTINUI CON UNA FACCIA PROFILATA

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 Itimpianti 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

Indice

Parte I	PANNELLI SANDWICH CONTINUI CON UNA FACCIA PROFILATA	4
1	Pannello semplicemente appoggiato	5
2	Pannello continuo su 3 appoggi	17

1 PANNELLI SANDWICH CONTINUI CON UNA FACCIA PROFILATA

L'esempio di seguito presentato è estratto dal libro "*Calcolo strutturale di lamiere grecate semplici, per solai collaboranti e pannelli monolitici coibentati*" da me scritto e disponibile presso STADATA s.r.l.

Il calcolo si riferisce ad un pannello con faccia esterna profilata e con schema statico sia di semplice appoggio che continuo su tre appoggi. Lo scopo è quello di confrontare i risultati dell'analisi dei due schemi statici al fine di definire se e quando sia conveniente passare dallo schema di semplice appoggio allo schema di trave continua quest'ultimo analizzato, per quanto riguarda la lamiera profilata, anche in campo plastico-parzialmente elastico (curva bi-lineare delle tensioni).

Il calcolo è eseguito sia manualmente che con l'uso del programma "Sandwich" da me elaborato e disponibile presso STADATA s.r.l., per meglio comprendere i passaggi e le formule utilizzate:

..... omissis

1.1 Pannello semplicemente appoggiato

La luce di progetto è di 4 m ed il pannello è soggetto ad un carico uniforme di esercizio pari a 2 kN/m^2 . Il modello è di seguito riportato sia nella sua conformazione reale che in quella di calcolo:

Fig. 3.18 : modello reale:

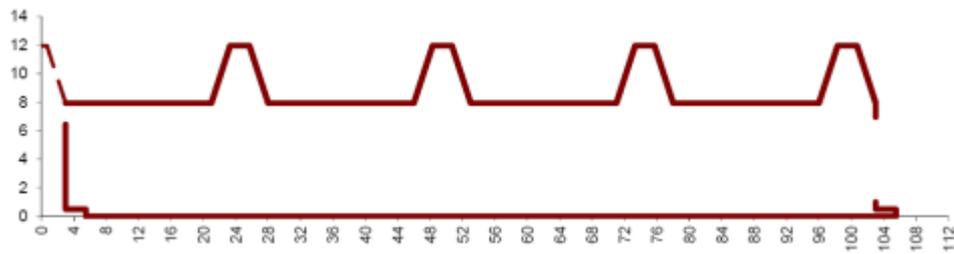
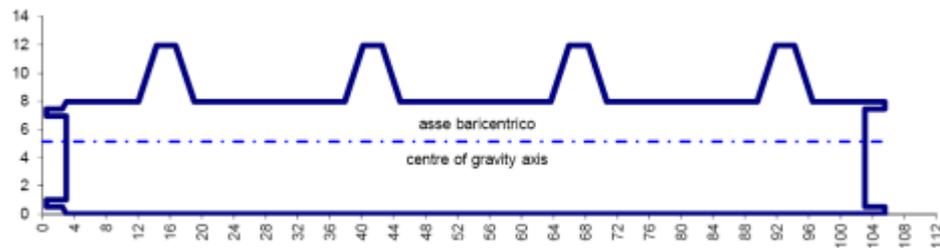
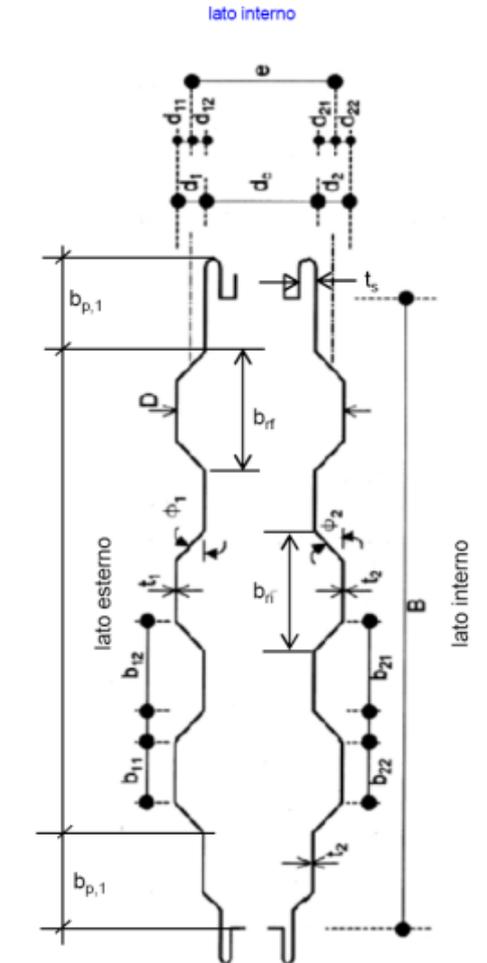


Fig. 3.19 : modello di calcolo:



Le caratteristiche geometriche del pannello sono di seguito riportate:

MODELLO DI CALCOLO			
lato esterno			
			
lato interno			
			
Altezza totale del profilo	D = mm		120,00
Altezza anima interna	d _c = mm		79,48
Larghezza totale del pannello	B _t = mm		1050
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		25
N° irrigidimenti faccia esterna	n _s =		4
N° irrigidimenti faccia interna	n _i =		
Dist. 1° irrigidim. esterno-bordo	b _{p,1} = mm		90,00
Dist. 1° irrigidim. interno-bordo	b _{p,1} = mm		
Dist. 1° piega anima da faccia est.	h _a = mm		
Dist. 1° piega anima da faccia int.	h _b = mm		
Larghezza irrigidimento esterno	b _{ri} = mm		70,00
Larghezza irrigidimento interno	b _{ri} = mm		
Spessore spine di innesto	t _s = mm		5,00
Altezza irrigidim. esterno trapezio	u _{st} = mm		40,00
Altezza irrigidim. interno trapezio	u _{st} = mm		
Inclinazione irrigidimento esterno	α _{st} = deg		60,00
Inclinazione irrigidimento interno	α _{st} = deg		
Inclinazione piega dell'anima	α _a = deg		
Altezza irrigidimento esterno	d ₁ = mm		40,00
Altezza irrigidimento interno	d ₂ = mm		0,00
Eccentricità tra i baric. delle facce	e = mm		86,353
Distanza baric. est.-bordo irrigid.	d ₁₁ = mm		32,208
Distanza baric. est.-asse faccia	d ₁₂ = mm		7,792
Distanza baric. int.-bordo irrigid.	d ₂₂ = mm		0,919
Distanza baric. int.-asse faccia	d ₂₁ = mm		0,919
Area della sezione metallica	A = cm ²		12,81
Posizione asse baricentrico	z _G = mm		51,7
Momento di inerzia faccia esterna	I _{ext} = cm ⁴		15,272
Momento di inerzia faccia interna	I _{int} = cm ⁴		0,201
Modulo di resist. faccia esterna	W _{el,c} = cm ³		4,742
Modulo di resist. faccia interna	W _{el,t} = cm ³		2,189
Area di taglio faccia esterna	A _{V,F1} = cm ²		2,11
Area di taglio faccia interna	A _{V,F2} = cm ²		0,00
Peso del pannello / m2	p = kg/m²		13,28

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

Rigidità 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 piuttosto che il passo tra le greche si ha, per il caso in esame:

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

$$A_{F1} = \text{area della faccia esterna} = 7,49 \text{ cm}^2$$

$$A_{F2} = \text{area della faccia interna} = 5,32 \text{ cm}^2$$

$$e = \text{eccentricità tra i baricentri delle facce} = 86,353 \text{ mm}$$

$$B_s = 4,87 \cdot 10^6 \text{ kNcm}^2$$

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 $3,2 \text{ N/mm}^2$

Ed essendo A_c (area del materiale in anima) = $869,08 \text{ cm}^2$ (intero pannello)

$$k = 0,328$$

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

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

In cui:

$$B_{F1} = \text{rigidezza della faccia esterna: } B_{F1} = E_{F1} \cdot I_{F1} = 320721 \text{ kNcm}^2$$

$$\beta = 0,119$$

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:

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

$$M_s = M \cdot (1 - \beta)$$

$$M = 1/8 \cdot q \cdot L^2$$

Per lo stato limite ultimo, assumendo $\gamma_G = 1,35$ e $\gamma_Q = 1,5$ e con un peso proprio del pannello pari a $13,3 \text{ daN/m}^2/\text{m}$ si ha:

$$q = 1,35 \cdot 0,133 + 1,5 \cdot 2 = 3,1796 \text{ kN/m}^2/\text{m}$$

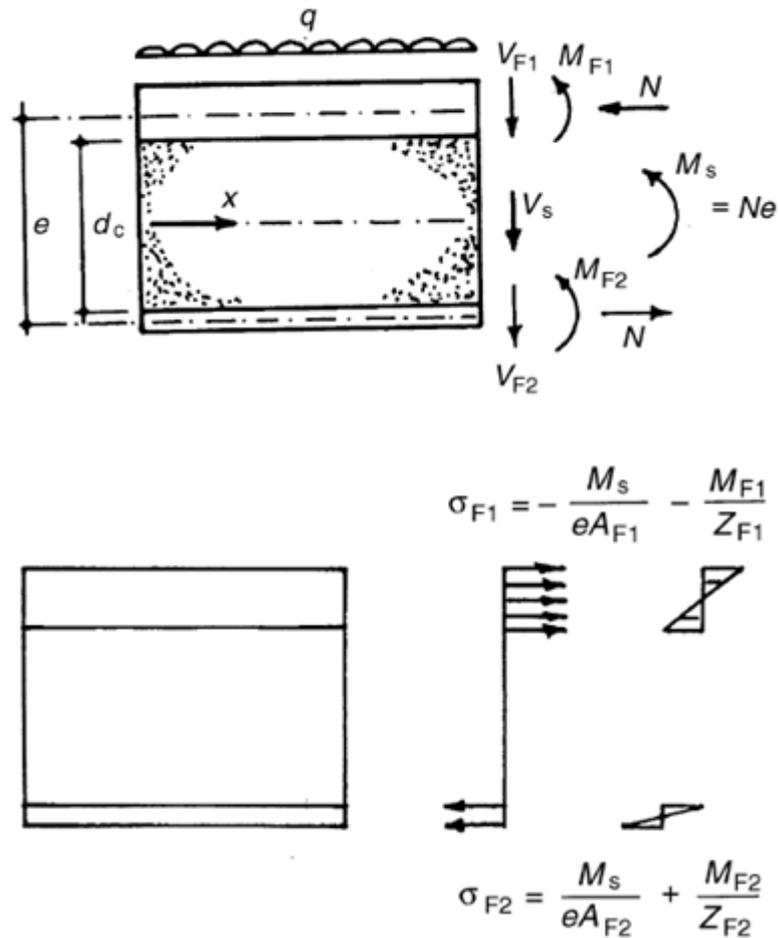
$$M = 635,91 \text{ kNcm/m}$$

$$M_{F1} = 635,91 \cdot 0,119 = 75,67 \text{ kNcm/m}$$

$$M_S = 635,91 \cdot (1 - 0,119) = 560,24 \text{ kNcm/m}$$

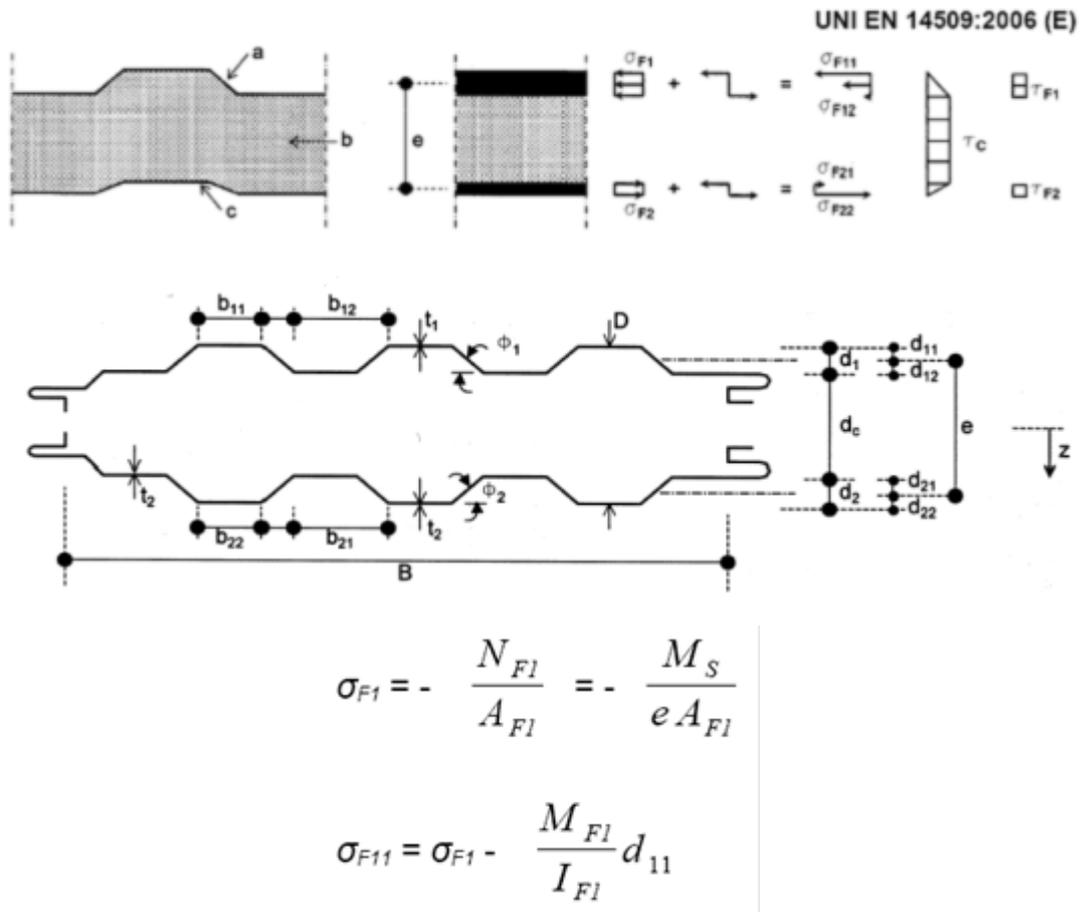
La tensione massima è calcolata al lembo compresso della profilatura esterna in base al seguente criterio esposto sia analiticamente che graficamente nel libro di Davies:

Fig. 3.20



mentre nella norma EN 14509 – allegato E si fa riferimento alle seguenti figure e formule:

Fig. 3.21



Z_{F1} = modulo di resistenza della lamiera esterna al lembo esterno del profilo:

$Z_{F1} = I_{F1} / d_{11}$ I_{F1} = momento di inerzia della faccia esterna

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

$$\sigma_{F11} = [-560,24 / (8,6353 \cdot 7,49) - 75,67 / 15,272 \cdot 3,22] \cdot B(\text{mm})/1000 \quad (\text{kN/cm}^2)$$

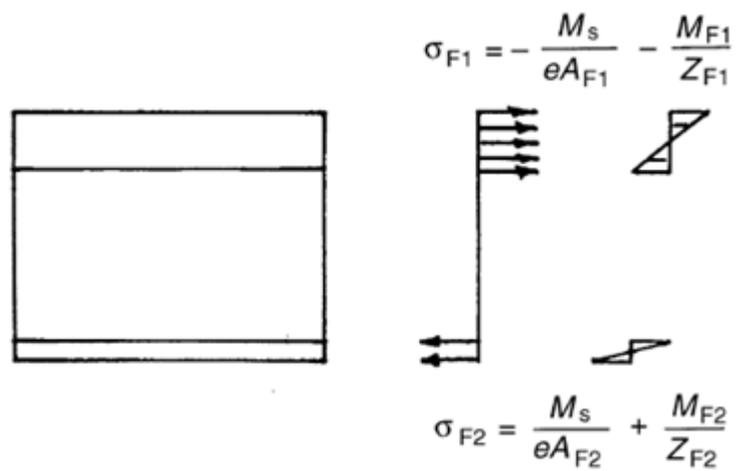
$$\sigma_{F11} = 252,4 \text{ N/mm}^2 < 254,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{per acciaio S 280 GD e } \gamma_M = 1,1)$$

(*) il riferimento è fatto alla effettiva larghezza **B** (1025 mm) del pannello poiché a questa sono riferite le caratteristiche geometriche della sezione (aree e inerzie)

Si vuole qui far notare come analoga verifica è fatta al lembo teso del pannello indipendentemente dalle dimensioni della profilatura.

Secondo la teoria esposta nel libro di Davies 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_{F2})

Fig. 3.22



Il criterio (corretto rispetto alla norma attualmente in vigore in Italia) è riportato anche nella norma EN 14509 – allegato E – item E.7.2.5 ovvero:

$$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{22}$$

in cui

$$\sigma_{F2} = \frac{N_{F2}}{A_{F2}} = \frac{M_s}{eA_{F2}}$$

Nel caso in esame la faccia inferiore 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:

$$\sigma_{F2} = \frac{N_{F2}}{A_{F2}} = \frac{M_s}{eA_{F2}}$$

$$\sigma_{F2} = 560,24 / (8,6353 \cdot 5,32) = 125,1 \text{ N/mm}^2$$

La verifica a taglio dell'anima è eseguita in base alla seguente espressione:

$$\tau_c = \frac{V_s}{eB} < f_{Sc} / \gamma_{MS} = 0,2 / 1,5 = 0,133 \text{ N/mm}^2$$

f_{Sc} = resistenza a taglio dell'anima = $0,2 \text{ N/mm}^2$ per poliuretano

$$V_S = (1,35 \cdot 0,133 + 1,5 \cdot 2) \cdot 4 / 2 = \mathbf{6,36} \text{ kN/m}$$

$$\tau_C = 6,36 \cdot (B(\text{mm}) / 1000) / (8,6353 \cdot 1,00) = \mathbf{0,075} \text{ kN/cm}^2 < 0,133 \text{ n/mm}^2$$

La verifica a schiacciamento dell'anima sull'appoggio è eseguita in base alla seguente espressione (E.4.3.2):

$$F_{R1} = B \cdot (L_s + 0,5 \cdot k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_{Mc} \quad \text{in cui}$$

$$L_s = \text{larghezza di appoggio} = 50 \text{ mm}$$

$$k = \text{fattore di distribuzione} = 0,5$$

$$f_{Cc} = \text{resistenza a compressione caratteristica dell'anima} = 0,22 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{Mc} = \text{coefficiente di sicurezza per lo schiacciamento} = 1,4$$

$$F_{R1} = 100 \cdot (5 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot 8,635) \cdot 0,022 / 1,4 = \mathbf{11,2} \text{ kN} > 6,52 \text{ kN} (*)$$

$$(*) 6,52 = 6,36 \cdot B(\text{mm})/1000 \text{ riferito alla larghezza del pannello}$$

La verifica di deformazione è eseguita in base alla seguente espressione (tab. E.10.2)

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

$$\text{in cui: } k = 0,328 \quad ; \quad \beta = 0,119$$

$$\text{in base alla combinazione frequente risulta } f = \mathbf{27} \text{ mm} > L/200 = 20 \text{ mm}$$

la verifica non è soddisfatta ed è quindi necessaria una riduzione del carico variabile di progetto che risulta essere $\mathbf{1,4} \text{ kN/m}^2$.

Di seguito si riporta il calcolo completo come eseguito dal programma automatico Sandwich con un carico di progetto uniformemente distribuito pari a $\mathbf{2} \text{ kN/m}^2$.

CALCOLO SOLLECITAZIONI - DEFORMAZIONI							
PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA E UNA PIANA O POCO PROFIL.			PROGETTO COME ELEMENTO DI COPERTURA				
			S.L.U. $S_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Ql} \cdot [\psi_{0i} \cdot Q_{ki}]$ $\gamma_G = 1,35$ (neve) $\gamma_Q = 1,5$ (vento) $\gamma_{Ql} = 1$ (temperatura) $\psi_0 = 0,6$ $\psi_0 = 0,6$ $\psi_0 = 0,6$				
AREA DELLA FACCIA ESTERNA $A_{F1} = 7,49 \text{ cm}^2$ AREA DELLA FACCIA INTERNA $A_{F2} = 5,32 \text{ cm}^2$ AREA DEL MATERIALE IN ANIMA $A_c = 869,08 \text{ cm}^2$			S.L.S. (combinazione frequente per deformata) $S_d = \sum G_{kj} + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum \psi_{0i} \cdot \psi_{1j} \cdot Q_{kj}$ neve o eserc. vento temperatura $\psi_1 = 1$ $\psi_1 = 0,75$ $\psi_1 = 1$ EN14509 1 1 1				
MODULI DI ELASTICITA' E DI TAGLIO		$E_{F1} = 210000$	faccia esterna	faccia interna	anima		
DISTANZA TRA GLI APPOGGI		$L = 4,00$	costante		m		
CARICHI PERMANENTI / m		$g = 0,133$	p.p. pan.	0,133	kN/m		
CARICO DOVUTO ALLA NEVE / m		$p =$	/ m larghezza		kN/m		
CARICO VIVO DI ESERCIZIO / m		$q = 2,000$	/ m larghezza		kN/m		
CARICO DOVUTO AL VENTO / m		$w =$	PRESS.	DEPR.	kN/m		
TEMPERATURE DI PROGETTO		$T_1 =$	EST. 55	INT. 55	°C		
FRECCIA AMMISSIBILE		$L / f_a =$	BR.DUR. 200	LG.DUR. 100			
SCHEMA STATICO DI PROGETTO		elemento	appoggiato		2 appoggi		
ASCISSA DI RIFERIMENTO		$X =$	2,00	4,00	m		
			M max	T max			
PARAMETRI DI RIGIDENZA							
			$G_c = 3,2$		N/mm ²		
					$B_{F1} = 320721$ kNcm ²		
					$B_{F2} = 0$ kNcm ²		
					$B_s = 5E+06$ kNcm ²		
					$k_c = 0,3282$ campata		
					$k_a = 0,4103$ app. int.		
					$\theta = 0$ cm ⁻¹		
SOLLECITAZIONI MASSIME PER LO STATO LIMITE ULTIMO							
FORZE E MOMENTI		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME	u.m.	
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A =$	6,36		kN	0,27		kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B =$	6,36		kN	0,27		kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y =$	635,91	0,00	kNcm	26,60	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} =$	0,00	6,36	kN	0,00	0,27	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} =$	0,00	6,36	kN	0,00	0,27	kN
SOLLECITAZIONI MASSIME E DEFORMAZIONE PER LO STATO LIMITE DI SERVIZIO							
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME	u.m.	
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A =$	4,27		kN	0,27		kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B =$	4,27		kN	0,27		kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y =$	426,60	0,00	kNcm	26,60	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} =$	0,00	4,27	kN	0,00	0,27	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} =$	0,00	4,27	kN	0,00	0,27	kN
FRECCIA MAX IN CAMPATA	$f_{max} =$	27,04		mm	1,69		mm
SOLLECITAZIONI E DEFORMAZIONE PER EFFETTO DEL GRADIENTE DI TEMPERATURA							
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME	u.m.	
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A =$	0,000		kN	0,00		kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B =$	0,000		kN	0,00		kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y =$	0,000	0,000	kNcm	0,00	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} =$	0,000	0,000	kN	0,00	0,00	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} =$	0,000	0,000	kN	0,00	0,00	kN
FRECCIA MAX IN CAMPATA	$f_{max} =$	0,00		mm	0,00		mm

Il foglio seguente illustra il calcolo delle sollecitazioni per la verifica allo scorrimento che nel caso

in esame non è rilevante poiché generate solo dal peso proprio del pannello

CALCOLO SOLLECITAZIONI - DEFORMAZIONI PER VERIFICA ALLO SCORRIMENTO

AREA DELLA FACCIA ESTERNA $A_{F1} = 7,49 \text{ cm}^2$
 AREA DELLA FACCIA INTERNA $A_{F2} = 5,32 \text{ cm}^2$
 AREA DEL MATERIALE IN ANIMA $A_c = 869,08 \text{ cm}^2$

ELEMENTO DI COPERTURA

S.L.U.
 $S_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q1} \cdot [\psi_{0i} \cdot Q_{ki}]$

$\gamma_G = 1,35$ neve $\gamma_Q = 1,5$ vento $\gamma_o = 1$ temperatura
 $\psi_0 = 0,6$ $\psi_0 = 0,6$ $\psi_0 = 0,6$

S.L.S. (combinazione frequente per deformata)
 $S_d = \Sigma G_{kj} + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \Sigma \psi_{0i} \cdot \psi_{1j} \cdot Q_{kj}$

neve o eserc. vento temperatura
 $\psi_1 = 1$ $\psi_1 = 0,75$ $\psi_1 = 1$

	permanenti	carico neve		
MODULI AL TAGLIO RIDOTTI	$G_{ct,p} = 0,4$	$G_{ct,n} = 0,941$	N/mm ²	
DISTANZA TRA GLI APPOGGI	L = 4,00	costante	m	CARICHI AGGIUNTIVI
CARICHI PERMANENTI / m	g = 0,13	/ m larghezza	kN/m	p.g = 0,000 kN/m
CARICO DOVUTO ALLA NEVE / m	p = 0,00	/ m larghezza	kN/m	p.p = 0,000 kN/m
CARICO VIVO DI ESERCIZIO / m	q = 0,00	/ m larghezza	kN/m	PARAMETRI DI RIGIDEZZA
CARICO DOVUTO AL VENTO / m	w = 0	0	kN/m	$B_s = 5E+06 \text{ kNcm}^2$
TEMPERATURE DI PROGETTO	$T_i = 55$	55	°C	$k_{p,c} = 2,6259$ campata
FRECCIA AMMISSIBILE	L / f _s = 200	SCORR. 100		$k_{n,c} = 1,116$
SCHEMA STATICO DI PROGETTO	elemento	APP.		$k_{p,a} = 3,2824$ app. int.
ASCISSA DI RIFERIMENTO	X = 2,00	4,00	m	$k_{n,a} = 1,395$
	M max	T max		$\theta = 0 \text{ cm}^{-1}$

SOLLECITAZIONI MASSIME PER LO STATO LIMITE ULTIMO

FORZE E MOMENTI		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME		u.m.
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A = 0,36$			kN		0,27	kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B = 0,36$			kN		0,27	kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y = 35,91$	0,00		kNcm	26,60	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} = 0,00$	0,36		kN	0,00	0,27	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} = 0,00$	0,36		kN	0,00	0,27	kN

SOLLECITAZIONI MASSIME E DEFORMAZIONE PER LO STATO LIMITE DI SERVIZIO

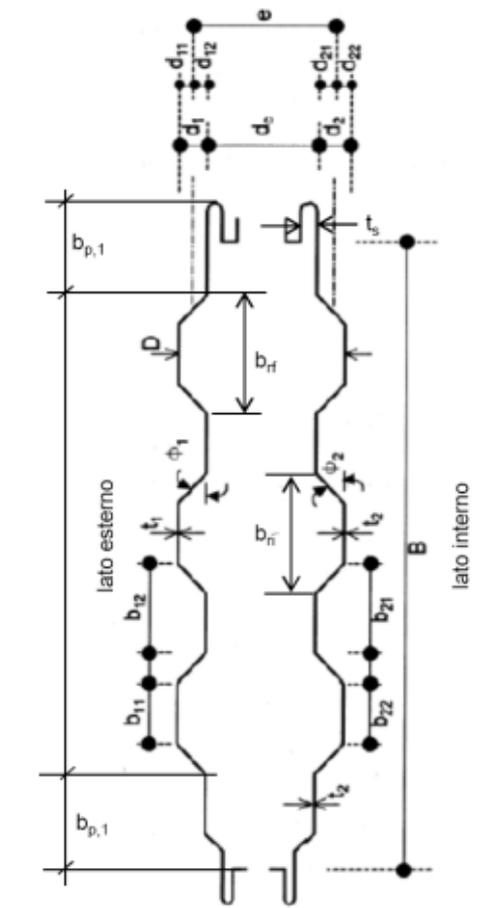
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME		u.m.
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A = 0,27$			kN		0,27	kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B = 0,27$			kN		0,27	kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y = 26,60$	0,00		kNcm	26,60	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} = 0,00$	0,27		kN	0,00	0,27	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} = 0,00$	0,27		kN	0,00	0,27	kN
FRECCIA MAX IN CAMPATA	$f_{max} = 5,42$			mm	8,78		mm

SOLLECITAZIONI E DEFORMAZIONE PER EFFETTO DEL GRADIENTE DI TEMPERATURA

FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME		u.m.
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A = 0,000$			kN		0,00	kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B = 0,000$			kN		0,00	kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y = 0,000$	0,000		kNcm	0,00	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} = 0,000$	0,000		kN	0,00	0,00	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} = 0,000$	0,000		kN	0,00	0,00	kN
FRECCIA MAX IN CAMPATA	$f_{max} = 0,00$			mm	0,00		mm

Il foglio che segue riporta le caratteristiche dei materiali delle facce e dell'anima insieme alle sollecitazioni di progetto e definisce la geometria della sezione trasversale del pannello

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE E SOLLECITAZIONI MASSIME									
TIPO COMPANY - GLAMET			PANNELLO PROGETTATO COME ELEMENTO DI COPERTURA						
LAMIERA EST.	ACCIAIO	S280GD-EN10147	$f_{ye} = \text{N/mm}^2$	280	$\alpha =$	0,000012			
LAMIERA INT.	ACCIAIO	S280GD-EN10147	$f_{yi} = \text{N/mm}^2$	280	$\alpha =$	0,000012			
irrigid. esterno trapezio	nessun irrigidim. interno	GRECA ESTERNA SPORGENTE	GRECA INTERNA SPORGENTE						
TIPO DI MATERIALE IN ANIMA	SPESS. (mm)	ρ_p (kg/m ³)	c.s. neve	c.s. perm.	$f_{cc} = \text{N/mm}^2$	$f_{sc} = \text{N/mm}^2$	λ W/mK		
schiuma poliuretanic rigida	78,96	40	2,40	7,00	0,22	0,2	0,024		
u.m./m	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.			u.m./m	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.				
	SEZIONE IN CAMPATA		SEZIONE ALL'APPOGGIO		SEZIONE IN CAMPATA		SEZIONE ALL'APPOGGIO		
kNm	$M_{s.c.1} =$	635,91	$M_{s.a.1} =$	0,00	kNm	$M_{s.c.1} =$	426,60	$M_{s.a.1} =$	0,00
kNm	$M_{s.c.2} =$	26,60	$M_{s.a.2} =$	0,00	kNm	$M_{s.c.2} =$	26,60	$M_{s.a.2} =$	0,00
kN	$V_{s.c} =$	0,00	$F_{s.a.i} =$	6,36	kN	$V_{s.c} =$	0,00	$F_{s.a.i} =$	4,27

MODELLO DI CALCOLO		lato esterno	
			
			

Altezza totale del profilo	D = mm	120,00
Altezza anima interna	$d_c =$ mm	79,48
Larghezza totale del pannello	$B_t =$ mm	1050
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	25
N° irrigidimenti faccia esterna	$n_s =$	4
N° irrigidimenti faccia interna	$n_i =$	
Dist. 1° irrigidim. esterno-bordo	$b_{p,1} =$ mm	90,00
Dist. 1° irrigidim. interno-bordo	$b_{p,i} =$ mm	
Dist. 1° piega anima da faccia est.	$h_a =$ mm	
Dist. 1° piega anima da faccia int.	$h_b =$ mm	
Larghezza irrigidimento esterno	$b_{r1} =$ mm	70,00
Larghezza irrigidimento interno	$b_{ri} =$ mm	
Spessore spine di innesto	$t_s =$ mm	5,00
Altezza irrigidim. esterno trapezio	$u_{er} =$ mm	40,00
Altezza irrigidim. interno trapezio	$u_{ir} =$ mm	
Inclinazione irrigidimento esterno	$\alpha_{er} =$ deg	60,00
Inclinazione irrigidimento interno	$\alpha_{ir} =$ deg	
Inclinazione piega dell'anima	$\alpha_a =$ deg	
Altezza irrigidimento esterno	$d_1 =$ mm	40,00
Altezza irrigidimento interno	$d_2 =$ mm	0,00
Eccentricità tra i baric. delle facce	e = mm	86,353
Distanza baric. est.-bordo irrigid.	$d_{11} =$ mm	32,208
Distanza baric. est.-asse faccia	$d_{12} =$ mm	7,792
Distanza baric. int.-bordo irrigid.	$d_{22} =$ mm	0,919
Distanza baric. int.-asse faccia	$d_{21} =$ mm	0,919
Area della sezione metallica	A = cm ²	12,81
Posizione asse baricentrico	$z_G =$ mm	51,7
Momento di inerzia faccia esterna	$I_{ext} =$ cm ⁴	15,272
Momento di inerzia faccia interna	$I_{int} =$ cm ⁴	0,201
Modulo di resist. faccia esterna	$W_{el,c} =$ cm ³	4,742
Modulo di resist. faccia interna	$W_{el,t} =$ cm ³	2,189
Area di taglio faccia esterna	$A_{V,F1} =$ cm ²	2,11
Area di taglio faccia interna	$A_{V,F2} =$ cm ²	0,00
Peso del pannello / m2	p = kg/m²	13,28

In questa sezione del programma viene eseguita la distribuzione del momento tra anima e faccia

profilata e sono eseguite le verifiche di resistenza delle componenti del pannello

PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA ED UNA PIANA												
u.m./m kN ; cm		SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.			u.m./m kN ; cm		SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.					
		AZIONI MASSIME	AZIONI MINIME				AZIONI MASSIME	AZIONI MINIME				
campata	$M_{F,i}$	75,67	$M_{F,i}$	3,17	campata	$M_{F,i}$	50,76	$M_{F,i}$	3,17			
	M_S	560,24	M_S	23,43		M_S	375,84	M_S	23,43			
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	$F_{S,a}$	6,36	$F_{S,a}$	0,27	reazione	$F_{S,a}$	4,27	$F_{S,a}$	0,27			
	sollecitazioni per la condizione normale					sollecitazioni per la condizione normale						
Fattori di sicurezza del materiale							S.L.U.	S.L.S.				
resistenza allo snervamento di una faccia							1,10	1,00				
resistenza a taglio dell'anima							1,50	1,10				
resistenza a taglio di una faccia profilata							1,10	1,00				
raggrinzamento di una faccia in campata							1,25	1,10				
interazione reazione-raggrinzamento							1,25	1,10				
schiacciamento dell'anima							1,40	1,10				
resistenza alla reazione di appoggio							1,10	1,00				
VERIFICA DI RESISTENZA IN CAMPATA							elemento	coefficienti di rigidezza		β	β_0	β_s
							appoggiato	0	0,19045985	0	0,87329901	
							appoggiato	0,11899711	0,1100113	0,38249853	0,23144089	
faccia piana o leggermente profilata												
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$		88,8	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$		59,6	<	254,5	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$		0,0	<	280,0	N/mm ²				
faccia profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.)												
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F11} = \sigma'_{F1} + M_{F1}/F_{11} \cdot d_{11} =$		252,4	<	254,5	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F12} = \sigma'_{F1} - M_{F1}/F_{11} \cdot d_{12} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F11} = \sigma'_{F1} + M_{F1}/F_{11} \cdot d_{11} =$		169,3	<	280,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F12} = \sigma'_{F1} - M_{F1}/F_{11} \cdot d_{12} =$		0,0	<	280,0	N/mm ²				
faccia piana o leggermente profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.) ; j = 1 o 2												
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		0,0	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		125,1	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		83,9	<	280,0	N/mm ²				
VERIFICA DI RESISTENZA ALL'APPOGGIO							elemento	coefficienti di rigidezza		β	β_0	β_s
							appoggiato	0	0,19045985	0	0,87329901	
							appoggiato	0,13222211	0,12129877	0,4311128	0,26467947	
faccia profilata												
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} + M_{F1}/F_{11} \cdot d_{11} =$		0,0	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F12} = \sigma_{F1} - M_{F1}/F_{11} \cdot d_{12} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} + M_{F1}/F_{11} \cdot d_{11} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F12} = \sigma_{F1} - M_{F1}/F_{11} \cdot d_{12} =$		0,0	<	280,0	N/mm ²				
materiale isolante e irrigidimenti												
ANIMA	S.L.U.	tensione di taglio anima	$\tau_C = V_s / (e \cdot B) =$		0,075	<	0,133	N/mm ²				
		tensione di taglio flangia est.	$\tau_{F1} = V_{F1} / A_{V,F1} =$		30,9	<	147,0	N/mm ²				
		tensione di taglio flangia int.	$\tau_{F2} = V_{F2} / A_{V,F2} =$		0,0	<	147,0	N/mm ²				
faccia piana o leggermente profilata												
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F21} = \sigma_{F2} + M_{F2}/F_{21} \cdot d_{21} =$		0,0	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2}/F_{21} \cdot d_{22} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F21} = \sigma_{F2} + M_{F2}/F_{21} \cdot d_{21} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2}/F_{21} \cdot d_{22} =$		0,0	<	280,0	N/mm ²				

Le verifiche di resistenza alla reazione di appoggio sono riportate nel foglio che segue insieme alla

verifica di deformazione che, per il carico considerato (2 kN/m^2) e lo schema di semplice appoggio, non è soddisfatta

RESISTENZA ALLA REAZIONE DI APPOGGIO - & E.4.3.2					
u.m./m	REAZIONI PER LO S.L.U.		u.m./m	REAZIONI PER LO S.L.S.	
	APPOGGIO ESTERNO	APPOGGIO INTERNO		APPOGGIO ESTERNO	APPOGGIO INTERNO
kN	$F_{S,a,e} = 6,36$	$F_{S,a,i} = 6,36$	kN	$F_{S,a,e} = 4,27$	$F_{S,a,i} = 4,27$
Fattori di sicurezza del materiale					
				S.L.U.	S.L.S.
interazione reazione-raggrinzamento				1,25	1,10
schiacciamento dell'anima				1,40	1,10
resistenza alla reazione di appoggio				1,10	1,00
Eccentricità di progetto $e = 86,35$ mm $\leq 86,35$ mm					
Parametro di distribuzione $k = 0,50$ schiuma plastica rigida o vetro cellulare					
Larghezza appoggio esterno $L_{s,e} = 50$ mm					
Larghezza appoggio interno $L_{s,i} = 50$ mm					
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DELL'ANIMA - APPOGGIO DI ESTREMITA'					
$F_{Re} = B \cdot (L_{s,e} + 0,5 \cdot k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_M = 11,25$ kN > 6,52 kN (rif. larghezza pannello)					
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DELL'ANIMA - APPOGGIO INTERMEDIO					
$F_{Ri} = B \cdot (L_{s,i} + k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_M = 14,64$ kN > 6,52 kN (rif. larghezza pannello)					
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLA REAZIONE DI APPOGGIO DI UNA FACCI A PROFILATA in sicurezza ▼					
$R_{w,Rd} = \alpha r^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 I_a / t} \right] \left[2,4 + (\phi/90)^2 \right] / \gamma_{M1}$ $r/t = 1$					
$R_{w,Rd} = 6,52$ kN > 6,52 kN (rif. larghezza pannello)					
- INTERAZIONE REAZIONE-RAGGRINZAMENTO ALL'APPOGGIO INTERMEDIO					
$(\sigma_F / f_d)_{max} + F_{S,a} / F_R = 1,00$ < 1,25					
VERIFICA DI DEFORMAZIONE - & E.5.5 b					
combinazione carichi unif. $f_{max,1} = \begin{array}{ c c } \hline \text{Az. Max.} & \text{Az. Min.} \\ \hline 27,04 & 1,69 \\ \hline \end{array}$ mm (rif. larghezza effettiva pannello)					
gradiente termico $f_{max,2} = \begin{array}{ c c } \hline \text{Az. Max.} & \text{Az. Min.} \\ \hline 0,00 & 0,00 \\ \hline \end{array}$ mm					
combinazione frequente $f_{max} = 27,04$ mm < 20,00 mm per tetti					
VERIFICA ALLO SCORRIMENTO - PANNELLO DI COPERTURA - & E.5.4					
combinazione carichi unif. $f_{max,1} = \begin{array}{ c c } \hline \text{Az. Max.} & \text{Az. Min.} \\ \hline 5,42 & \end{array}$ mm (rif. larghezza effettiva pannello)					
gradiente termico $f_{max,2} = \begin{array}{ c c } \hline \text{Az. Max.} & \text{Az. Min.} \\ \hline 0,00 & \end{array}$ mm					
combinazione frequente $f_{max} = 5,42$ mm < 40,00 mm					

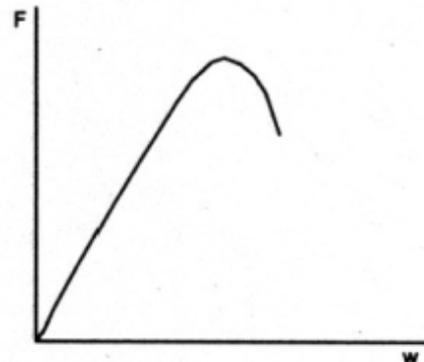
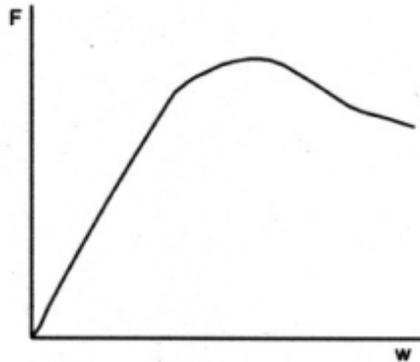
1.2 Pannello continuo su 3 appoggi

Lo stesso pannello dell'esempio precedente viene analizzato per uno schema statico di elemento continuo su 3 appoggi con campate uguali di luce $L = 4$ m.

Si fa notare che per pannelli con una faccia profilata ed una piana non viene definita dalla norma una procedura di verifica ma si fa accenno ad una riduzione del momento sugli appoggi interni (*momento residuo non nullo*) con conseguente incremento del momento in campata quando il diagramma carico-deformazione evidenzia un comportamento duttile:

E.4.2 Resistenza residua a flessione ad un appoggio intermedio

Se il grafico carico-deformazione, determinato in accordo con A.7, è simile a quello mostrato in Figura E.2 a), il raggiungimento del massimo momento flettente ad un appoggio interno corrisponde ad uno stato limite di servizio. Inoltre, dove richiesto, si deve determinare un momento residuo non nullo e si deve includere nei calcoli allo stato limite ultimo. Se il grafico carico-deformazione decresce rapidamente, come mostrato in Figura E.2 b), il raggiungimento del massimo momento flettente ad un appoggio interno deve essere considerato corrispondente allo stato limite ultimo.



Legenda:
F carico
w deformazione

Figura E.2 a) – Grafico carico-deformazione
(rottura graduale con ampia porzione decrescente)

Figura E.2 b) – Grafico carico-deformazione
(rottura immediata con rapida caduta di carico)

Il momento ridotto sugli appoggi interni viene poi distribuito tra anima e flangia profilata secondo un criterio “semplificato” detto “*delle curve di progetto del fattore di riduzione β* ” riportato nel libro di Davies (capitolo 9). L’analisi elastica può, come spesso accade, evidenziare una capacità di carico del pannello continuo inferiore a quella dello stesso pannello considerato semplicemente appoggiato. Quando è dominante la tensione di flessione ad un appoggio interno è possibile eseguire una analisi plastica solo per lo S.L.U. purchè il primo modo di rottura non sia la rottura a taglio dell’anima (item E.7.2.1 - EN 14509).

E.7.2.3 Analisi plastica

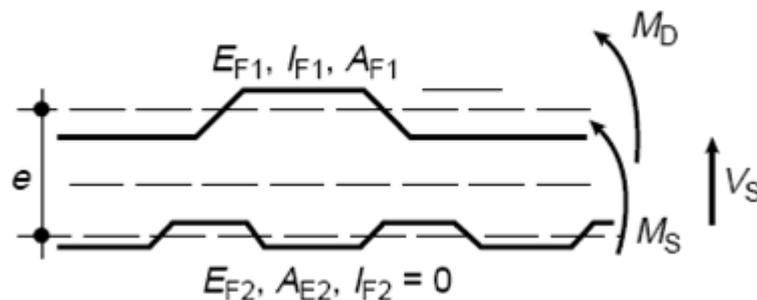
La distribuzione del momento flettente allo stato limite ultimo in un elemento sandwich continuo può essere scelta arbitrariamente, posto che le risultanti delle tensioni interne siano in equilibrio con le azioni, che devono essere uguali o più elevate della combinazione più sfavorevole delle azioni, combinate con i rispettivi fattori, e che le risultanti della tensione interna non superino in nessun punto la resistenza plastica della sezione trasversale.

NOTA Nel calcolo di analisi plastica allo stato limite ultimo, un pannello continuo sandwich su più campate può essere rimpiazzato da una serie di pannelli semplicemente appoggiati con resistenza a flessione nulla agli appoggi intermedio. In questo modello di calcolo, le tensioni causate dalla differenza di temperatura tra le facce svanisce nei pannelli sandwich con facce piane o leggermente profilate.

In alternativa, la procedura di prova in E.4.2 permette di determinare un momento residuo non nullo all'appoggio interno. I momenti flettenti all'appoggio interno allo stato limite ultimo possono essere scelti uguali o inferiori al momento di resistenza non elastico così determinato e ridotti da un fattore di sicurezza del materiale in accordo con la Tabella E9.

Il criterio di verifica in campo plastico, o per la precisione in campo elasto-plastico, è stato da me impostato sulla base della norma EN 1993-1-3 considerando la lamiera profilata isolata dal contesto e soggetta ad un momento flettente quale parte del momento ridotto sull'appoggio interno.

Utilizziamo quindi il criterio semplificato illustrato nel paragrafo 9.4 del libro di Davies ovvero le curve di progetto dei fattori di riduzione β riportate nel paragrafo 9.7 per i casi di campate multiple su 3 e 4 appoggi soggette a carico uniforme e a variazione di temperatura tra le facce. Per l'utilizzo degli abachi si deve fare riferimento allo schema di seguito riportato e alle rigidezze di seguito definite (9.114):



$$B_S = \frac{E_{F1} A_{F1} E_{F2} A_{F2} e^2}{E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2}} \quad B_D = E_{F1} I_{F1} \quad k = \frac{B_S}{A_C G_{\text{eff}} L^2}$$

in cui $G_{\text{eff}} = G_c \cdot e/d_c$ (d_c = spessore dell'anima)

$$G_{\text{eff}} = 3,2 \cdot 8,6353 / 7,896 = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

La procedura consiste nel determinare il momento M sull'appoggio intermedio secondo la teoria convenzionale. Tale momento viene modificato in due passaggi. Innanzitutto viene ridotto dal fattore β_S per tener conto del comportamento sandwich del pannello (risposta parzialmente

elastica al taglio). Il momento ridotto viene poi moltiplicato per il fattore β_0 che definisce come tale momento viene distribuito tra faccia profilata e anima.

Le curve dei fattori di riduzione β sono definite in funzione del fattore di taglio k e del rapporto di rigidezze B_D/B_S come di seguito rappresentato.

Nel caso in esame si ha:

$$B_S = 4,87 \cdot 10^6 \text{ kNcm}^2$$

$$B_D/B_S = E_{F1} \cdot I_{F1} / B_S = 21000 \cdot 15,272 / 4,87 \cdot 10^6 = 0,066$$

$$k = 4,87 \cdot 10^6 / (869,08 \cdot 0,35 \cdot 400^2) = 0,10$$

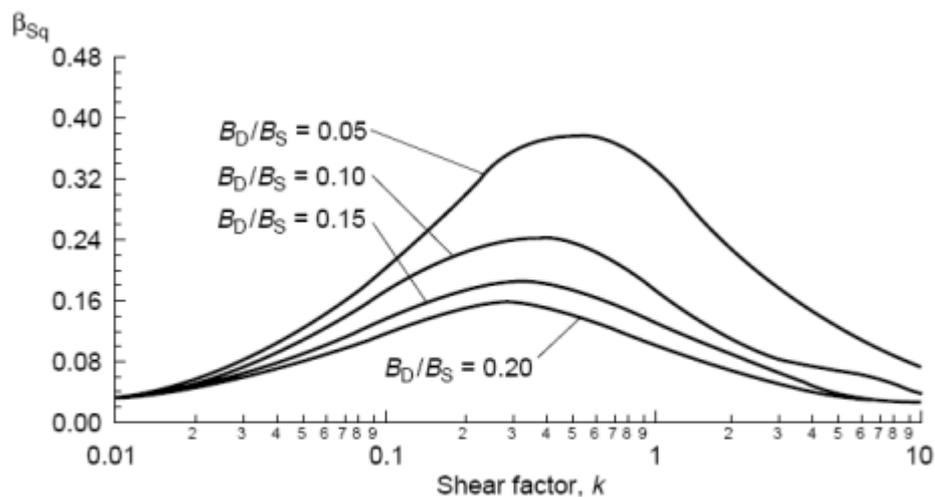


Fig. 9.15 Reduction factor β_{sq} for two-span panels under uniformly distributed load.

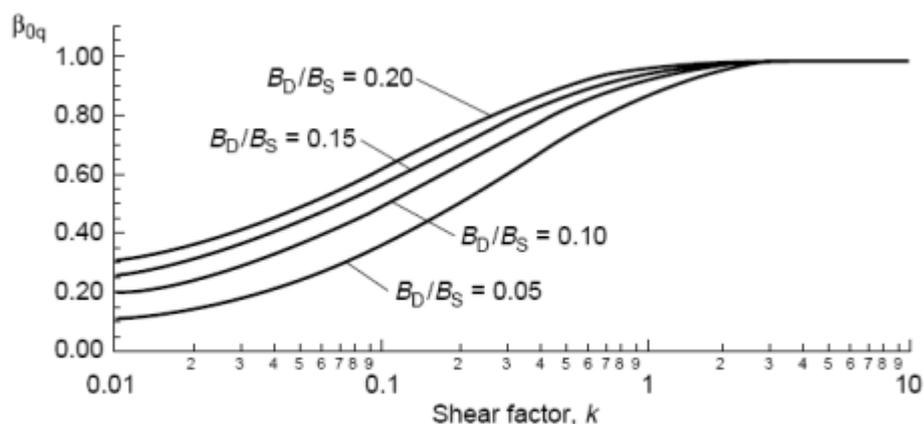
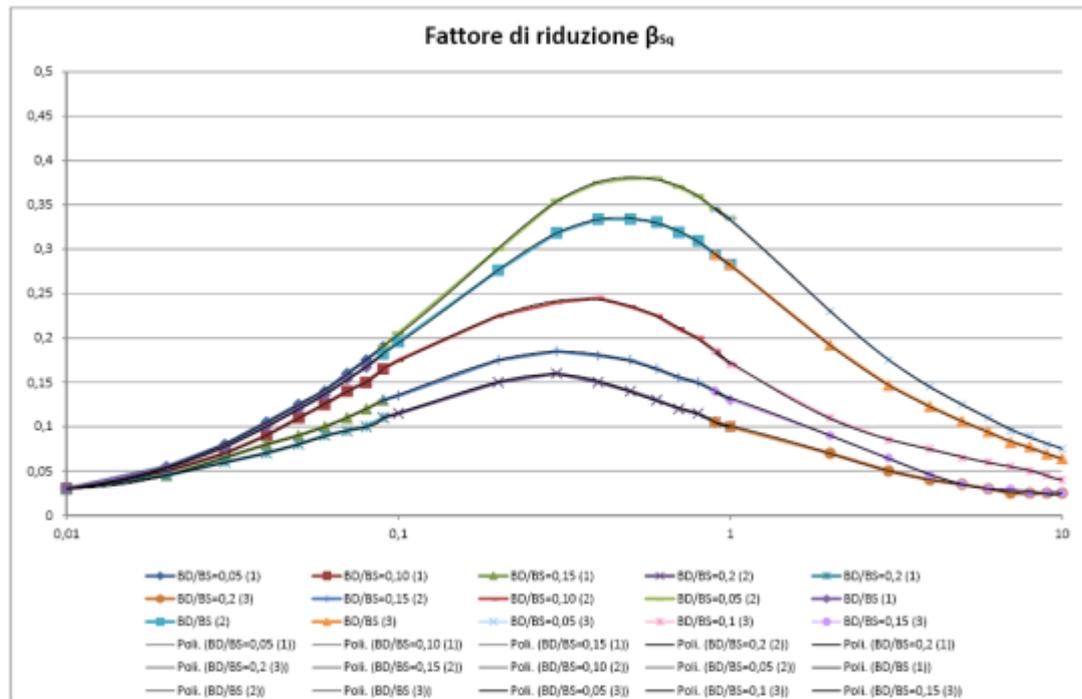


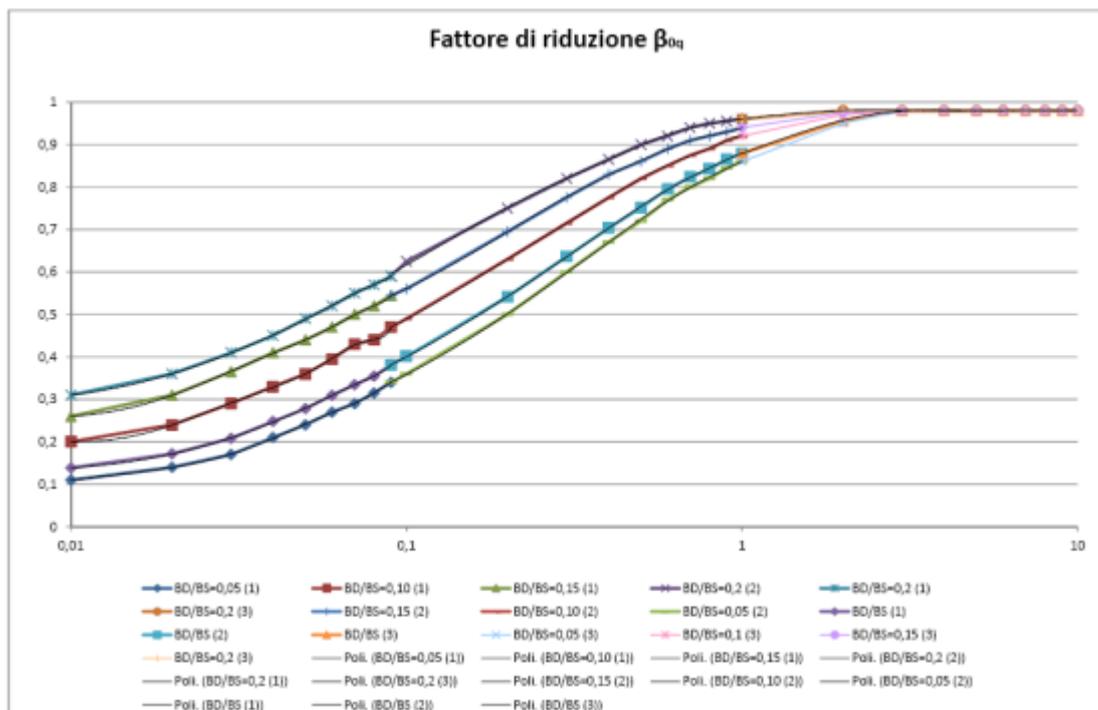
Fig. 9.16 Reduction factor β_{0q} for two-span panels under uniformly distributed load.

Le curve soprariportate sono state espresse in forma algoritmica con formule esponenziali di

grado 6 e i valori intermedi, rappresentati dal rapporto B_D/B_S , sono stati ottenuti per interpolazione lineare. Le stesse curve sono di seguito rappresentate per il **caso in esame**.



La seconda curva dall'alto rappresenta il rapporto $B_D/B_S = 0,066$; in corrispondenza di $k = 0,10$ si ottiene $\beta_{Sq} = 0,194$



La seconda curva dal basso rappresenta il rapporto $B_D/B_S = 0,066$; in corrispondenza di $k = 0,10$ si ottiene $\beta_{0q} = 0,4$

La parte di momento attribuita alla faccia profilata è data da (Davies 9.119):

$$M_D = \frac{\beta_{0q} M}{1 + \beta_{Sq}} \quad \text{with } M = \frac{qL^2}{8}$$

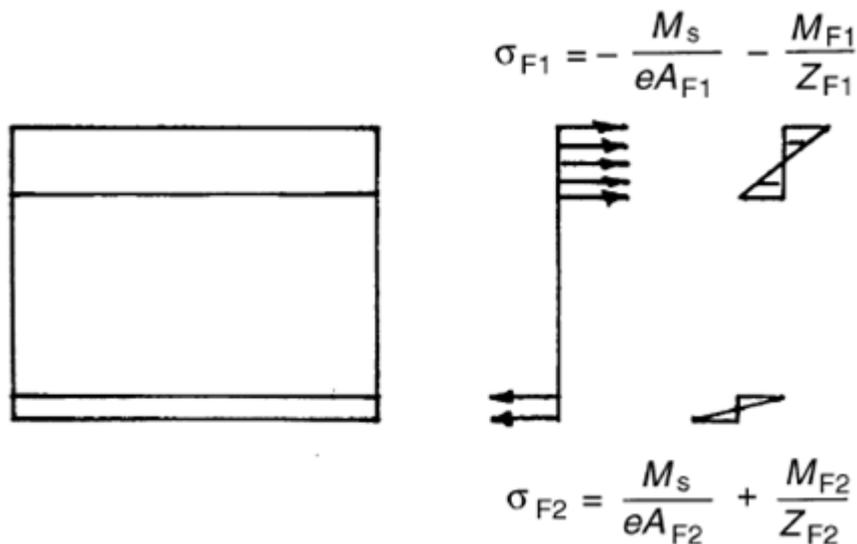
$$M_D = M_{F1} = 635,91 \cdot 0,4 / (1 + 0,194) = 213,25 \text{ kNcm/m}$$

La parte di momento attribuita all'anima è data da (Davies 9.120)

$$M_S = \frac{(1 - \beta_{0q})M}{1 + \beta_{Sq}}$$

$$M_S = 635,91 \cdot (1 - 0,4) / (1 + 0,194) = 319,22 \text{ kNcm/m}$$

La **tensione di trazione** al lembo esterno della faccia profilata sull'appoggio intermedio è ricavata dalla seguente figura (Davies) capovolta nel caso di trazione nella faccia superiore.



Ovvero dalla seguente espressione cambiata di segno (Davies fig. 9.9)

$$\sigma_{F1} = M_s / (e \cdot A_{F1}) + M_{F1} / Z_{F1}$$

Secondo la norma EN 14509 – allegato E la tensione di trazione al lembo esterno della faccia profilata è data dalle seguenti espressioni cambiate di segno:

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

$$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} - \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{11}$$

Nel caso in esame si ottiene:

$$\sigma_{F11} = [319,22 / (8,6353 \cdot 7,49) + 213,25 / 15,272 \cdot 3,22] \cdot B(\text{mm})/1000 \text{ (kN/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{F11} = 511,6 \text{ N/mm}^2 > 254,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (per acciaio S 280 GD e } \gamma_M = 1,1\text{)}$$

Se si vuole contenere la tensione di trazione al lembo esterno della faccia profilata, calcolata con analisi elastica, entro il limite della resistenza a trazione è necessaria una forte riduzione del carico di progetto e, a parità di tutte le altre condizioni, si avrebbe il paradosso che lo stesso pannello, considerato semplicemente appoggiato, sopporterebbe un carico maggiore.

Il criterio che qui si vuole proporre è quello dell'analisi elastica-parzialmente plastica già introdotta dalla norma EN 1993-1-3 & 6.1.4.2 per le lamiere grecate quando **la tensione di snervamento è raggiunta prima dalla parte tesa**.

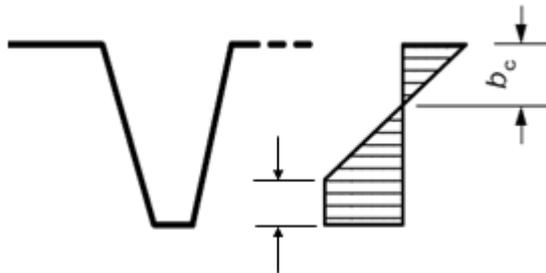


Fig. 3.23

Viene quindi ricercato il modulo di resistenza elastico-parzialmente plastico della sezione (W_{pp} , e_l) attraverso la definizione dei parametri rappresentati nella figura precedente e del rapporto tensionale ψ tra le estremità della greca tenendo presente che :

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

$$\sigma_{F12} = \sigma_{F1} + \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{12}$$

$$\sigma_{F12} = [319,22 / (8,6353 \cdot 7,49) - 213,25 / 15,272 \cdot 3,22] \cdot B(\text{mm})/1000 \text{ (kN/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{F12} = -60,92 \text{ N/mm}^2$$

$$\psi = \sigma_{F11} / \sigma_{F12} = -8,397 < -1 \text{ (snervamento raggiunto prima al lembo teso)}$$

$$x = d_1 \cdot (-\psi - 1) / (1 - \psi) = 40 \cdot (8,397 - 1) / (1 + 8,397) = 31,49 \text{ mm}$$

$$b_c = (d_1 - x) / 2 = (40 - 31,49) / 2 = 4,26 \text{ mm}$$

Con riferimento allo stato tensionale rappresentato nella figura precedente il modulo di resistenza elastico-parzialmente plastico è ottenuto dalla somma delle aree parziali della sezione moltiplicate per la distanza del baricentro dall'asse neutro e per la tensione di snervamento divisa per il coefficiente di sicurezza:

$$W_{pp,el} = 7,668 \text{ cm}^3 \text{ (riferita alla sezione completa del pannello)}$$

La tensione al lembo teso della greca è quindi:

$$\sigma_{F11} = [213,25 / 7,668] \cdot B(\text{mm})/1000 \cdot 10 = 285,06 \text{ N/mm}^2 > 254,5 \text{ N/mm}^2$$

ancora maggiore della tensione limite.

Occorre quindi ridurre il carico di progetto da **2 kN/m²** a **1,6 kN/m²** tenendo conto che deve essere soddisfatta anche la verifica di resistenza allo S.L.S. per la quale non è applicabile l'analisi plastica come esplicitamente detto dalla norma.

L'analisi plastica deve essere usata solo per lo stato limite ultimo e deve essere usata ogni volta che il calcolo è controllato dalle tensioni di flessione ad un appoggio interno. L'analisi plastica non deve essere usata quando il primo modo di rottura è una rottura a taglio dell'anima, a meno che il materiale dell'anima non abbia una adeguata resistenza plastica a taglio.

La verifica completa eseguita col programma di calcolo automatico **Sandwich** è riportata più avanti.

Si riporta qui il risultato della verifica per lo S.L.U. al lembo teso sull'appoggio interno con riferimento ad un carico di progetto di **1,6 kN/m²**

$$M_{F1} = 173 \text{ kNcm/m}$$

$$\sigma_{F11} = [173 / 7,668] \cdot B(\text{mm})/1000 \cdot 10 = 231,3 \text{ N/mm}^2 < 254,5 \text{ N/mm}^2$$

Per completezza del calcolo si riportano di seguito le altre verifiche fondamentali eseguite per un carico di progetto di $1,6 \text{ kN/m}^2$.

La verifica a taglio dell'anima è eseguita in base alla seguente espressione:

$$\tau_c = \frac{V_s}{eB} < f_{Sc} / \gamma_{MS} = 0,2 / 1,5 = 0,133 \text{ N/mm}^2$$

f_{Sc} = resistenza a taglio dell'anima = $0,2 \text{ N/mm}^2$ per poliuretano

$$V_s = (1,35 \cdot 0,133 + 1,5 \cdot 1,6) \cdot 4 / 2 \cdot [1 + 1 / (4 \cdot (1+k))] = 6,33 \text{ kN/m} \quad (k = 0,10)$$

$$\tau_c = 6,33 \cdot (B(\text{mm}) / 1000) / (8,6353 \cdot 1,00) = 0,075 \text{ kN/cm}^2 < 0,133 \text{ n/mm}^2$$

La verifica a schiacciamento dell'anima sull'appoggio interno è eseguita in base alla seguente espressione (E.4.3.2):

$$F_{R1} = B \cdot (L_s + k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_{Mc} \quad \text{in cui}$$

L_s = larghezza di appoggio = 100 mm

k = fattore di distribuzione = 0,5

f_{Cc} = resistenza a compressione caratteristica dell'anima = $0,22 \text{ N/mm}^2$

γ_{Mc} = coefficiente di sicurezza per lo schiacciamento = 1,4

$$F_{R1} = 100 \cdot (5 + 0,5 \cdot 8,635) \cdot 0,022 / 1,4 = 22,5 \text{ kN} > 12,98 \text{ kN} (*)$$

(*) $12,98 = 2 \cdot 6,36 \cdot B(\text{mm})/1000$ riferito alla larghezza del pannello

L'interazione reazione di appoggio – raggrinzamento produce il seguente risultato

$$\sigma_F / f_d + F_{s,a} / F_R = 96,5 / 224 + 12,98 / 22,5 = 1,01 < 1,25$$

simile a quello ottenuto dall'espressione riportata nel libro di Davies:

$$\sigma_F / f_d + [F_{s,a} / F_R]^2 = 96,5 / 224 + [12,98 / 22,5]^2 = 0,764 < 1$$

La verifica di deformazione in base alla combinazione frequente risulta:

$$f = 17,91 \text{ mm} < L/200 = 20 \text{ mm}$$

la freccia è calcolata nell'ipotesi di formazione della cerniera plastica sugli appoggi interni applicando il fattore di riduzione β .

La tensione di raggrinzamento sulla faccia inferiore piana è data da :

$$\sigma_{F2} = \frac{N_{F2}}{A_{F2}} = \frac{M_S}{e A_{F2}}$$

Cambiata di segno con riferimento allo stato di compressione

$$\sigma_{F2} = -[258,98 / (8,6353 \cdot 7,49)] = -96,5 \text{ N/mm}^2$$

Una considerazione va fatta sul valore resistente della tensione di raggrinzamento che dovrebbe essere determinata sperimentalmente. Nell'interpretazione letterale la norma fornisce un coefficiente di sicurezza pari a 1,25 per la tensione di raggrinzamento in campata e propone lo stesso coefficiente di sicurezza per l'interazione raggrinzamento – reazione di appoggio di pannelli continui.

L'esperienza, confortata da prove di carico da parte di alcuni produttori di pannelli sandwich, ha rilevato valori della resistenza al raggrinzamento in corrispondenza del momento ultimo, ben più bassi di quelli ottenibili applicando un coefficiente di sicurezza di 1,25 alla resistenza caratteristica del materiale. Il valore della resistenza al raggrinzamento è quindi un dato di input del programma Sandwich.

Il carico di progetto che soddisfa tutte le verifiche del pannello continuo è quindi maggiore del carico di progetto dello stesso pannello semplicemente appoggiato per il quale deve essere soddisfatta anche la verifica di deformazione. L'incremento della capacità di carico è quindi dato dal rapporto:

carico di progetto elemento continuo / carico di progetto elemento appoggiato

$$\rho = 1,6 / 1,4 = 1,143 \text{ ovvero } + 14,3 \%$$

Nelle pagine che seguono è presentata la verifica del pannello continuo come effettuata dal programma automatico Sandwich nei vari passaggi precedentemente esposti ovvero:

1. analisi elastica con carico uniforme di 2 kN/m^2
 2. analisi elasto-plastica con carico uniforme di 2 kN/m^2
 3. analisi elastoplastica con carico uniforme ridotto a $1,6 \text{ kN/m}^2$
- Il foglio dei dati di progetto iniziali e del calcolo delle sollecitazioni (fase 1) è il seguente:

CALCOLO SOLLECITAZIONI - DEFORMAZIONI					
PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA E UNA PIANA O POCO PROFIL.			PROGETTO COME ELEMENTO DI COPERTURA		
			S.L.U. $S_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot [\psi_{0i} \cdot Q_{ki}]$ $\gamma_G = 1,35$ neve $\gamma_{Q1} = 1,5$ vento $\gamma_{Q2} = 1$ temperatura $\psi_{0i} = 0,6$ $\psi_{0j} = 0,6$ $\psi_{0k} = 0,6$		
AREA DELLA FACCIA ESTERNA $A_{F1} = 7,49 \text{ cm}^2$ AREA DELLA FACCIA INTERNA $A_{F2} = 5,32 \text{ cm}^2$ AREA DEL MATERIALE IN ANIMA $A_c = 869,08 \text{ cm}^2$			S.L.S. (combinazione frequente per deformata) $S_d = \Sigma G_{kj} + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \Sigma \psi_{0i} \cdot \psi_{1j} \cdot Q_{ki}$ neve o eserc. vento temperatura $\psi_{1i} = 1$ $\psi_{1j} = 1$ $\psi_{1k} = 1$ EN14509 1 1 1		
MODULI DI ELASTICITA' E DI TAGLIO		$E_{F1} = 210000$	faccia esterna	faccia interna	anima
DISTANZA TRA GLI APPOGGI		$L = 4,00$	costante		m
CARICHI PERMANENTI / m		$g = 0,133$	p.p. pan. 0,133	kN/m	p.g. = 0,000
CARICO DOVUTO ALLA NEVE / m		$p =$	/ m larghezza	kN/m	p.p. = 0,000
CARICO VIVO DI ESERCIZIO / m		$q = 2,000$	/ m larghezza	kN/m	
CARICO DOVUTO AL VENTO / m		$w =$	PRESS. DEPR.	kN/m	
TEMPERATURE DI PROGETTO		$T_i =$	EST. 55	INT. 55	°C
FRECCIA AMMISSIBILE		$L / f_a =$	BR.DUR. 200	LG.DUR. 100	
SCHEMA STATICO DI PROGETTO		elemento	continuo		3 appoggi
ASCISSA DI RIFERIMENTO		$X =$	1,50	4,00	m
			M max	T max	
PARAMETRI DI RIGIDENZA					
			$G_c = 3,2$	N/mm ²	
			CARICHI AGGIUNTIVI		
			$B_{F1} = 320721$	kNcm ²	
			$B_{F2} = 0$	kNcm ²	
			$B_3 = 5E+06$	kNcm ²	
			$k_c = 0,1$	campata	
			$k_a = 0,1$	app. int.	
			$\theta = 0$	cm ⁻¹	
SOLLECITAZIONI MASSIME PER LO STATO LIMITE ULTIMO					
FORZE E MOMENTI		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME
REAZIONE APPOGGIO A		$R_A = 4,91$	kN	0,21	kN
REAZIONE APPOGGIO B		$R_B = 15,61$	kN	0,65	kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2	SEZ. 1	SEZ. 2
MOMENTO FLETTENTE IN X		$M_y = 425,29$	-532,46	kNcm	17,79
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X		$T_{sx} = 0,00$	7,80	kN	0,00
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X		$T_{dx} = 0,00$	7,80	kN	0,00
SEZ. 1		SEZ. 2	SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X		$M_y = 285,31$	-357,20	kNcm	17,79
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X		$T_{sx} = 0,00$	5,24	kN	0,00
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X		$T_{dx} = 0,00$	5,24	kN	0,00
FRECCIA MAX IN CAMPATA		$f_{max} = 18,18$	mm	1,13	mm
SOLLECITAZIONI MASSIME E DEFORMAZIONE PER LO STATO LIMITE DI SERVIZIO					
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME
REAZIONE APPOGGIO A		$R_A = 3,30$	kN	0,21	kN
REAZIONE APPOGGIO B		$R_B = 10,47$	kN	0,65	kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2	SEZ. 1	SEZ. 2
MOMENTO FLETTENTE IN X		$M_y = 285,31$	-357,20	kNcm	17,79
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X		$T_{sx} = 0,00$	5,24	kN	0,00
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X		$T_{dx} = 0,00$	5,24	kN	0,00
FRECCIA MAX IN CAMPATA		$f_{max} = 18,18$	mm	1,13	mm
SOLLECITAZIONI E DEFORMAZIONE PER EFFETTO DEL GRADIENTE DI TEMPERATURA					
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME
REAZIONE APPOGGIO A		$R_A = 0,000$	kN	0,00	kN
REAZIONE APPOGGIO B		$R_B = 0,000$	kN	0,00	kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2	SEZ. 1	SEZ. 2
MOMENTO FLETTENTE IN X		$M_y = 0,000$	0,000	kNcm	0,00
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X		$T_{sx} = 0,000$	0,000	kN	0,00
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X		$T_{dx} = 0,000$	0,000	kN	0,00
FRECCIA MAX IN CAMPATA		$f_{max} = 0,00$	mm	0,00	mm

Il foglio di calcolo per la verifica a scorrimento (non influente nell'esempio qui presentato per carico uniforme di breve durata) è il seguente:

CALCOLO SOLLECITAZIONI - DEFORMAZIONI PER VERIFICA ALLO SCORRIMENTO

AREA DELLA FACCIA ESTERNA $A_{F1} = 7,49 \text{ cm}^2$
 AREA DELLA FACCIA INTERNA $A_{F2} = 5,32 \text{ cm}^2$
 AREA DEL MATERIALE IN ANIMA $A_c = 869,08 \text{ cm}^2$

ELEMENTO DI COPERTURA

S.L.U.
 $S_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q1} \cdot [\psi_{0i} \cdot Q_{ki}]$

$\gamma_G = 1,35$ (neve) $\gamma_Q = 1,5$ (vento) $\gamma_{Q0} = 1$ (temperatura)
 $\psi_0 = 0,6$ (neve) $\psi_0 = 0,6$ (vento) $\psi_0 = 0,6$ (temperatura)

S.L.S. (combinazione frequente per deformata)
 $S_d = \Sigma G_{kj} + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \Sigma \psi_{0i} \cdot \psi_{1j} \cdot Q_{kj}$

neve o eserc. vento temperatura
 $\psi_1 = 1$ $\psi_1 = 1$ $\psi_1 = 1$

	permanenti	carico neve	
MODULI AL TAGLIO RIDOTTI	$G_{ct,p} = 0,4$	$G_{ct,n} = 0,941$	N/mm ²
DISTANZA TRA GLI APPOGGI	L = 4,00	costante	m
CARICHI PERMANENTI / m	g = 0,13	/ m larghezza	kN/m
CARICO DOVUTO ALLA NEVE / m	p = 0,00	/ m larghezza	kN/m
CARICO VIVO DI ESERCIZIO / m	q = 0,00	/ m larghezza	kN/m
CARICO DOVUTO AL VENTO / m	w = 0	0	kN/m
TEMPERATURE DI PROGETTO	$T_i = 55$	55	°C
FRECCIA AMMISSIBILE	L / f _a = 200	SCORR. 100	
SCHEMA STATICO DI PROGETTO	elemento	CONT.	
ASCISSA DI RIFERIMENTO	X = 1,50	4,00	m
	M max	T max	

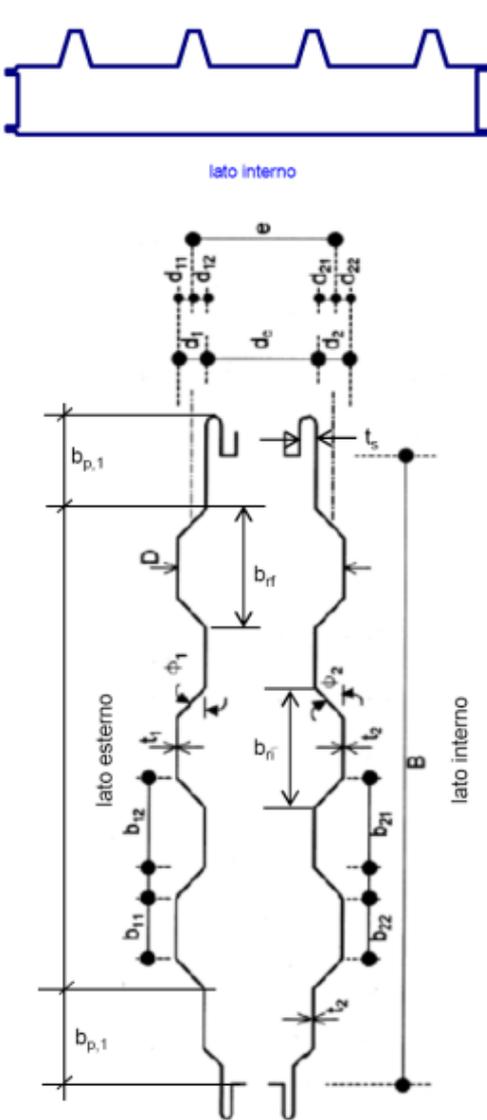
CARICHI AGGIUNTIVI					
CARICHI AGGIUNTIVI	$p.g = 0,000$	kN/m			
	$p.p = 0,000$	kN/m			
PARAMETRI DI RIGIDENZA					
	$B_s = 5E+06$	kNcm ²			
	$k_{p,c} = 0,8004$	campata			
	$k_{n,c} = 0,3402$				
	$k_{p,a} = 0,8004$	app. int.			
	$k_{n,a} = 0,3402$				
	$\theta = 0$	cm ⁻¹			

SOLLECITAZIONI MASSIME PER LO STATO LIMITE ULTIMO							
FORZE E MOMENTI		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME		u.m.
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A = 0,31$			kN	0,23		kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B = 0,82$			kN	0,61		kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y = 20,11$	-35,91		kNcm	14,90	-26,60	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} = 0,00$	0,41		kN	0,00	0,30	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} = 0,00$	0,41		kN	0,00	0,30	kN

SOLLECITAZIONI MASSIME E DEFORMAZIONE PER LO STATO LIMITE DI SERVIZIO							
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME		u.m.
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A = 0,23$			kN	0,23		kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B = 0,61$			kN	0,61		kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y = 14,90$	-26,60		kNcm	14,90	-26,60	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} = 0,00$	0,30		kN	0,00	0,30	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} = 0,00$	0,30		kN	0,00	0,30	kN
FRECCIA MAX IN CAMPATA	$f_{max} = 2,69$			mm	3,00		mm

SOLLECITAZIONI E DEFORMAZIONE PER EFFETTO DEL GRADIENTE DI TEMPERATURA							
FORZE - MOMENTI - FRECCIA		C.C. CON AZIONI MASSIME		u.m.	C.C. CON AZIONI MINIME		u.m.
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A = 0,000$			kN	0,00		kN
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B = 0,000$			kN	0,00		kN
SEZIONE DI RIFERIMENTO		SEZ. 1	SEZ. 2		SEZ. 1	SEZ. 2	
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y = 0,000$	0,000		kNcm	0,00	0,00	kNcm
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} = 0,000$	0,000		kN	0,00	0,00	kN
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} = 0,000$	0,000		kN	0,00	0,00	kN
FRECCIA MAX IN CAMPATA	$f_{max} = 0,00$			mm	0,00		mm

I dati di progetto e le caratteristiche geometriche della sezione del pannello sono riportate nel seguente foglio:

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE E SOLLECITAZIONI MASSIME									
TIPO COMPANY - GLAMET			PANNELLO PROGETTATO COME ELEMENTO DI COPERTURA						
LAMIERA EST.	ACCIAIO	S280GD-EN10147	$f_{ye} = \text{N/mm}^2$	280	$\alpha =$	0,000012			
LAMIERA INT.	ACCIAIO	S280GD-EN10147	$f_{yi} = \text{N/mm}^2$	280	$\alpha =$	0,000012			
irrigid. esterno trapezio	nessun irrigidim. interno	GRECA ESTERNA SPORGENTE	GRECA INTERNA SPORGENTE						
TIPO DI MATERIALE IN ANIMA	SPESS. (mm)	ρ_p (kg/m ³)	c.s. neve	c.s. perm.	$f_{Cc} = \text{N/mm}^2$	$f_{Sc} = \text{N/mm}^2$	λ W/mK		
schiuma poliuretanicca rigida	78,96	40	2,40	7,00	0,22	0,2	0,024		
u.m./m	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.			u.m./m	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.				
	SEZIONE IN CAMPATA		SEZIONE ALL'APPOGGIO		SEZIONE IN CAMPATA		SEZIONE ALL'APPOGGIO		
kNcm	$M_{S.c.1} =$	425,29	$M_{S.a.1} =$	-532,46	kNcm	$M_{S.c.1} =$	285,31	$M_{S.a.1} =$	-357,20
kNcm	$M_{S.c.2} =$	17,79	$M_{S.a.2} =$	-22,27	kNcm	$M_{S.c.2} =$	17,79	$M_{S.a.2} =$	-22,27
kN	$V_{S.c} =$	0,00	$F_{S.a.i} =$	15,61	kN	$V_{S.c} =$	0,00	$F_{S.a.i} =$	10,47
<p>MODELLO DI CALCOLO</p> <p>lato esterno</p>  <p>lato interno</p>									
Altezza totale del profilo	D = mm	120,00							
Altezza anima interna	$d_c =$ mm	79,48							
Larghezza totale del pannello	$B_t =$ mm	1050							
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	25							
N° irrigidimenti faccia esterna	$n_s =$	4							
N° irrigidimenti faccia interna	$n_i =$								
Dist. 1° irrigidim. esterno-bordo	$b_{p,1} =$ mm	90,00							
Dist. 1° irrigidim. interno-bordo	$b_{p,1} =$ mm								
Dist. 1° piega anima da faccia est.	$h_a =$ mm								
Dist. 1° piega anima da faccia int.	$h_b =$ mm								
Larghezza irrigidimento esterno	$b_{ri} =$ mm	70,00							
Larghezza irrigidimento interno	$b_{ri} =$ mm								
Spessore spine di innesto	$t_s =$ mm	5,00							
Altezza irrigidim. esterno trapezio	$u_{tr} =$ mm	40,00							
Altezza irrigidim. interno trapezio	$u_b =$ mm								
Inclinazione irrigidimento esterno	$\alpha_{st} =$ deg	60,00							
Inclinazione irrigidimento interno	$\alpha_{st} =$ deg								
Inclinazione piega dell'anima	$\alpha_a =$ deg								
Altezza irrigidimento esterno	$d_1 =$ mm	40,00							
Altezza irrigidimento interno	$d_2 =$ mm	0,00							
Eccentricità tra i baric. delle facce	e = mm	86,353							
Distanza baric. est.-bordo irrigid.	$d_{11} =$ mm	32,208							
Distanza baric. est.-asse faccia	$d_{12} =$ mm	7,792							
Distanza baric. int.-bordo irrigid.	$d_{22} =$ mm	0,919							
Distanza baric. int.-asse faccia	$d_{21} =$ mm	0,919							
Area della sezione metallica	A = cm ²	12,81							
Posizione asse baricentrico	$z_G =$ mm	51,7							
Momento di inerzia faccia esterna	$I_{ext} =$ cm ⁴	15,272							
Momento di inerzia faccia interna	$I_{int} =$ cm ⁴	0,201							
Modulo di resist. faccia esterna	$W_{el,c} =$ cm ³	4,742							
Modulo di resist. faccia interna	$W_{el,t} =$ cm ³	2,189							
Area di taglio faccia esterna	$A_{V,F1} =$ cm ²	2,11							
Area di taglio faccia interna	$A_{V,F2} =$ cm ²	0,00							
Peso del pannello / m ²	p = kg/m ²	13,28							

Di seguito sono riportate le distribuzioni delle sollecitazioni ed il calcolo di verifica con **analisi elastica**; evidenziate in rosso le verifiche non soddisfatte.

PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA ED UNA PIANA												
u.m./m kN ; cm	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.				u.m./m kN ; cm	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.						
	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME			AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME				
campata	$M_{F,i}$	43,43	$M_{F,i}$	1,82	campata	$M_{F,i}$	29,14	$M_{F,i}$	1,82			
	M_S	381,86	M_S	15,97		M_S	256,17	M_S	15,97			
appoggio	$M_{F,i}$	-213,25	$M_{F,i}$	-8,92	appoggio	$M_{F,i}$	-143,06	$M_{F,i}$	-8,92			
	M_S	-319,22	M_S	-13,35		M_S	-214,15	M_S	-13,35			
reazione	$F_{S,a}$	15,61	$F_{S,a}$	0,61	reazione	$F_{S,a}$	10,47	$F_{S,a}$	0,61			
sollecitazioni per la condizione normale				↔	sollecitazioni per la condizione normale							
Fattori di sicurezza del materiale								S.L.U.	S.L.S.			
								resistenza allo snervamento di una faccia	1,10	1,00		
								resistenza a taglio dell'anima	1,50	1,10		
								resistenza a taglio di una faccia profilata	1,10	1,00		
								raggrinzamento di una faccia in campata	1,25	1,10		
								interazione reazione-raggrinzamento	1,25	1,10		
								schacciamento dell'anima	1,40	1,10		
resistenza alla reazione di appoggio								1,10	1,00			
VERIFICA DI RESISTENZA IN CAMPATA								elemento	coefficienti di rigidezza	β	β_0	β_s
faccia piana o leggermente profilata								continuo	0,1942759	0,10212156	1,44921578	0,93264985
S.L.U.								appoggiato	0,08000806	0,07704205	0,19001923	0,12094283
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$	60,5	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$	40,6	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$	0,0	<	280,0	N/mm ²					
FACCIA PROFILATA : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.)	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F1i} = \sigma'_{F1} + M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{i1} =$	154,4	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1i} = \sigma'_{F1} - M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{i2} =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F1i} = \sigma'_{F1} + M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{i1} =$	103,6	<	280,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1i} = \sigma'_{F1} - M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{i2} =$	0,0	<	280,0	N/mm ²					
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{Fi} = M_{S,i} / (e \cdot A_{Fi}) =$	0,0	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{Fi} = M_{S,i} / (e \cdot A_{Fi}) =$	85,3	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{Fi} = M_{S,i} / (e \cdot A_{Fi}) =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{Fi} = M_{S,i} / (e \cdot A_{Fi}) =$	57,2	<	280,0	N/mm ²					
VERIFICA DI RESISTENZA ALL'APPOGGIO								elemento	coefficienti di rigidezza	β	β_0	β_s
faccia piana o leggermente profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.) ; j = 1 o 2								continuo	0,1942759	0,40049058	1,44921578	0,08082129
faccia profilata : j = 1 (profilo sporgente) ; j = 2 (profilo rientrante)								appoggiato	0,08000806	0,07704205	0,19001923	0,12094283
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} + M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{1j} =$	21,4	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} - M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{1j} =$	511,6	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} + M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{1j} =$	21,4	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} - M_{F1}/l_{F1} \cdot d_{1j} =$	343,2	<	280,0	N/mm ²					
ANIMA	S.L.U.	tensione di taglio anima	$\tau_C = V_s / (e \cdot B) =$	0,093	<	0,133	N/mm ²					
		tensione di taglio flangia est.	$\tau_{F1} = V_{F1} / A_{V,F1} =$	38,0	<	147,0	N/mm ²					
		tensione di taglio flangia int.	$\tau_{F2} = V_{F2} / A_{V,F2} =$	0,0	<	147,0	N/mm ²					
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + M_{F2}/l_{F2} \cdot d_{22} =$	118,9	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2}/l_{F2} \cdot d_{22} =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + M_{F2}/l_{F2} \cdot d_{22} =$	79,8	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2}/l_{F2} \cdot d_{22} =$	0,0	<	280,0	N/mm ²					

Le verifiche di resistenza alla reazione degli appoggi e di deformazione sono riportate nel seguente foglio di calcolo:

RESISTENZA ALLA REAZIONE DI APOGGIO - & E.4.3.2																	
u.m./m	REAZIONI PER LO S.L.U.		u.m./m	REAZIONI PER LO S.L.S.													
	APPOGGIO ESTERNO	APPOGGIO INTERNO		APPOGGIO ESTERNO	APPOGGIO INTERNO												
kN	$F_{S,a,e} =$ 4,91	$F_{S,a,i} =$ 15,61	kN	$F_{S,a,e} =$ 3,30	$F_{S,a,i} =$ 10,47												
Fattori di sicurezza del materiale					<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>S.L.U.</th> <th>S.L.S.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>interazione reazione-raggrinzamento</td> <td>1,25</td> <td>1,10</td> </tr> <tr> <td>schacciamento dell'anima</td> <td>1,40</td> <td>1,10</td> </tr> <tr> <td>resistenza alla reazione di appoggio</td> <td>1,10</td> <td>1,00</td> </tr> </tbody> </table>		S.L.U.	S.L.S.	interazione reazione-raggrinzamento	1,25	1,10	schacciamento dell'anima	1,40	1,10	resistenza alla reazione di appoggio	1,10	1,00
	S.L.U.	S.L.S.															
interazione reazione-raggrinzamento	1,25	1,10															
schacciamento dell'anima	1,40	1,10															
resistenza alla reazione di appoggio	1,10	1,00															
Eccentricità di progetto	$e =$ 86,35	mm	\leq	86,35	mm												
Parametro di distribuzione	$k =$ 0,50	schiuma plastica rigida o vetro cellulare															
Larghezza appoggio esterno	$L_{s,e} =$ 50	mm															
Larghezza appoggio interno	$L_{s,i} =$ 100	mm															
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DELL'ANIMA - APOGGIO DI ESTREMITA'																	
$F_{Re} = B \cdot (L_{s,e} + 0,5 \cdot k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_M =$ 11,25 kN > 5,04 kN (rif. larghezza pannello)																	
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DELL'ANIMA - APOGGIO INTERMEDIO																	
$F_{Ri} = B \cdot (L_{s,i} + k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_M =$ 22,50 kN > 16,00 kN (rif. larghezza pannello)																	
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLA REAZIONE DI APOGGIO DI UNA FACCI A PROFILATA in sicurezza ▼																	
$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 I_a / t} \right] \left[2,4 + (\phi / 90)^2 \right] / \gamma_{M1}$ $r/t = 1$																	
$R_{w,Rd} =$ 16,00 kN > 16,00 kN (rif. larghezza pannello)																	
- INTERAZIONE REAZIONE-RAGGRINZAMENTO ALL'APOGGIO INTERMEDIO																	
$(\sigma_F / f_d)_{max} + F_{S,a} / F_R =$ 1,24 < 1,25																	
VERIFICA DI DEFORMAZIONE - & E.5.5 b																	
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	Az. Max. 18,18	Az. Min. 1,13	mm (rif. larghezza effettiva pannello)													
gradiente termico	$f_{max,2} =$	0,00	0,00	mm													
combinazione frequente	$f_{max} =$	18,18	1,13	mm < 20,00 mm per tetti													
VERIFICA ALLO SCORRIMENTO - PANNELLO DI COPERTURA - & E.5.4																	
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	Az. Max. 2,69		mm (rif. larghezza effettiva pannello)													
gradiente termico	$f_{max,2} =$	0,00		mm													
combinazione frequente	$f_{max} =$	2,69		mm < 40,00 mm													

Nel calcolo di verifica della resistenza alla reazione di appoggio possono essere definite larghezze diverse degli appoggi esterni rispetto a quelli interni. Nel caso in esame si è assunta una larghezza di appoggio di 50 mm per gli appoggi esterni ed una larghezza di 100 mm per quelli interni.

La definizione corretta delle larghezze di appoggio è di fondamentale importanza nel calcolo della capacità portante dei pannelli e deve essere opportunamente giustificata anche se la norma EN 14509 – allegato E non dà alcuna indicazione.

Un utile riferimento può essere fatto alla norma EN 1993-1-3 omissis.....

Anche sull'interazione reazione-raggrinzamento non viene fornito alcun criterio dalla norma EN 14509 – allegato E ma solo una "citazione" nella tabella E.2 relativa alle prove da effettuare descritte nell'allegato A.

Tabella E.2 Valori caratteristici della resistenza

Valori caratteristici di resistenza	Paragrafo	Prova
Resistenza allo snervamento della faccia	5.1.2	
Resistenza al taglio del materiale dell'anima	5.2.1.2	A3 o A4
Resistenza a compressione del materiale dell'anima (e/o resistenza alla reazione d'appoggio)	5.2.1.4	A.2 (A.15)
Resistenza al taglio dopo carico a lungo termine (solo pannelli di tetto e soffitto)	5.2.1.5	A.3.6
Tensione di raggrinzamento (flessione positiva e negativa) a temperatura normale ed elevata (o resistenza al momento flettente per pannelli con uno o due facce profilate)	5.2.1.7	A.5 e A.5.5.5
Tensione di raggrinzamento sopra un appoggio centrale (flessione positiva e negativa, a temperatura normale ed elevata) determinata dalla resistenza a momento flettente (solo per pannelli continui su due o più luci)	5.2.1.8	A.7 e A.5.5.5

Nel programma Sandwich è applicato il criterio della norma EN 1993-1-3.

L'analisi elastica qui presentata con i fogli di calcolo del programma Sandwich evidenzia che tutte le verifiche di resistenza e deformazione sono soddisfatte ad eccezione della verifica di resistenza a trazione della lamiera profilata sull'appoggio interno sia per lo S.L.U. che per lo S.L.S.

Se eseguiamo il calcolo in campo elasto-plastico per la verifica della lamiera profilata esterna a parità di tutte le condizioni si ha il risultato esposto nel seguente foglio di calcolo ovvero una forte riduzione della tensione di trazione allo S.L.U. ma ancora superiore alla resistenza di progetto del materiale.

Lo stesso foglio di calcolo evidenzia che non è neppure soddisfatta la verifica di resistenza a trazione della stessa lamiera per lo S.L.S. **Per tale situazione non è ammessa dalla norma l'analisi plastica.**

Verifica della lamiera profilata esterna sull'appoggio in campo elasto-plastico

PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA ED UNA PIANA												
u.m./m kN ; cm	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.				u.m./m kN ; cm	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.						
	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME			AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME				
campata	$M_{F,i}$	43,43	$M_{F,i}$	1,82	campata	$M_{F,i}$	29,14	$M_{F,i}$	1,82			
	M_S	381,86	M_S	15,97		M_S	256,17	M_S	15,97			
appoggio	$M_{F,i}$	-213,25	$M_{F,i}$	-8,92	appoggio	$M_{F,i}$	-143,06	$M_{F,i}$	-8,92			
	M_S	-319,22	M_S	-13,35		M_S	-214,15	M_S	-13,35			
reazione	$F_{S,a}$	15,61	$F_{S,a}$	0,61	reazione	$F_{S,a}$	10,47	$F_{S,a}$	0,61			
sollecitazioni per la condizione normale					↔	sollecitazioni per la condizione normale						
Fattori di sicurezza del materiale							S.L.U.	S.L.S.				
resistenza allo snervamento di una faccia							1,10	1,00				
resistenza a taglio dell'anima							1,50	1,10				
resistenza a taglio di una faccia profilata							1,10	1,00				
raggrinzamento di una faccia in campata							1,25	1,10				
interazione reazione-raggrinzamento							1,25	1,10				
schiacciamento dell'anima							1,40	1,10				
resistenza alla reazione di appoggio							1,10	1,00				
VERIFICA DI RESISTENZA IN CAMPATA							elemento	coefficienti di rigidezza		β	β_0	β_s
							continuo	0,1942759	0,10212156	1,44921578	0,93264985	
							appoggiato	0,08000806	0,07704205	0,19001923	0,12094283	
faccia piana o leggermente profilata												
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$	60,5	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$	40,6	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$	0,0	<	280,0	N/mm ²					
faccia profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.)												
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F1} = \sigma'_{F1} + M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{11} =$	154,4	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F2} = \sigma'_{F1} - M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{12} =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F1} = \sigma'_{F1} + M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{11} =$	103,6	<	280,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F2} = \sigma'_{F1} - M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{12} =$	0,0	<	280,0	N/mm ²					
faccia piana o leggermente profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.) ; j = 1 o 2												
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,j} / (e \cdot A_{F1}) =$	0,0	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,j} / (e \cdot A_{F1}) =$	85,3	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,j} / (e \cdot A_{F1}) =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,j} / (e \cdot A_{F1}) =$	57,2	<	280,0	N/mm ²					
VERIFICA DI RESISTENZA ALL'APPOGGIO							elemento	coefficienti di rigidezza		β	β_0	β_s
calcolo elasto-plastico allo S.L.U.							continuo	0,1942759	0,40049058	1,44921578	0,08082129	
							appoggiato	0,08000806	0,07704205	0,19001923	0,12094283	
faccia profilata : j = 1 (profilo sporgente) ; j = 2 (profilo rientrante)												
FACCIA ESTERNA	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} + M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{1j} =$	21,4	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} - M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{1j} =$	285,1	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} + M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{1j} =$	21,4	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} - M_{F1}/I_{F1} \cdot d_{1j} =$	343,2	<	280,0	N/mm ²					
materiale isolante e irrigidimenti												
ANIMA	S.L.U.	tensione di taglio anima	$\tau_C = V_s / (e \cdot B) =$	0,093	<	0,133	N/mm ²					
		tensione di taglio flangia est.	$\tau_{F1} = V_{F1} / A_{V,F1} =$	38,0	<	147,0	N/mm ²					
		tensione di taglio flangia int.	$\tau_{F2} = V_{F2} / A_{V,F2} =$	0,0	<	147,0	N/mm ²					
faccia piana o leggermente profilata												
FACCIA INTERNA	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + M_{F2}/I_{F2} \cdot d_{22} =$	118,9	<	224,0	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2}/I_{F2} \cdot d_{22} =$	0,0	<	254,5	N/mm ²					
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + M_{F2}/I_{F2} \cdot d_{22} =$	79,8	<	254,5	N/mm ²					
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2}/I_{F2} \cdot d_{22} =$	0,0	<	280,0	N/mm ²					

La riduzione del carico uniforme di progetto al valore di $1,6 \text{ kN/m}^2$ garantisce quindi il soddisfacimento di tutte le verifiche.

PANNELLO CON UNA FACCIA PROFILATA ED UNA PIANA												
u.m./m kN ; cm	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.U.				u.m./m kN ; cm	SOLLECITAZIONI PER LO S.L.S.						
	AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME			AZIONI MASSIME		AZIONI MINIME				
campata	$M_{F,i}$	35,24	$M_{F,i}$	1,82	campata	$M_{F,i}$	23,67	$M_{F,i}$	1,82			
	M_S	309,80	M_S	15,97		M_S	208,13	M_S	15,97			
appoggio	$M_{F,i}$	-173,01	$M_{F,i}$	-8,92	appoggio	$M_{F,i}$	-116,23	$M_{F,i}$	-8,92			
	M_S	-258,98	M_S	-13,35		M_S	-173,99	M_S	-13,35			
reazione	$F_{S,a}$	12,66	$F_{S,a}$	0,61	reazione	$F_{S,a}$	8,51	$F_{S,a}$	0,61			
sollecitazioni per la condizione normale					↔	sollecitazioni per la condizione normale						
Fattori di sicurezza del materiale							S.L.U.	S.L.S.				
resistenza allo snervamento di una faccia							1,10	1,00				
resistenza a taglio dell'anima							1,50	1,10				
resistenza a taglio di una faccia profilata							1,10	1,00				
raggrinzamento di una faccia in campata							1,25	1,10				
interazione reazione-raggrinzamento							1,25	1,10				
schacciamento dell'anima							1,40	1,10				
resistenza alla reazione di appoggio							1,10	1,00				
VERIFICA DI RESISTENZA IN CAMPATA							elemento	coefficienti di rigidezza		β	β_0	β_s
							continuo	0,1942759	0,10212156	1,44921578	0,93264985	
							appoggiato	0,08000806	0,07704205	0,19001923	0,12094283	
FACCIA ESTERNA	faccia piana o leggermente profilata											
	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$		49,1	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F1} = M_{S,1} / (e \cdot A_{F1}) =$		33,0	<	254,5	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F1} = M_{S,2} / (e \cdot A_{F1}) =$		0,0	<	280,0	N/mm ²				
	faccia profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.)											
S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F1} = \sigma'_{F1} + M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{i1} =$		125,3	<	254,5	N/mm ²					
	tensione di trazione	$\sigma_{F2} = \sigma'_{F1} - M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{i2} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²					
S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F1} = \sigma'_{F1} + M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{i1} =$		84,2	<	280,0	N/mm ²					
	tensione di trazione	$\sigma_{F2} = \sigma'_{F1} - M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{i2} =$		0,0	<	280,0	N/mm ²					
FACCIA INTERNA	faccia piana o leggermente profilata : i = 1 (fl. est.) ; i = 2 (fl. int.) ; j = 1 o 2											
	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		0,0	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		69,2	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
tensione di trazione		$\sigma_{Fi} = M_{S,j} / (e \cdot A_{Fi}) =$		46,5	<	280,0	N/mm ²					
VERIFICA DI RESISTENZA ALL'APPOGGIO							elemento	coefficienti di rigidezza		β	β_0	β_s
calcolo elasto-plastico allo S.L.U.							continuo	0,1942759	0,40049058	1,44921578	0,08082129	
							appoggiato	0,08000806	0,07704205	0,19001923	0,12094283	
FACCIA ESTERNA	faccia profilata : j = 1 (profilo sporgente) ; j = 2 (profilo rientrante)											
	S.L.U.	tensione di compressione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} + M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{1j} =$		21,4	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} - M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{1j} =$		231,3	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di compressione	$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} + M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{1j} =$		21,4	<	254,5	N/mm ²				
tensione di trazione		$\sigma_{F1j} = \sigma_{F1} - M_{F1} / I_{F1} \cdot d_{1j} =$		278,8	<	280,0	N/mm ²					
ANIMA	materiale isolante e irrigidimenti											
	S.L.U.	tensione di taglio anima	$\tau_C = V_s / (e \cdot B) =$		0,075	<	0,133	N/mm ²				
		tensione di taglio flangia est.	$\tau_{F1} = V_{F1} / A_{V,F1} =$		30,8	<	147,0	N/mm ²				
tensione di taglio flangia int.		$\tau_{F2} = V_{F2} / A_{V,F2} =$		0,0	<	147,0	N/mm ²					
FACCIA INTERNA	faccia piana o leggermente profilata											
	S.L.U.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + M_{F2} / I_{F2} \cdot d_{22} =$		96,5	<	224,0	N/mm ²				
		tensione di trazione	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2} / I_{F2} \cdot d_{22} =$		0,0	<	254,5	N/mm ²				
	S.L.S.	tensione di raggrinzamento	$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + M_{F2} / I_{F2} \cdot d_{22} =$		64,8	<	254,5	N/mm ²				
tensione di trazione		$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} - M_{F2} / I_{F2} \cdot d_{22} =$		0,0	<	280,0	N/mm ²					

RESISTENZA ALLA REAZIONE DI APPOGGIO - & E.4.3.2					
u.m./m	REAZIONI PER LO S.L.U.		u.m./m	REAZIONI PER LO S.L.S.	
kN	APPOGGIO ESTERNO	APPOGGIO INTERNO	kN	APPOGGIO ESTERNO	APPOGGIO INTERNO
	$F_{s,a,e} =$ 3,99	$F_{s,a,i} =$ 12,66		$F_{s,a,e} =$ 2,68	$F_{s,a,i} =$ 8,51
Fattori di sicurezza del materiale					
				S.L.U.	S.L.S.
interazione reazione-raggrinzamento				1,25	1,10
schiacciamento dell'anima				1,40	1,10
resistenza alla reazione di appoggio				1,10	1,00
Eccentricità di progetto $e =$ 86,35 mm \leq 86,35 mm					
Parametro di distribuzione $k =$ 0,50 schiuma plastica rigida o vetro cellulare					
Larghezza appoggio esterno $L_{s,e} =$ 50 mm					
Larghezza appoggio interno $L_{s,i} =$ 100 mm					
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DELL'ANIMA - APPOGGIO DI ESTREMITA'					
$F_{Re} = B \cdot (L_{s,e} + 0,5 \cdot k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_M =$ 11,25 kN $>$ 4,09 kN (rif. larghezza pannello)					
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DELL'ANIMA - APPOGGIO INTERMEDIO					
$F_{Ri} = B \cdot (L_{s,i} + k \cdot e) \cdot f_{Cc} / \gamma_M =$ 22,50 kN $>$ 12,98 kN (rif. larghezza pannello)					
- VERIFICA DI RESISTENZA ALLA REAZIONE DI APPOGGIO DI UNA FACCIA PROFILATA in sicurezza <input type="button" value="v"/>					
$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 I_a / t} \right] \left(2,4 + (\phi/90)^2 \right) / \gamma_{M1}$ $r/t = 1$					
$R_{w,Rd} =$ 12,98 kN $>$ 12,98 kN (rif. larghezza pannello)					
- INTERAZIONE REAZIONE-RAGGRINZAMENTO ALL'APPOGGIO INTERMEDIO					
$(\sigma_F / f_d)_{max} + F_{s,a} / F_R =$ 1,01 $<$ 1,25					
VERIFICA DI DEFORMAZIONE - & E.5.5 b					
		Az. Max.	Az. Min.		
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	17,91	1,13	mm	(rif. larghezza effettiva pannello)
gradiente termico	$f_{max,2} =$	0,00	0,00	mm	
combinazione frequente	$f_{max} =$	17,91	1,13	mm	$<$ 20,00 mm per tetti
VERIFICA ALLO SCORRIMENTO - PANNELLO DI COPERTURA - & E.5.4					
		Az. Max.			
combinazione carichi unif.	$f_{max,1} =$	2,69		mm	(rif. larghezza effettiva pannello)
gradiente termico	$f_{max,2} =$	0,00		mm	
combinazione frequente	$f_{max} =$	2,69		mm	$<$ 40,00 mm

Si riporta di seguito la tabella della capacità di carico del pannello oggetto di verifica esaminato per una gamma di spessori e luci nella quale sono compresi i dati del calcolo precedentemente

illustrato (celle color giallo) segnalando la differenza dei valori del carico tra il pannello semplicemente appoggiato e quello continuo con l'applicazione del calcolo elasto-plastico.

L'applicabilità del criterio di calcolo dei pannelli continui con una faccia profilata in base agli "abachi" di Davies (ECCS) è limitata dal rapporto B_D / B_S tra la rigidezza della lamiera profilata e la rigidezza del pannello nel suo complesso poiché le curve β sono comprese tra un valore minimo del rapporto B_D / B_S uguale a **0,05** ed un rapporto massimo uguale a **0,2**.

Vengono così esclusi dal calcolo pannelli con spessore dell'anima rilevante rispetto all'altezza della profilatura e viceversa (a titolo di esempio un pannello che abbia $s \geq 100$ mm ; $d_1 = 40$ mm ; $t_1 = 0,5$ mm ; $t_2 = 0,4$ mm ha un rapporto $B_D / B_S < 0,05$ per cui non sono definibili le curve β).

Questa è la giustificazione per cui nella seguente tabella non compaiono le capacità di carico per elementi continui di spessore maggiore o uguale a 100 mm in questo caso **conviene fare riferimento alla capacità di carico del pannello semplicemente appoggiato**.

In pratica le tabelle di portata relative allo schema statico di pannello continuo devono essere completate con i dati ottenuti per il pannello semplicemente appoggiato e, addirittura, le capacità di carico del pannello continuo che risultino inferiori a quelle del pannello semplicemente appoggiato, devono essere sostituite **GIUSTO IL CRITERIO DI CONSIDERARE I PANNELLI CONTINUI COME UNA SERIE DI ELEMENTI SEMPLICEMENTE APPOGGIATI** per formazione della cerniera plastica sugli appoggi intermedi.

Nel caso in esame si vede che il considerare il pannello continuo su tre appoggi è conveniente (in termini di capacità di carico) per spessori di 50 mm e luci maggiori o uguali a 2,25 m nonché per spessori di 80 mm e luci maggiori o uguali a 3,5 m

Negli altri casi la capacità di carico è quella indicata nella tabella elaborata per lo schema statico di appoggio semplice.

COMPANY		Type of panel		limite di freccia normale I / 200		limite di freccia scorrim. I / 100		limite carico max. kN/mq $P_{max} = 10$		IN ACCORDO CON EN 14509 MATERIALE LAMIERE Esterna S280GD-EN10147 Interna S280GD-EN10147 - gradiente termico $\Delta T = ^\circ C$ 0 - spessore protezione mm 0,01 - in rosso carico limitato da freccia																				
isolante : schiuma poliuretanic a rigida		densità = kg/mc 40		$f_{c,10\%} = N/mm^2$ 0,22		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																								
sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																				
t _{F1}		t _{F2}		t _{F1}		t _{F2}		t _{F1}		t _{F2}		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
peso		peso		peso		peso		peso		peso		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
h		h		h		h		h		h		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
s		s		s		s		s		s		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																		
50	90,0	0,80	0,50	12,08	12,08	0,48	0,48	3,95	3,05	2,45	1,95	1,00	1,30	1,10	90	75	65	55	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6	6,25	6,5		
80	120,0	0,80	0,50	13,28	13,28	0,30	0,30	5,75	4,60	3,80	3,15	2,65	2,25	1,90	1,65	1,48	1,25	1,05	95	80	70	60	55							
100	140,0	0,80	0,50	14,08	14,08	0,24	0,24	6,95	5,65	4,70	3,95	3,40	2,90	2,50	2,20	1,90	1,65	1,45	1,30	1,15	1,00	90	80	70	60	55				
140	180,0	0,80	0,50	15,68	15,68	0,17	0,17	7,50	6,65	5,95	5,40	4,90	4,30	3,75	3,30	2,95	2,60	2,35	2,10	1,85	1,65	1,50	1,35	1,20	1,10	1,00				
180	220,0	0,80	0,50	17,28	17,28	0,13	0,13	7,50	6,65	5,95	5,40	4,95	4,55	4,20	3,90	3,65	3,45	3,25	2,95	2,65	2,40	2,20	2,00	1,80	1,65	1,50				

sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
t _{F1}		t _{F2}		t _{F1}		t _{F2}		t _{F1}		t _{F2}		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
peso		peso		peso		peso		peso		peso		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
h		h		h		h		h		h		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
s		s		s		s		s		s		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
50	90,0	0,80	0,50	12,08	12,08	0,48	0,48	3,85	3,15	2,65	2,25	1,95	1,65	1,50	1,30	1,05	90	75	60	50	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6	6,25	6,5	
80	120,0	0,80	0,50	13,28	13,28	0,30	0,30	4,80	3,85	3,30	2,85	2,50	2,20	1,95	1,75	1,60	1,45	1,35	1,20	1,10	1,00	85	75	65	55	50					
100	140,0	0,80	0,50	14,08	14,08	0,24	0,24																								
140	180,0	0,80	0,50	15,68	15,68	0,17	0,17																								
180	220,0	0,80	0,50	17,28	17,28	0,13	0,13																								

sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		sp. lamiera		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
t _{F1}		t _{F2}		t _{F1}		t _{F2}		t _{F1}		t _{F2}		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
peso		peso		peso		peso		peso		peso		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		kg/m ²		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
h		h		h		h		h		h		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
s		s		s		s		s		s		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
mm		mm		mm		mm		mm		mm		carico uniforme di esercizio sulla faccia esterna																			
50	90,0	0,80	0,50	12,08	12,08	0,48	0,48	4,00	3,05	3,05	2,60	2,30	1,95	1,60	1,30	1,05	90	75	60	50	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6	6,25	6,5	
80	120,0	0,80	0,50	13,28	13,28	0,30	0,30	5,05	4,20	3,80	3,15	2,75	2,45	2,20	2,00	1,80	1,65	1,50	1,35	1,15	1,00	85	75	65	55	50					
100	140,0	0,80	0,50	14,08	14,08	0,24	0,24																								
140	180,0	0,80	0,50	15,68	15,68	0,17	0,17																								
180	220,0	0,80	0,50	17,28	17,28	0,13	0,13																								