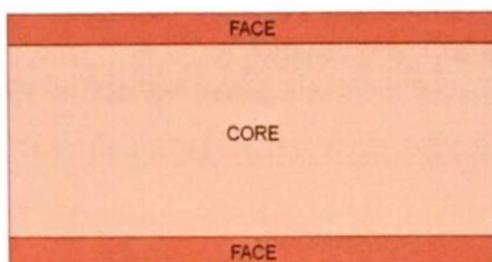




PANNELLI SANDWICH - DIMENSIONAMENTO STATICO

Il comportamento strutturale dei pannelli prefabbricati sandwich, destinati al tamponamento e alla copertura di costruzioni civili e industriali, deve essere analizzato con riferimento al più generale tema delle **strutture piane a lastre riempite di schiuma** (*foam-filled structures*).



Schematizzazione di un pannello sandwich 'tipo'



Esempi di pannelli sandwich per copertura e parete

Nel settore delle costruzioni per la realizzazione di questi elementi viene impiegato, nella grande maggioranza dei casi, l'**acciaio** o l'**alluminio** per le lastre, mentre per il nucleo (*core*) viene generalmente adottato il **poliuretano**, con densità pari a circa 40 kg/m^3 .

Tale tipologia di pannelli viene scelta nell'edilizia industrializzata, principalmente per le doti intrinseche di stabilità strutturale e di elevato potere isolante termico, nonché per la facilità di montaggio, specialmente nel contesto di costruzioni basate sulla prefabbricazione per componenti. Per quanto riguarda i principi del funzionamento strutturale del pannello sandwich, è possibile ravvisare meccanismi resistenziali fondamentalmente differenti rispetto alle normali strutture a tessitura più omogenea. Infatti gli sforzi assiali di trazione e compressione vengono assorbiti quasi interamente dai paramenti esterni, e inoltre il nucleo presenta un'elevata deformabilità a taglio.

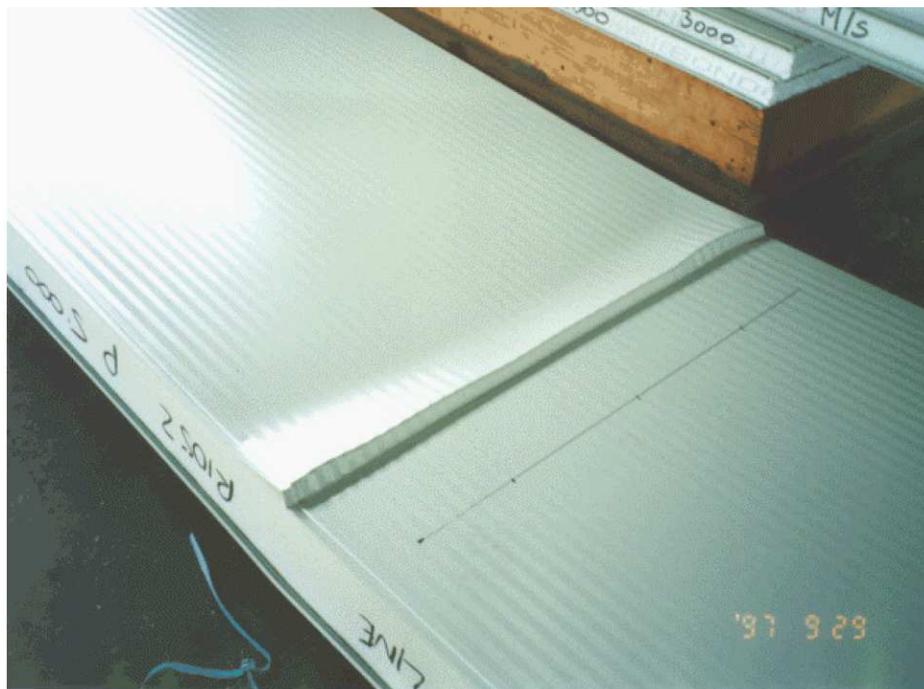


E' possibile definire in un pannello coibentato tre sistemi portanti:

- sistema a paramento esterno inflesso;
- sistema a paramento interno inflesso;
- sistema ad azione composita del pannello, che comporta sforzi assiali nei paramenti e azioni taglianti nel nucleo.

Inoltre, quali ulteriori peculiarità dell'approccio al dimensionamento strutturale, rivestono importanza notevole nella progettazione:

- gli **effetti di instabilità locale** delle lamiere (*raggrinzamento o wrinkling*).



Rottura per raggrinzamento della lamiera superiore compressa

- gli **effetti connessi ai fenomeni viscosi** (*creep*), ovvero la modifica nel tempo delle caratteristiche meccaniche del materiale costituente il nucleo, sotto la prolungata azione di un carico costante;
- le **sollecitazioni termiche**, che determinano una curvatura del pannello dovuta a contrazione e distensione dei paramenti esterni.

Le caratteristiche meccaniche intrinseche dei materiali, che determinano la resistenza complessiva del pannello nei riguardi delle azioni esterne complanari e ortogonali, sono principalmente due.

Per la resistenza a taglio è da considerare il modulo di resistenza a taglio del materiale costituente il nucleo: infatti, nonostante spesso l'**instabilità del paramento** o la **connessione alla struttura portante** rappresentino fattore progettuale determinante, la resistenza a taglio costituisce un parametro significativo, crescente di importanza in modo direttamente proporzionale allo spessore



del pannello e inversamente alla luce della campata. La figura Fig.1 riporta schematicamente e qualitativamente due meccanismi tipici di **collasso a taglio del nucleo** di un pannello in schiuma poliuretanicca: per l'esempio riportato in Fig.1 a), relativo a un risultato sperimentale su pannello con densità pari a 48 kg/m^3 , il meccanismo di rottura segue il comportamento atteso per una struttura composta di materiale omogeneo; per l'esempio riportato in Fig.1 b), relativo a un risultato sperimentale su pannello con densità pari a 32 kg/m^3 , si osserva una rottura per distacco lungo il piano di taglio, in corrispondenza di una tensione minore di quella teorica ammissibile per il materiale base.

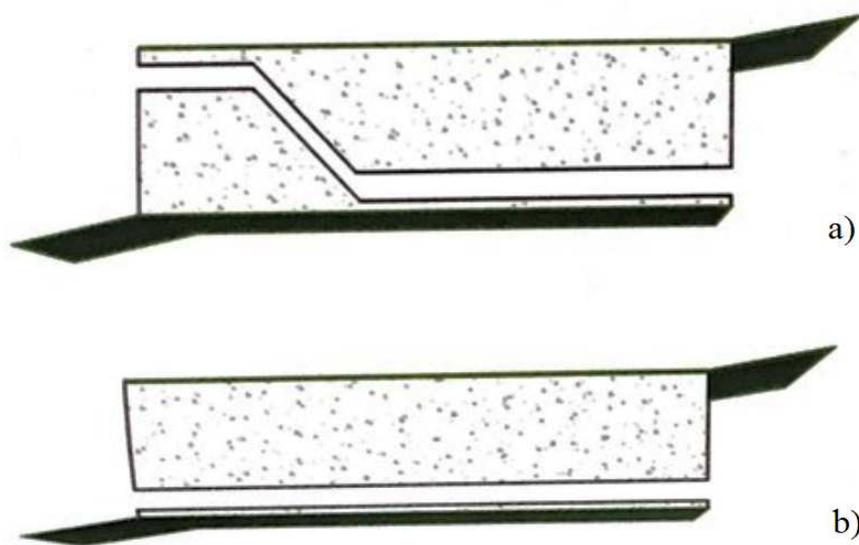


Fig. 1 - Meccanismi di collasso del nucleo sollecitato a taglio

Il materiale più correntemente utilizzato per il nucleo nei pannelli schiumato è il **poliuretano**; generalmente ha densità di circa 40 kg/m^3 ed è caratterizzato da valori delle caratteristiche meccaniche che possono valere: modulo a taglio attorno a $G_c = 3 \text{ N/mm}^2$ e resistenza a taglio attorno a $f_{vc,k} = 0.2 \text{ N/mm}^2$. Ovviamente questi valori sono puramente indicativi dell'ordine di grandezza di un nucleo "tipo".

Il secondo parametro progettuale importante si riferisce ai **fenomeni di instabilità locale e globale dei paramenti esterni**. Naturalmente tale aspetto riveste la massima importanza nel caso di pannelli parete, con lamiere debolmente nervale o piane, e soprattutto nel caso di lamiere piane. Si riportano in figura Fig.2 schemi di modalità tipiche di collasso per instabilità di pannelli con lamiere piane:

- inflexione con onda singola verso l'interno, con schiacciamento locale del nucleo;
- inflexione con onda singola verso l'esterno, con distacco tra paramento e nucleo;
- inflexione a doppia onda, in cui si osservano entrambi i fenomeni di distacco e schiacciamento.

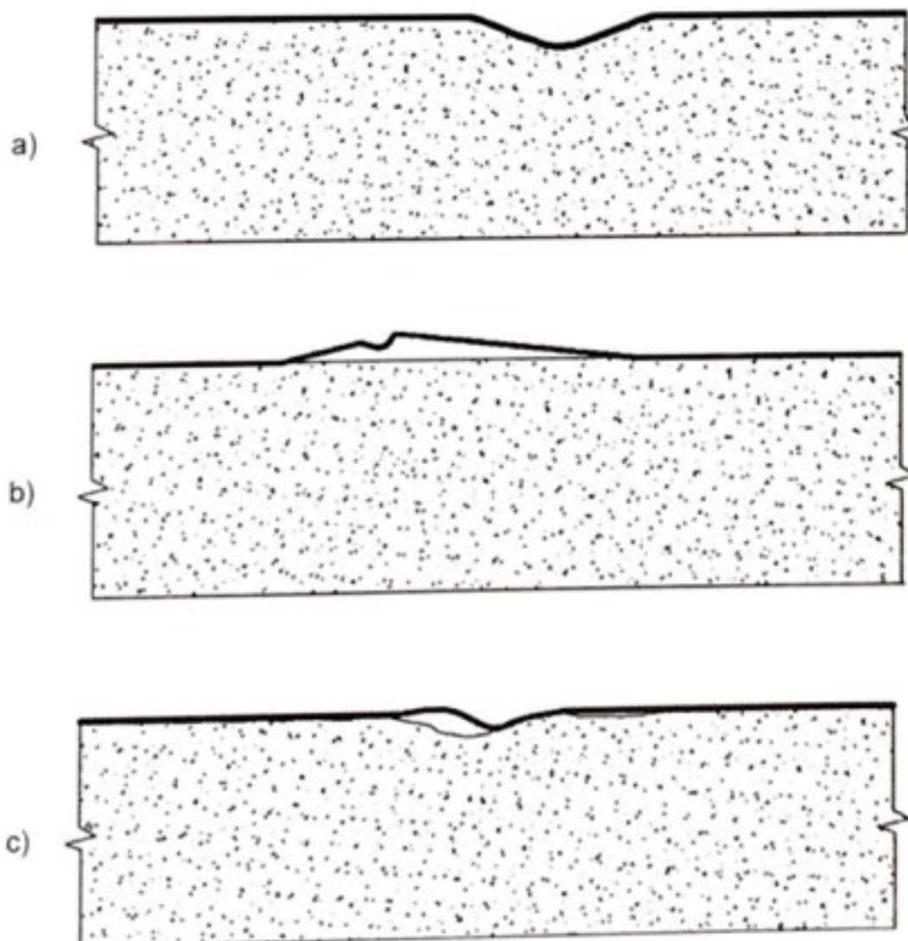


Fig.2. Meccanismi di collasso per instabilità del paramento metallico compresso

Da un punto di vista analitico l'interpretazione del fenomeno è da ricondurre alla teoria delle lastre piane soggette a carichi complanari. Formule empiriche ottenute per via sperimentale propongono valutazioni del carico critico, tenendo conto dell'effetto del nucleo, che risulta debolmente stabilizzante fino al raggiungimento della tensione di distacco. Anche l'instaurarsi di fenomeni di *creep* nel nucleo favorisce l'instabilità dei paramenti esterni.

La Tabella sottostante riporta, a titolo esemplificativo, le caratteristiche meccaniche, secondo la standardizzazione italiana, dei materiali utilizzati per i paramenti metallici (acciaio e acciaio inox).

Materiale	Qualità	Modulo elastico (N/mm ²)	Tensione di snerv. (N/mm ²)	Tensione di rottura (N/mm ²)	Allung. a rottura	Coeff. dilatazione termica	Norma di riferimento
Acciaio	S250GD	210.000	250	330	19%	0,000012	UNI EN 10346
	S280GD	210.000	280	360	18%	0,000012	
	S320GD	210.000	320	390	17%	0,000012	
Acciaio INOX	1.4301 (AISI 304)	210.000	230	540	45%	0,000017	UNI EN 10088-2



Modellazione del sistema “ Pannello sandwich ”

Il dimensionamento consiste, in termini generali e qualitativi, nel valutare, in corrispondenza di sollecitazioni composte di flessione e taglio, le componenti di deformazione dovute alle sollecitazioni flessionali nei paramenti esterni rigidi ed agli sforzi assiali (trazione e compressione) presenti nei paramenti stessi, nonché le componenti di deformazione dovute alle sollecitazioni taglianti presenti nel nucleo: l'inflessione globale del pannello sarà in tal senso la somma delle relative componenti.

Per quanto riguarda i principi generali, si deve assumere che i materiali del nucleo e delle facce esterne rimangano elastici lineari.

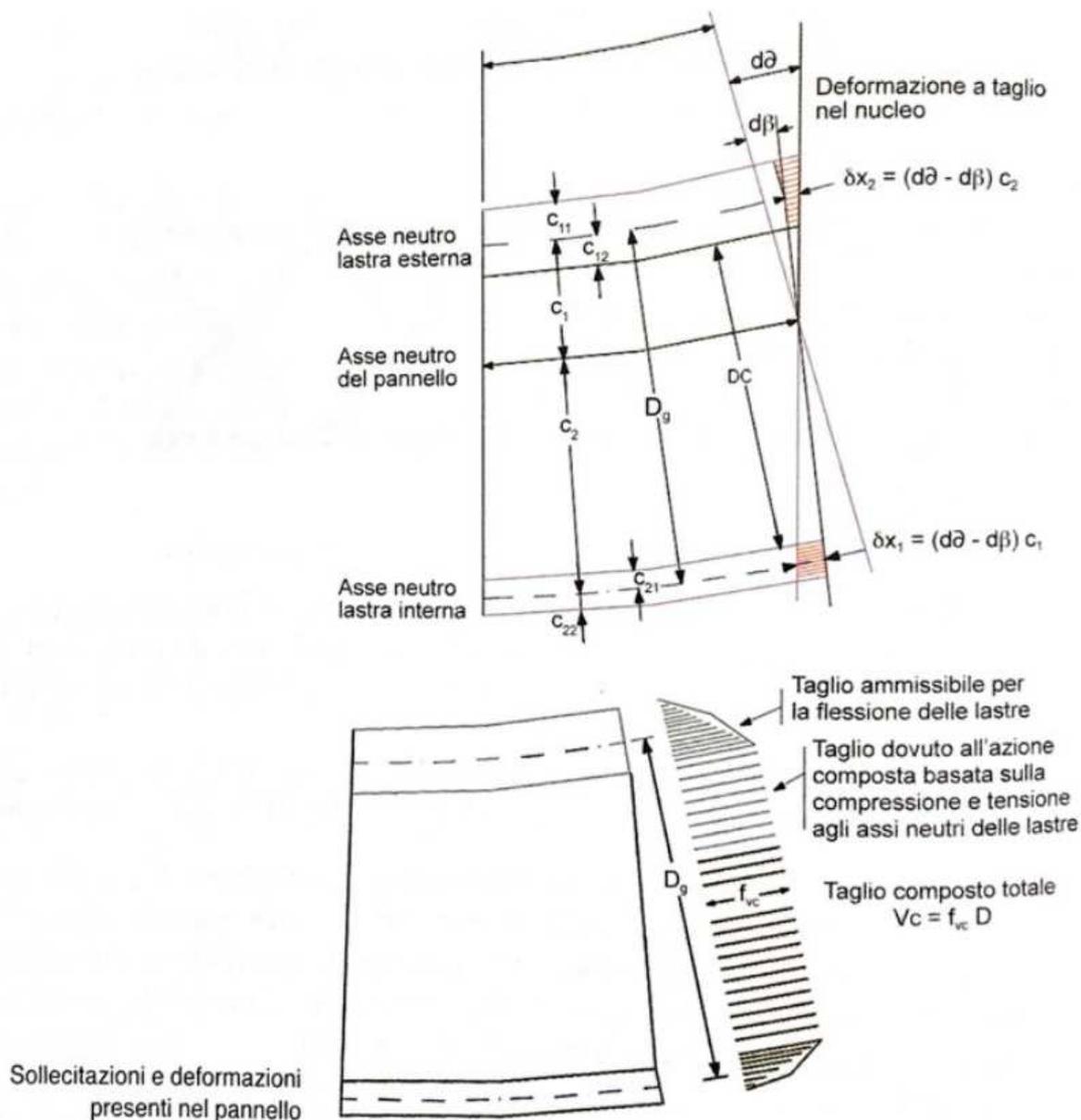
Dati i rapporti tra le tensioni di snervamento dei materiali costituenti tipicamente i paramenti e il nucleo, si assume che tutti gli sforzi assiali di trazione e compressione vengano sopportati dai soli paramenti metallici (il contributo fornito dalle tensioni normali nel nucleo può essere trascurato) e che il nucleo assorba in parte le sollecitazioni taglianti, permettendo peraltro deformazioni angolari sotto sollecitazioni taglianti, contribuendo così alla deformabilità a taglio per la deformazione del pannello. Non è pertanto possibile trascurare la deformazione a taglio per la determinazione degli stati tensionali.

Inoltre, in contrasto con la teoria classica per il calcolo delle sezioni composte inflesse, l'ipotesi di Bernoulli sulla conservazione delle sezioni piane non risulta valida per l'intera sezione trasversale, bensì per i soli componenti individuali della sezione.

La capacità portante di un elemento sandwich può, pertanto, così come definito anche nelle Raccomandazioni Europee, essere suddivisa in due componenti:

- per il *momento flettente*: in una componente del momento M_D nelle lamiere rigide e in una M_S , generata dalle forze assiali N_{F1} e N_{F2} , agenti nelle lamiere, moltiplicate per il braccio interno D_g ; a seconda delle sezioni considerate, il taglio può essere assorbito quasi interamente dalle anime della lamiera o dal nucleo, in funzione di quanto previsto al punto A4.2.4.3 delle Raccomandazioni ECCE;
- per il *taglio*: in una componente del taglio nelle lamiere V_D e in una V_S nel nucleo.

Per pannelli a paramenti rigidi, si osserva che una parte non trascurabile del momento esterno viene contrastato dal momento flettente delle lastre attorno al proprio asse neutro; in tal modo (vedi figura pag.6) si viene a determinare una distribuzione dello stato tensionale anche all'interno del nucleo. Si nota in figura come, comunque, l'allungamento della lastra inferiore tesa sia maggiore al suo lembo inferiore e l'accorciamento di quella superiore compressa sia maggiore al suo lembo superiore.



In tal caso il momento esterno applicato M risulta pari alla somma del momento composto M_S (momento prodotto dalle risultanti agli assi neutri dei paramenti) e del momento M_D delle lastre attorno al proprio asse neutro.

$$M = M_D + M_S$$

dove: $M_D = M_{F1} + M_{F2}$

$$M_S = N_{F1} \cdot D_g = N_{F2} \cdot D_g$$

Inoltre il taglio esterno applicato V risulta pari alla somma del taglio V_D nei paramenti metallici e del taglio V_S nel nucleo.

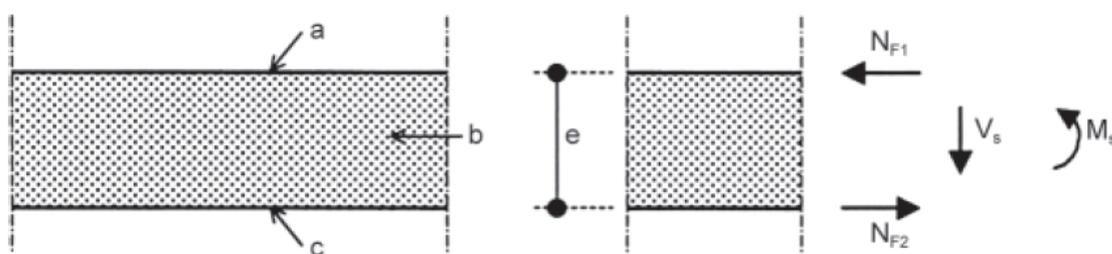
$$V = V_D + V_S$$

dove: $V_D = V_{F1} + V_{F2}$

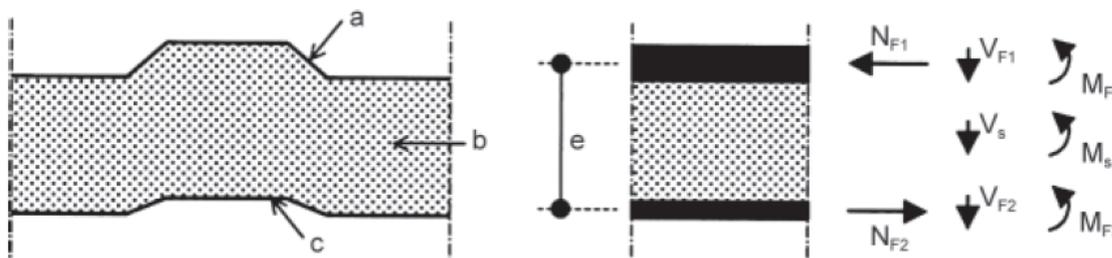


Allo stesso modo si definisce momento d'inerzia totale I della sezione la somma del momento d'inerzia composto e dei momenti d'inerzia delle due lastre, moltiplicati per il rapporto tra i moduli elastici, se di materiali differenti.

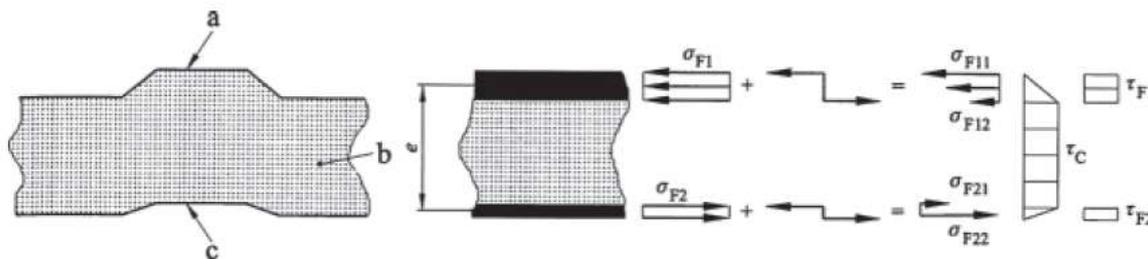
Con riferimento alle figure sottostanti (dove si è indicato il braccio interno $D_g = e$), si evidenzia che le forze normali N_{F1} ed N_{F2} creano una distribuzione uniforme di tensioni normali di compressione o di trazione nelle facce metalliche, mentre i momenti flettenti M_{F1} ed M_{F2} danno luogo a una distribuzione lineare di tensioni normali nelle facce stesse. Per quanto riguarda il taglio, il contributo V_s dà origine a una distribuzione costante di tensioni tangenziali τ_c nello spessore del nucleo, trascurando le rigidezze a compressione e a taglio del riempimento nella direzione longitudinale del pannello; qualora le facce metalliche presentino rigidezza flessionale non trascurabile (lamiere profilate), le forze di taglio V_{F1} ed V_{F2} non possono essere trascurate e danno origine a tensioni tangenziali τ_{F1} ed τ_{F2} nelle facce stesse.



Distribuzione delle tensioni per un pannello sandwich con facce sottili piane o poco profilate



Scomposizione delle sollecitazioni per un pannello sandwich con facce profilate



Distribuzione delle tensioni per un pannello sandwich con facce profilate



Le tensioni dovute alla flessione nelle facce sono fornite dalla norma UNI EN 14509 – Allegato E, e valgono:

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

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

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

dove

A_{F1} e A_{F2} sono le aree trasversali alla sezione delle facce
 I_{F1} e I_{F2} sono i momenti di inerzia delle aree delle facce.

Le tensioni di taglio nell'anima e nelle facce sono anch'esse fornite dalla medesima norma:

$$\tau_c = \frac{V_S}{eB}$$

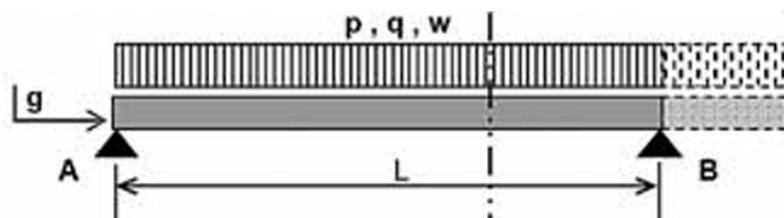
$$\tau_{F1} = \frac{V_{F1}}{n_1 s_{w1} t_1}, \quad \tau_{F2} = \frac{V_{F2}}{n_2 s_{w2} t_2}$$

dove

B è la larghezza del pannello
 s_{w1} e s_{w2} sono le dimensioni degli irrigidimenti delle facce profilate
 n_1 e n_2 sono il numero di anime delle facce profilate del pannello
 t_1 e t_2 sono gli spessori delle facce profilate del pannello.

Schema statico

Lo schema statico da adoperarsi nel calcolo dei pannelli deve essere coerente con il numero e la disposizione dei supporti presenti nella realtà: quale lunghezza convenzionale delle campate, si assume la distanza tra le mezzerie dei vincoli stessi. Generalmente, a meno che non venga verificato il contrario, i pannelli sandwich sono considerati liberi di ruotare e di muoversi in direzione assiale in corrispondenza dei supporti; di conseguenza, questi ultimi possono essere schematizzati quali semplici appoggi.





La norma EN 14509 - Allegato E, definisce la rigidezza flessionale del pannello come:

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

mentre il fattore di taglio in campata, come:

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

Sempre ai fini del calcolo, la norma prescrive di tenere in considerazione anche il **fenomeno del creep**. Quest'ultimo, dovuto al fatto che i materiali costituenti il nucleo sono solitamente viscoelastici, si manifesta in un aumento delle deformazioni a taglio nel tempo, pur mantenendo il carico costante. Per valutare il contributo di tale fenomeno sullo stato tensionale e deformativo complessivo del pannello, è necessario condurre un calcolo separato, in accordo ai principi esposti precedentemente, andando a ridurre opportunamente il modulo di taglio del nucleo. In particolare, il valore ridotto di tale modulo di taglio deve essere determinato relativamente ad un periodo di tempo pari a 2000 ore per i carichi da neve e a 100.000 ore per le azioni permanenti ed è fornito dalla seguente equazione:

$$G_{Ct} = \frac{G_c}{1 + \varphi_t}$$

dove

G_{Ct} = modulo di taglio del nucleo al tempo t

G_c = modulo di taglio del nucleo al tempo zero

φ_t = coefficiente di creep al tempo t .

Valori indicativi per il coefficiente di creep sono forniti dalla norma, ed in particolare:

- per schiume rifigido-plastiche (poliuretano):

$$\varphi_t = 2.4 \text{ per } t = 2000 \text{ h;}$$

$$\varphi_t = 7.0 \text{ per } t = 100.000 \text{ h;}$$

- per lana minerale:

$$\varphi_t = 1.5 \text{ per } t = 2000 \text{ h;}$$

$$\varphi_t = 4.0 \text{ per } t = 100.000 \text{ h;}$$

Il creep riferito al carico neve deve essere trascurato in regioni ove nevica solamente per pochi giorni all'anno.