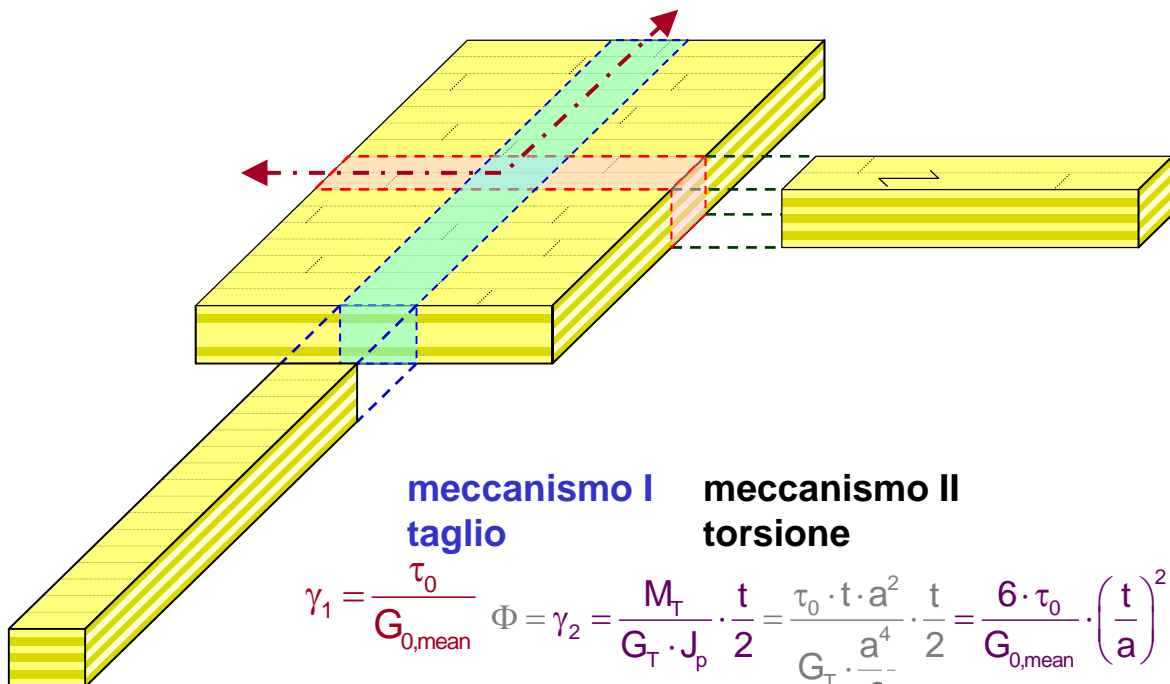


# Il calcolo dell`XLAM

## Basi, normative, progettazione, applicazione

Andrea Bernasconi



**meccanismo I  
taglio**

$$\gamma_1 = \frac{\tau_0}{G_{0,mean}}$$

**meccanismo II  
torsione**

$$\Phi = \gamma_2 = \frac{M_T}{G_T \cdot J_p} \cdot \frac{t}{2} = \frac{\tau_0 \cdot t \cdot a^2}{G_T \cdot \frac{a^4}{6}} \cdot \frac{t}{2} = \frac{6 \cdot \tau_0}{G_{0,mean}} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$$

$$\gamma_{XLAM} = \gamma_1 + \gamma_2$$

$$\frac{G^*}{G_{0,mean}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_T \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2}$$

$$D_{xy} = G^* \cdot t_{X-Lam}$$

$$\alpha_T = 0.32 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{0.77}$$

---

## **Il calcolo degli elementi strutturali di XLAM: normative e DM08, documenti di riferimento ed esecuzione**

### **1 Introduzione**

Il calcolo strutturale dell'XLAM rappresenta una forma nuova del progetto delle strutture di legno per diverse ragioni. Prima fra tutte quella dell'uso strutturale di elementi piani di grandi dimensioni, che fino a pochi anni fa era completamente sconosciuto nella costruzione di legno, in quanto - fatta eccezione per i pannelli sottili - non esistevano elementi di questo tipo. Inoltre si tratta di un materiale completamente nuovo, per il quale al momento non esistono ancora normative di prodotto specifiche e che non è oggetto di trattazione specifica in nessuno dei testi di normativa attualmente e comunemente in uso da parte di strutturisti e addetti ai lavori. Ciò non significa però - come si vedrà più sotto - che non esista una base normativa su cui lavorare con questo prodotto; è anzi vero esattamente il contrario: le basi normative disponibili al momento permettono senza dubbio di considerare l'XLAM a tutti gli effetti facente parte delle conoscenze tecniche in esse contenute. Non si tratta di una coincidenza, in quanto le normative sulle strutture di legno disponibili al giorno d'oggi sono tutte state pubblicate negli ultimissimi anni e fra gli addetti ai lavori - cioè i produttori che molto hanno investito in questo materiale, ma anche gli specialisti scientifici del ramo - l'evoluzione in corso era già ben nota. La mancanza di una normativa che definisca il prodotto è un ostacolo facilmente superabile, in quanto ciò è previsto nelle regole che definiscono l'omologazione e la possibilità di applicazione di materiali e prodotti con funzione strutturale che non siano definiti tramite normativa apposita. Molti componenti della costruzione - non solo nel caso del legno - sono definiti in questo modo, come per esempio diversi mezzi di collegamento o connettori di uso quotidiano praticamente in tutta Europa. Si tratta quindi di un ostacolo piuttosto ridotto per la grande industria, che lo ha prontamente superato, seguendo la procedura dell'omologazione diretta dei singoli prodotti.

Le indicazioni che seguono vogliono dare le indicazioni necessarie per poter procedere in modo tecnicamente e formalmente corretto al calcolo delle strutture progettate con l'XLAM. Si tratta forzatamente di un'introduzione al tema, che intende però affrontarlo in modo completo, toccandone quindi tutti gli aspetti essenziali e dando le indicazioni principali per l'applicazione pratica e quotidiana da parte dello strutturista. Non si cerca quindi di approfondire in modo esauriente e scientifico tutte le questioni legate alla modellazione strutturale e al calcolo dell'XLAM. Per l'approfondimento scientifico dei vari temi, si rimanda ad altre pubblicazioni.

#### **1.1 Base normativa italiana**

La base normativa italiana per il calcolo degli elementi strutturali è data dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, così come pubblicate in GU il 14.1.2008 e come entrate in vigore, dopo diverse vicissitudini in particolar modo per quanto concerne il legno, per tutte le strutture nuove a partire dal 1 luglio 2009. Le NTC - spesso anche semplicemente indicate con la dicitura "Testo Unico", che non è formalmente corretta - contengono al capitolo 1 e al capitolo 12 l'indicazione esplicita circa la possibilità di completare le indicazioni in esse contenute con ulteriori documenti che costituiscano

documenti di comprovata validità. In particolar modo sono intesi ed indicati in questo contesto i testi delle normative Europee con i relativi documenti di applicazione, come pure le istruzioni e i documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerca (C.N.R.).

In questo documento (NTC, DM08) sono contenute tutte le basi e i principi per il calcolo delle strutture di legno, e più precisamente in 3 parti distinte:

- nel capitolo "4. Norme sulle costruzioni" si trova un sottocapitolo "4.4 Costruzioni di legno" che contiene in 12 pagine le indicazioni sui principi di calcolo da applicare e da seguire per gli elementi strutturali di legno;
- nel capitolo "7. Progettazione per azioni sismiche" un sottocapitolo di 5 pagine "7.7 Costruzioni di legno" contiene le indicazioni essenziali e specifiche alle strutture di legno in zona sismica;
- nel capitolo "11. Materiali e prodotti per uso strutturale" è contenuto un sottocapitolo "11.7 Materiali e prodotti a base di legno", che in 8 pagine descrive le prescrizioni legate all'omologazione e alla certificazione dei materiali di legno per uso strutturale.

Le prescrizioni di calcolo contenute nel capitolo 4.4. sono molto succinte e contengono solo alcune indicazioni concrete sui modelli di calcolo che permettono di determinare la resistenza e la rigidezza degli elementi strutturali. Le indicazioni dettagliate si trovano nel DT206-CNR, dal titolo "Istruzioni per la progettazione, Esecuzione e Controllo delle strutture di legno" edito nel 2008 (edizione riveduta della prima del 2007), che è quindi, di fatto, il complemento applicativo delle NTC.

Le indicazioni contenute nel capitolo 7.7 riguardano l'aspetto particolare della sicurezza sismica delle costruzioni di legno, cui si aggiungono alcune considerazioni generali in relazioni alle costruzioni di legno in zona sismica, contenute nel capitolo 7.2.

Il capitolo 11.7 descrive le caratteristiche dei materiali e prodotti a base di legno. In esso sono descritti in modo esplicito il legno massiccio (capitolo 11.7.2), il legno con giunti a dita (capitolo 11.7.3) e il legno lamellare incollato (capitolo 11.7.4). Appare evidente come l'XLAM non rientri in nessuna di queste 3 categorie e non sia quindi oggetto di questi capitoli o di un altro capitolo specifico delle NTC. L'XLAM è oggetto del capitolo "11.7.6 Altri prodotti derivati dal legno per uso strutturale", che rimanda alle procedure di qualificazione del capitolo 11.7.10.

## 1.2 Le basi del calcolo delle strutture di XLAM

Le basi del calcolo delle strutture di legno sono ammesse come informazioni di base e non sono trattate in modo esplicito in questo documento. Per l'approfondimento si rimanda al prontuario 5 di promo\_legno che descrive nel dettaglio questi aspetti.

I valori di calcolo per le proprietà del materiale sono definiti nelle NTC in modo dettagliato e in modo leggermente diverso da quanto si trova in tutti gli altri documenti normativi, nazionali e comunitari, europei. In particolare il valore numerico dei coefficienti parziali di sicurezza relativi al materiale assume valori diversi da quelli abituali, e diversi da quelli previsti dalle Istruzioni del DT206-CNR.

I valori di calcolo della resistenza del materiale sono definiti nel modo seguente:

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M},$$

dove  $k_{mod}$  = coefficiente di correzione per la durata del carico e per la classe di servizio  
 $X_d$  = valore caratteristico della resistenza considerata  
 $\gamma_M$  = coefficiente parziale per la sicurezza del materiale.

I valori del coefficiente parziale per la sicurezza del materiale  $\gamma_M$  sono definiti nella tabella 4.4.III delle NTC ed assumono valori più grandi rispetto a quanto contenuto in tutti i documenti normativi europei e nel DT-206. I valori di  $\gamma_M$  sono riassunti nella tabella seguente.

	Valori di $\gamma_M$	
	NTC - DM08	DT206 - CNR
<b>Combinazioni fondamentali</b>		
Legno massiccio	1,50	1,30
Legno lamellare incollato	1,45	1,25
Pannelli di truciolari e di fibre	1,50	1,30
Pannelli di compensato e OSB	1,40	1,20
Unioni e collegamenti	1,50	1,30
<b>Combinazioni eccezionali</b>	1,00	1,00

È superfluo ricordare che le prescrizioni delle NTC prevalgono su quelle del DT206 e che quindi per il calcolo degli elementi di legno si applicheranno i valori della colonna relativa alle NTC. La quasi totalità degli esempi di calcolo disponibili al momento, come pure praticamente tutti i manuali di calcolo disponibili, si basano sui valori dei coefficienti parziali per la sicurezza del materiale contenuti negli Eurocodici e basati sullo stato della scienza e della tecnica così come viene indicato e considerato in tutta Europa.

Gli esempi di applicazione e di calcolo redatti e distribuiti da promo\_legno non si discostano da questo modo di procedere, principalmente per mantenere il medesimo principio di calcolo in tutti gli esempi e permettere quindi lo studio e l'approfondimento della materia in modo semplice ed efficace.

Il calcolo dell'XLAM prevede in molti documenti l'uso del medesimo coefficiente parziale di sicurezza come per il legno lamellare incollato, per cui spesso è prescritto l'uso di  $\gamma_M = 1,25$ . Il manuale di calcolo dell'XLAM, edito dal Politecnico di Graz, su cui si basano le indicazioni contenute in questo documento propone e prescrive questo medesimo valore. Applicando le prescrizioni delle NTC il valore di  $\gamma_M$  da applicare al calcolo strutturale degli elementi di XLAM è quindi di 1,45.

Per i valori di  $k_{mod}$  da applicare al calcolo dell'XLAM valgono le medesime riflessioni e conclusioni. I valori di  $k_{mod}$  contenuti nelle NTC sono praticamente identici ai valori contenuti nel DT206 e negli Eurocodici (solo un valore per i carichi di durata istantanea varia e deve essere ridotto secondo le

NTC da 1,1 a 1,0). I valori di  $k_{mod}$  per il legno lamellare incollato e per gli elementi XLAM sono elencati nella tabella seguente.

	Classe di servizio	Classe di durata del carico				
		permanente	lunga	media	breve	istantanea
legno lamellare, XLAM	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	3	0,50	0,55	0,55	0,70	0,90

Un altro aspetto particolare da considerare in relazione all'XLAM è l'effetto del comportamento viscoso del materiale sulle deformazioni delle strutture. I risultati sperimentali ottenuti su elementi di XLAM mostrano come i valori di calcolo ammessi normalmente per il legno lamellare incollato portino a sottovalutare questo effetto. Ciò è dovuto alla presenza degli strati incrociati e segnatamente alla presenza di elementi sollecitati nella direzione trasversale rispetto alla fibratura; si tratta di un fenomeno noto anche per il comportamento dei pannelli di compensato di piallacci e di sfogliati classici. Per l'XLAM è quindi consigliabile usare i valori indicati nelle normative di riferimento Europee per i materiali a struttura multistrato con strati incrociati, cioè per il compensato. I valori del coefficiente di deformazione  $k_{def}$  assumono quindi il valore di  $k_{def} = 0,8$  per la classe di servizio 1 e di  $k_{def} = 1,0$  per la classe di servizio 2. Questi valori si trovano anche nelle prescrizioni delle NTC.

### 1.3 La conformità del materiale

Le regole che determinano la conformità del materiale sono descritte nel capitolo 11 delle NTC, e, per quanto riguarda il legno, nel capitolo 11.7. Dato per scontato, e come indicato sopra, che per l'XLAM non esiste al momento nessuna normativa armonizzata europea e nessuna indicazione normativa riguardante la descrizione del prodotto e che l'XLAM non rientra nei materiali dei capitoli 11.2, 11.3 e 11.4 delle NTC, l'uso dell'XLAM quale materiale strutturale rientra nelle indicazioni del capitolo 11.1 e 11.7.10.

Senza voler entrare nei dettagli della certificazione del materiale, ci si limita qui a ricordare che, ai sensi delle NTC, il materiale per uso strutturale - e quindi anche l'XLAM - deve essere qualificato (definito e caratterizzato) secondo le disposizioni relative alla marcatura CE del prodotto. In mancanza della marcatura CE valgono le disposizioni integrative del capitolo 11.7.10 delle NTC in cui è prevista l'obbligatoria qualificazione della produzione da parte del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Per i prodotti provenienti dall'estero è prevista dal capitolo 11.7.10.2 l'applicabilità di quanto appena descritto, con la possibilità per il produttore di richiedere allo stesso servizio l'equivalenza della procedura adottata nel paese d'origine.

L'XLAM è quindi a pieno titolo un materiale per uso strutturale ai sensi delle NTC, a condizione che il prodotto disponga di una marcatura CE, o in alternativa che il produttore disponga di una corrispondente qualifica da parte del Servizio Tecnico Centrale.

Gli aspetti legati alla qualificazione formale dei produttori e dei diversi prodotti di XLAM disponibili non sono di rilevanza principale per le fasi di progettazione e di calcolo degli elementi strutturali, per

---

cui non si approfondisce ulteriormente questo aspetto. È comunque dato per scontato, che i prodotti di XLAM disponibili per la realizzazione di elementi strutturali devono rispettare le condizioni di qualificazione indicate.

#### 1.4 Il comportamento sismico

Il comportamento sismico delle strutture di legno, e in particolar modo gli aspetti legati al calcolo e alla concezione progettuale delle strutture di XLAM in zona sismica, anche in relazione ai risultati sperimentali più recenti, sono trattate in un altro documento.

Ci si limita qui a ricordare che l'aspetto della sicurezza in caso di azione sismica delle strutture di legno è regolamentato nel capitolo 7.7 delle NTC, dove sono indicati i principi essenziali della progettazione per azioni sismiche delle strutture di legno. Ci si limita pertanto qui ad alcune indicazioni generiche, in relazione alle strutture di legno con pannelli XLAM in zona sismica.

L'altezza massima delle costruzioni di legno è limitata a due piani nella zona sismica 1, qualora la costruzione non acceda alle riserve anelastiche della struttura. La possibilità di accedere a riserve anelastiche delle costruzioni con struttura XLAM è stata dimostrata ampiamente, fra l'altro, da prove sperimentali su edifici di dimensioni ragguardevoli. Nelle NTC le strutture formate da pannelli XLAM, sotto forma di pareti e di solette collegate fra di loro tramite connettori meccanici, fanno parte della tipologia strutturale "pannelli di parete incollati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni", e sono quindi definite come strutture aventi quanto meno una bassa capacità di dissipazione energetica, cui viene attribuito il fattore di struttura  $q_0 = 2.0$ .

Il comportamento delle strutture di legno dipende da una serie di fattori che ne possono determinare, fra l'altro il comportamento dissipativo in modo determinante. Le costruzioni con struttura formata da XLAM non fanno eccezione a ciò e l'approfondimento del comportamento in caso di azione sismica è stato ed è tuttora oggetto di studi scientifici, che possono senza dubbio essere integrati - in modo appropriato - nella considerazione dell'azione sismica sulla costruzione, nella valutazione delle sollecitazioni che si instaurano e nella valutazione della sicurezza sismica.

Nell'ambito di questa introduzione ci si limita alla constatazione che le strutture formate da elementi XLAM collegati fra loro con connettori meccanici sono considerate dalla classificazione delle NTC come strutture con capacità dissipativa, e quindi a tutti gli effetti applicabili anche in zone ad alto rischio sismico e, quindi, non soggette alla limitazione dell'altezza massima dell'edificio a due piani.

#### 1.5 Premesse alle indicazioni sull'analisi strutturale e sul calcolo

L'applicazione della scienza delle costruzioni permette allo strutturista esperto e addentro alle problematiche della costruzione di legno e del comportamento strutturale degli elementi dei materiali a base di legno di comprendere ed analizzare il comportamento strutturale dell'XLAM. Le procedure di verifica sono date dall'applicazione di queste conoscenze alle regole per la verifica dello stato limite ultimo contenute nelle normative già citate.

I profili prestazionali del materiale sono contenuti nelle specifiche delle omologazioni e delle certificazioni dei diversi prodotti, che spesso contengono anche indicazioni relative al calcolo strutturale, alle procedure di verifica e ai valori da assumere in relazione alle normative in vigore nei diversi paesi. Inoltre si trovano in alcuni testi delle omologazioni dei prodotti XLAM indicazioni relative a normative ormai superate e da qualche anno non più in vigore.

Nell'intento di offrire indicazioni indipendenti dai singoli prodotti, e valide comunque in modo generale, le indicazioni che seguono non sono riferite a nessuno prodotto XLAM in particolare, ma sono riferite in modo generico al materiale XLAM, prodotto tramite incollatura strutturale di più strati di tavole di spessore eventualmente diverso, le cui caratteristiche meccaniche dipendono dalla qualità - e quindi dalle caratteristiche meccaniche, e quindi dalla classe di resistenza - del materiale da cui sono composti i singoli strati. I modelli di calcolo descritti hanno quindi una valenza generale e si basano sulle indicazioni delle normative attuali a livello europeo. Le basi scientifiche per l'approfondimento di quanto indicato di seguito sono descritte nel manuale sul calcolo secondo le normative comunitarie attuali e sull'uso strutturale dell'XLAM dal titolo "BSPHandbuch - Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz - Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts", pubblicato dall'Istituto per le costruzioni e la tecnologia del legno del Politecnico di Graz nel novembre 2009 in lingua tedesca.

## 1.6 Limitazione

Le indicazioni contenute in questo documento sono riferite ai pannelli XLAM, cioè ai pannelli di legno massiccio incollato a strati incrociati. Gli altri materiali a base di strati incrociati, ma non incollati fra di loro, non sono oggetto di questo documento.

## 2 Elementi inflessi

### 2.1 Analisi strutturale

La determinazione degli sforzi interni delle solette di XLAM può in molti casi partire dal principio che l'elemento di XLAM è sottoposto alla sollecitazione di flessione e taglio in una sola direzione del piano. L'elemento inflesso diventa quindi l'elemento più semplice, e probabilmente anche quello più frequente, da calcolare e dimensionare. Il principio di calcolo indicato di seguito si applica comunque alla verifica della resistenza a flessione e a taglio del pannello XLAM, indipendentemente dal fatto che sia sollecitato in una sola oppure in entrambe le direzioni del suo piano.

### 2.2 Verifica a flessione

La distribuzione delle sollecitazioni a flessione deve tenere conto della struttura a strati dell'elemento e delle differenti caratteristiche meccaniche dei singoli strati.

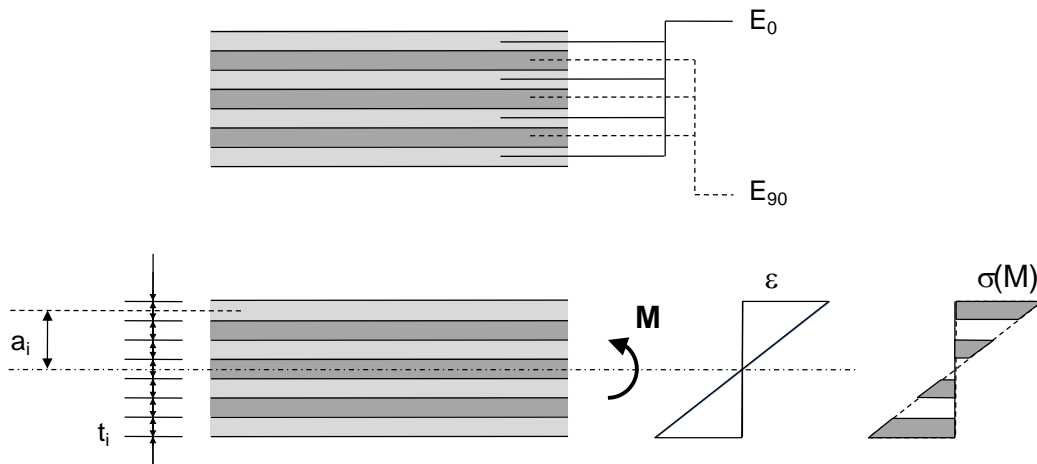


Figura 1: distribuzione delle sollecitazioni dovute al momento Flettente M - Riferimenti geometrici

Il calcolo della rigidezza flessionale della sezione di XLAM deve prendere in considerazione la differenza del modulo E fra i diversi strati di tavole; vista la grande differenza fra  $E_{90}$  e  $E_0$  è senz'altro indicato trascurare gli strati disposti trasversalmente.

La rigidezza flessionale della sezione dell'elemento XLAM, per una larghezza unitaria b dell'elemento stesso, è data dalla relazione:

$$K = EJ = \sum (J_i \cdot E_i) + \sum (A_i \cdot a_i^2 \cdot E_i)$$

dove

K	=	rigidezza flessionale nella direzione considerata
$J_i$	=	inerzia del singolo strato
$E_i$	=	modulo E del singolo strato
$A_i$	=	superficie del singolo strato
$a_i$	=	distanza dal baricentro della sezione
$t_i$	=	spessore del singolo strato.

La distribuzione delle tensioni di flessione è indicata nella figura, e può essere determinata con:

$$\sigma = \frac{M}{K} \cdot a \cdot E_i$$

dove

M	=	momento flettente
a	=	distanza dal baricentro della fibra considerata.

Nel caso di una sezione con strati di materiale della medesima classe di resistenza, il valore massimo della tensione di flessione è dato da:

$$\sigma = \frac{M}{W^*}, \text{ con } W^* = \frac{K}{h/2} \cdot E_0$$

dove

h	=	altezza dell'elemento XLAM considerato
$E_0$	=	modulo E degli strati esterni considerati.



Nel caso delle flessione nell'altra direzione del pannello XLAM (spesso definita come la direzione debole), i due strati esterni possono essere trascurati, e lo stesso principio può essere applicato.

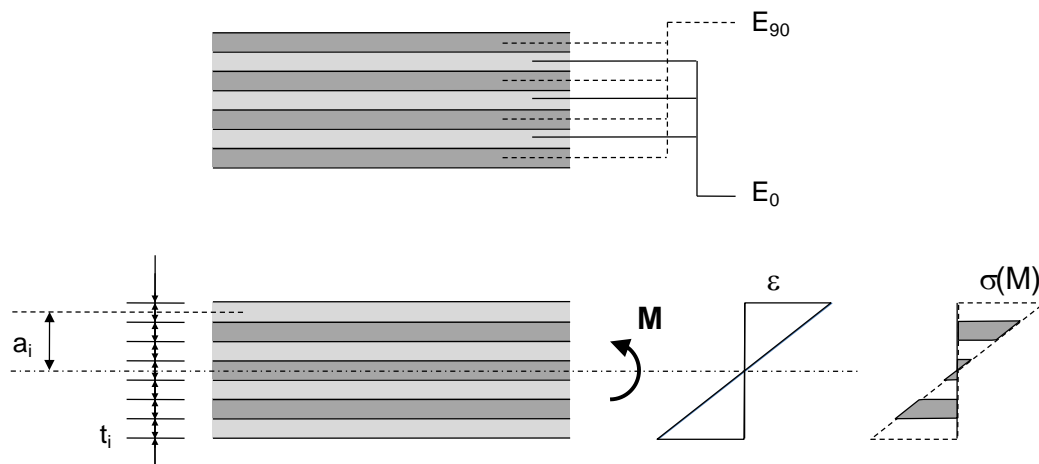


Figura 2: Direzione debole del pannello: distribuzione delle sollecitazioni dovute al momento Flettente M - Riferimenti geometrici

La verifica dello stato limite ultimo, a flessione, dell'XLAM può avvenire nella forma comune a tutte le verifiche:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}, \text{ con } f_{m,d, XLAM} = f_{m,d, BSH} \cdot k_{sys}$$

dove

- $f_{m,d, XLAM}$  = valore di calcolo della resistenza a flessione dell'XLAM
- $f_{m,d, BSH}$  = valore di calcolo della resistenza a flessione del lamellare della classe di resistenza relativa alle lamelle considerate
- $k_{sys}$  = coefficiente di sistema.

Il valore della resistenza a flessione dell'elemento XLAM può essere ammesso come corrispondente alla resistenza a flessione del legno lamellare realizzato con le lamelle di uguale classe di resistenza. La similitudine della composizione della sezione considerata, in relazione allo stato limite ultimo, e i risultati della ricerca scientifica giustificano questa conclusione.

Il coefficiente di sistema permette di aumentare la resistenza di un elemento strutturale composto da più componenti sollecitati in parallelo, cioè in modo da poter ridistribuire le sollecitazioni sui componenti più resistenti, alleviando quindi i più deboli. Il coefficiente di sistema è definito, fra l'altro, negli Eurocodici nella forma:

$$k_{sys} = 1 + 0.025 \cdot n$$

$$k_{sys, max} = 1.1$$

dove  $n$  = numero di lamelle sollecitate in parallelo  
e  $n > 1$ .

Il numero di lamelle efficaci ai fini della determinazione di  $k_{sys}$  deve essere definito sulla base della larghezza del pannello XLAM e sulla larghezza massima delle singole lamelle, come indicato dalla descrizione relativa all'omologazione del prodotto XLAM in questione. Di regola si può ammettere che con elementi di larghezza di almeno 1 metro, le condizioni sono date per ammettere  $k_{sys} = 1,1$ . In caso di sollecitazioni non costanti su almeno questa larghezza, come per esempio in caso di sollecitazioni non omogenee o localmente più elevate, il coefficiente di sistema non può essere applicato.

Le indicazioni relative al valore di calcolo della resistenza a flessione dell'XLAM si riferiscono al modello di calcolo generico citato sopra. In alternativa a questo valore, possono essere applicati i valori di calcolo (o caratteristici) della resistenza a flessione relativi al singolo prodotto, come indicati nelle omologazioni o nei profili prestazionali ad essi riferiti.

Nel caso di flessione biassiale, la verifica deve essere eseguita per le due direzioni del piano in modo indipendente, considerando in entrambi i casi la tensione flessionale massima nelle tavole con la fibratura orientata nella direzione della sollecitazione considerata.

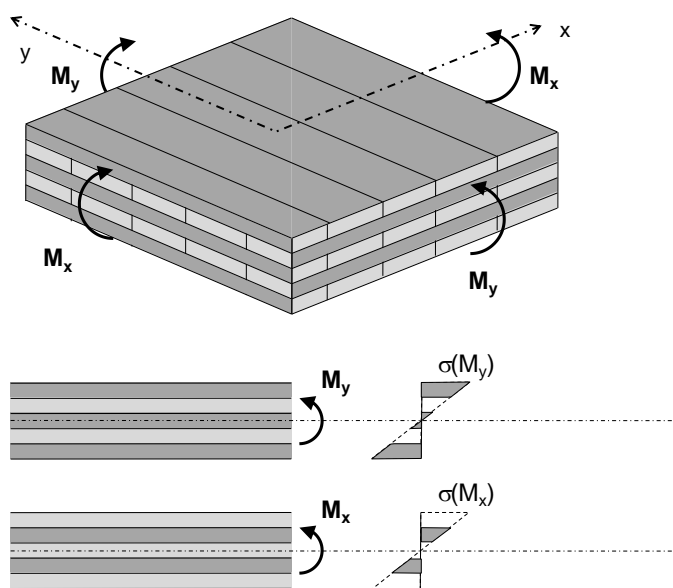


Figura 3: Flessione biassiale nel piano della piastra

La verifica assume la forma seguente:

$$\sigma_{m_x, \max, d} \leq f_{m, d, XLAM} \quad \text{e} \quad \sigma_{m_y, \max, d} \leq f_{m, d, XLAM}$$

Una forma di interazione fra le sollecitazioni nelle due direzioni, che possa avere un effetto sulla resistenza ultima, non è al momento conosciuta e non può essere ipotizzata.

Nel caso di presenza di forze assiali sull'elemento di XLAM, queste possono essere determinate seguendo il medesimo principio, trascurando gli strati con la fibratura trasversale rispetto alla direzione della forza assiale e sovrapponendo le tensioni flessionali e quelle dovute alla forza assiale. Anche in questo caso, la verifica deve essere fatta nelle due direzioni del piano del

pannello, considerando ogni volta la tensione più grande relativa allo strato nella direzione considerata (si veda anche il capitolo sulle pareti).

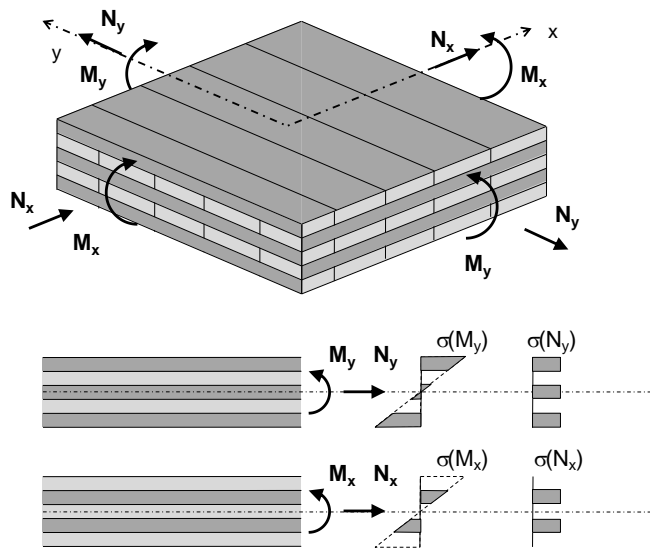


Figura 4: Flessione biassiale e forze normali

Le verifiche assumono quindi la forma:

$$\frac{\sigma_{mx,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{cx,max,d}}{f_{c,d, XLAM}} \leq 1.0 \quad \text{e} \quad \frac{\sigma_{my,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{cy,max,d}}{f_{c,d, XLAM}} \leq 1.0, \text{ oppure}$$

$$\frac{\sigma_{mx,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{tx,max,d}}{f_{t,d, XLAM}} \leq 1.0 \quad \text{e} \quad \frac{\sigma_{my,max,d}}{f_{m,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{ty,max,d}}{f_{t,d, XLAM}} \leq 1.0$$

dove  $f_{c,d, XLAM} = f_{c,d, X-BSH}$  = valore di calcolo della resistenza a flessione del lamellare della classe di resistenza relativa alle lamelle considerate  
 $f_{t,d, XLAM} = f_{t,d, X-bsh}$  = valore di calcolo della resistenza a flessione del lamellare della classe di resistenza relativa alle lamelle considerate

### 2.3 Verifica a taglio

La verifica a taglio trasversale al piano della piastra (taglio dovuto a flessione) avviene seguendo il medesimo principio indicato per la verifica a flessione. La determinazione delle tensioni di taglio sulla sezione considerata deve tener conto delle caratteristiche diverse dei singoli strati. In questo caso non sarebbe ragionevole definire come trascurabili gli strati con la fibratura trasversale rispetto alla direzione considerata, in quanto questi strati sono essenziali per la trasmissione della sollecitazione di taglio fra gli strati disposti parallelamente alla direzione considerata.

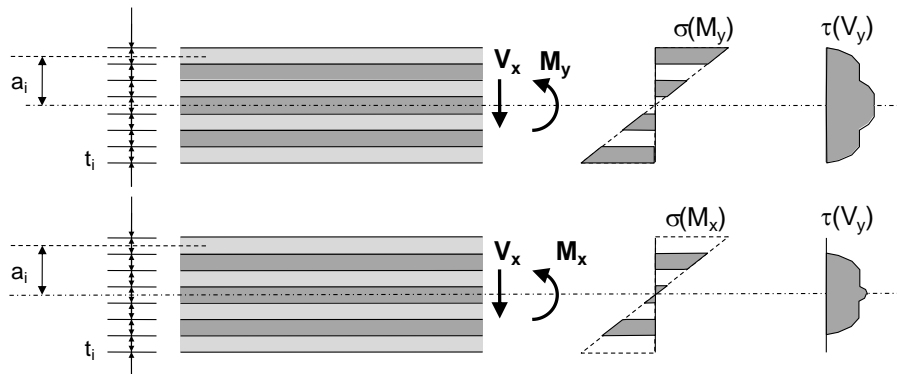


Figura 5: Flessione e taglio trasversale al piano con la rispettiva distribuzione delle tensioni sulla sezione

Il calcolo della distribuzione delle tensioni di taglio è dato dalla relazione:

$$\tau(a) = \frac{V \cdot S}{K \cdot b} = \frac{V \cdot \int E \cdot a \cdot dA}{K \cdot b}$$

dove

a	=	distanza dal baricentro
b	=	larghezza dell'elemento considerato
S	=	momento statico della parte di sezione.

Le curve con la distribuzione delle tensioni tangenziali mostra come le stesse possano raggiungere il loro valore massimo negli strati trasversali della sezione considerata. La verifica dello stato limite ultimo deve tenere conto del fatto che la resistenza a taglio dipende dalla direzione dell'orientazione della fibratura dell'elemento considerato. Quindi, oltre alla verifica a taglio sulla base della resistenza a taglio usuale, occorre comunque verificare la resistenza a taglio negli strati trasversali, dove la resistenza a taglio risulta essere molto più ridotta. Negli strati trasversali è determinante la resistenza a taglio trasversale, dove il collasso del materiale è dato dal raggiungimento della resistenza a trazione perpendicolare alla fibratura nella direzione della sollecitazione principale, inclinata di 45° rispetto all'asse dell'elemento considerato, o di inclinazione di +/- 45+ delle tensioni principali. Si parla in questo caso di taglio trasversale, indicandone la resistenza corrispondente con l'indice "r", dalla definizione inglese di "rolling shear", che a sua volta si ispira alla forma del collasso in questo caso particolare.

Si ricorda che la distribuzione delle tensioni descritta in questo modo rappresenta una approssimazione, in quanto le deformazioni a taglio dei singoli strati non vengono considerate. Questo modo di procedere può essere giustificato dal fatto che per elementi con uno spessore sufficientemente ridotto (rapporto fra spessore e luce dell'elemento superiore a 10) le differenze sono praticamente trascurabili.

La verifica a taglio assume quindi la doppia forma:

$$\tau_d \leq f_{v,d}, \text{ per gli strati nella direzione considerata, e}$$

$\tau_d \leq f_{v,r,d}$ , per gli strati trasversali rispetto alla direzione considerata.

La resistenza a taglio  $f_v$  deve, secondo il modello di calcolo già citato, essere definita identica a quella del legno lamellare incollato della classe di resistenza corrispondente alla classe di resistenza delle lamelle che compongono l'XLAM. Il medesimo principio vale per la determinazione della resistenza al taglio trasversale, il cui valore è pari al doppio della resistenza a trazione perpendicolare alla fibratura secondo gli Eurocodici, mentre assume un valore simile, ma definito in modo assoluto e specifico secondo altre fonti. Lo stesso modello permette di aumentare del 25% questo valore della resistenza a taglio trasversale, in modo da considerare anche in questo caso il già citato effetto di sistema.

Le indicazioni relative al valore di calcolo della resistenza a taglio e a taglio trasversale dell'XLAM si riferiscono al modello di calcolo generico citato sopra. In alternativa a questi valori, possono essere applicati i valori di calcolo (o caratteristici) della resistenza a taglio relativi al singolo prodotto, come indicati nelle omologazioni o nei profili prestazionali ad essi riferiti.

I valori di calcolo della resistenza si ottengono, come di consueto, partendo dai valori caratteristici e applicando i coefficienti di correzione e di sicurezza apposti:

$$f_{v,d} \leq \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_m} \quad e \quad f_{v,r,d} \leq \frac{k_{mod} \cdot f_{v,r,k}}{\gamma_m}$$

A dipendenza della composizione dell'XLAM e della direzione considerata, una delle due verifiche risulterà essere quella determinante. Di regola, visto il valore decisamente molto basso della resistenza a taglio trasversale, questa verifica risulta determinante rispetto alla verifica a taglio longitudinale.

#### 2.4 Pressione trasversale al piano del pannello

Nella direzione dello spessore del pannello (spesso indicato come "asse z"), tutti gli strati sono sollecitati perpendicolarmente alla fibratura. Agli appoggi per contatto dei vari elementi orizzontali si presenta quindi la medesima situazione di rischio di schiacciamento trasversale alla fibratura come per tutti gli elementi strutturali di legno. Nel caso dell'XLAM la situazione si presenta all'appoggio degli elementi di soletta su una parete.

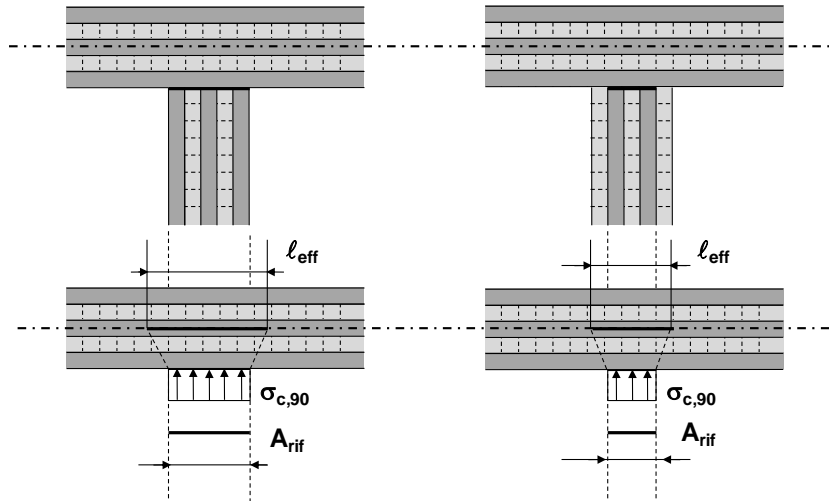


Figura 6: Compressione perpendicolare alla fibratura agli appoggi

Il calcolo delle tensioni perpendicolari alla fibratura avviene sulla base di una superficie di contatto di riferimento, che è determinata dalla larghezza degli strati verticali che introducono la forza nella soletta XLAM; in altri termini, gli eventuali strati orizzontali, esterni, della parete non sono considerati nel calcolo. In caso di appoggio omogeneo, per esempio con altri materiali, si considera la superficie effettiva di contatto. La verifica assume quindi la forma:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

La possibilità di aumentare il valore di calcolo della resistenza a compressione perpendicolare alla fibratura, come pure di determinare il valore di  $\sigma_{c,90,d}$  sulla base di una larghezza effettiva e più grande della larghezza di contatto reale, rimangono invariate. Nell'Eurocodice 5 questa possibilità è presa in considerazione tramite il coefficiente  $k_{90}$ ; nel DT206, che è la base di calcolo valida in Italia, la determinazione della lunghezza di appoggio effettiva è definita in modo diverso.

## 2.5 Verifica dello stato di servizio e calcolo delle deformazioni

Per il calcolo dello stato di servizio del caso semplice di un carico distribuito su tutta la superficie dell'elemento è sufficiente definire i valori della rigidezza a flessione e a taglio dell'XLAM in funzione della sua stratigrafia.

La rigidezza a flessione è già stata definita ed è data dalla relazione:

$$K = EJ = \sum (J_i \cdot E_i) + \sum (A_i \cdot a_i^2 \cdot E_i)$$

dove

K	=	rigidezza flessionale nella direzione considerata
$J_i$	=	inerzia del singolo strato
$E_i$	=	modulo E del singolo strato
$A_i$	=	superficie del singolo strato

- $a_i$  = distanza dal baricentro della sezione
- $t_i$  = spessore del singolo strato.

La rigidezza a taglio dell'XLAM deve considerare l'effetto dei singoli strati e della loro diversa rigidezza a taglio. Il modulo  $G$  varia infatti a dipendenza dell'orientazione della sollecitazione; si definisce quindi un modulo  $G_0$  per la sollecitazione a taglio longitudinale e un modulo  $G_{90}$  per la sollecitazione a taglio trasversale.

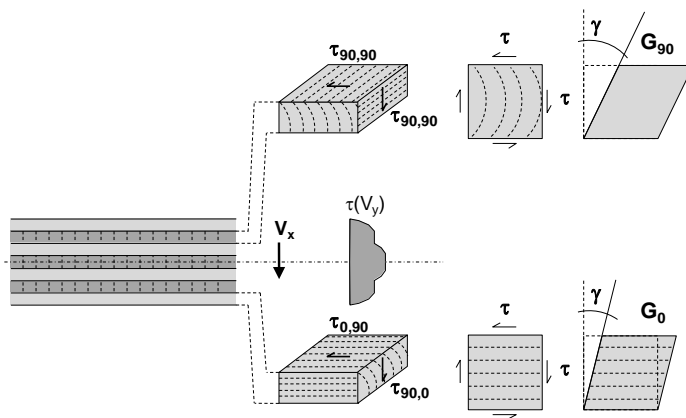


Figura 7: Sollecitazioni a taglio e definizione di taglio trasversale, con i moduli  $G_0$  e  $G_{90}$

La rigidezza a taglio della sezione si ottiene con:

$$S_V = GA' = \kappa \cdot \sum(G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \kappa \cdot \sum(G_i \cdot A_i)$$

- dove  $S_V$  = rigidezza a taglio nella direzione considerata
- $G_i$  = modulo di taglio del singolo strato
- $A_i$  = superficie del singolo strato
- $b_i$  = larghezza dell'elemento considerato
- $t_i$  = spessore del singolo strato
- $\kappa$  = coefficiente di correzione.

Il coefficiente di correzione  $\kappa$  permette di considerare le caratteristiche non uniformi su tutto lo spessore del materiale e dipende dalla geometria e dalle caratteristiche dei singoli strati. Nella forma competa può essere espresso nel modo seguente:

$$\kappa = \frac{1}{\sum(G_i \cdot A_i) \frac{1}{K^2} \cdot \int \frac{S^2(z)}{G_i(z) \cdot b} dz}$$

- dove  $S(z)$  = momento statico
- $z$  = asse verticale (spessore del materiale).

Il valore di  $\kappa$  varia in funzione del numero di strati, del rapporto fra  $G_0$  e  $G_{90}$  e dello spessore dei singoli strati. L'analisi delle variazioni di questo coefficiente mostra come, per uno spessore costante dei singoli strati e per un rapporto fra  $G_0$  e  $G_{90}$  uguale a 10 si ottengono i valori seguenti:

$\kappa$	Numero strati					
	3	5	7	9	11	13
	0,21	0,24	0,26	0,27	0,27	0,27

Anche considerando una composizione dell'XLAM con strati di spessore diverso, e con un numero di strati più importante in una direzione rispetto all'altra, si può constatare come il valore di  $\kappa$ , per le stratigrafie di rilevanza effettiva nelle applicazioni pratiche, assuma sempre valori fra 0,20 e 0,30. Sulla base della constatazione che le deformazioni dovute all'effetto delle forze di taglio trasversali al pannello non superano di regola il 20% delle deformazioni totali, si può ammettere l'uso di un valore costante per il calcolo delle deformazioni effettive degli elementi strutturali. L'errore commesso è sufficientemente piccolo, da poter giustificare questo modo di procedere.

I valori caratteristici della rigidezza del materiale sono definiti dai profili prestazionali del materiale, compresi i valori di  $G_0$  (modulo di taglio "normale") e di  $G_{90}$ . Anche in questo caso, in modo generale valgono i valori relativi al legno lamellare composto da lamelle della corrispondente classe di resistenza. In alcune normative europee il valore di  $G_{90}$  è definito nel modo seguente:

$$G_{90} = \frac{G_0}{10} .$$

Anche in questo caso, spesso le omologazioni dei singoli prodotti contengono indicazioni dettagliate al riguardo; possono quindi essere applicati i valori di calcolo (o caratteristici) della rigidezza relativi al singolo prodotto, come indicati nelle omologazioni o nei profili prestazionali ad essi riferiti.

### 3 Elementi di parete

#### 3.1 Introduzione

L'elemento di parete è, dal punto di vista strutturale una lastra, cui si aggiunge l'effetto di piastra verticale quando la parete è sollecitata anche a flessione, per esempio a causa dell'azione del vento sui lati dell'edificio.

Per l'effetto strutturale di piastra restano valide le considerazioni fatte al capitolo precedente; il comportamento strutturale di lastra deve, invece, essere definito e analizzato nel dettaglio, prima di procedere al dimensionamento e alle verifiche necessarie.

L'elemento di lastra con le forze che ne definiscono gli sforzi interni è descritto nella figura seguente; le forze interne sono date dalle forze  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_{xy}$ , dove  $n_x$  e  $n_x$  rappresentano le forze assiali, mentre  $n_{xy}$  rappresenta la sollecitazione a taglio, nel piano del pannello, dell'XLAM. Con le lettere minuscole (per esempio  $n_x$ ) si indicano le forze per unità di larghezza dell'elemento (per



esempio in kN/m), mentre con le lettere maiuscole (per esempio  $N_x$ ) si indicano le forze effettive (per esempio in kN).

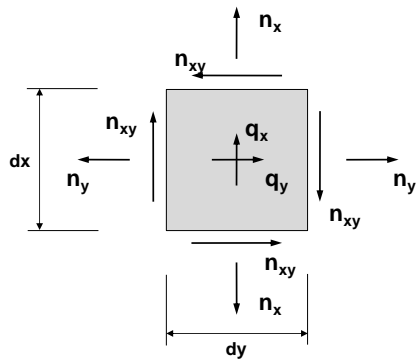


Figura 8: Elemento di lastra con le forze agenti su di esso

I diversi casi di sollecitazione sono analizzati e discussi di seguito, sia in relazione alla resistenza e alla verifica dello stato limite ultimo, che in relazione alla rigidezza e al calcolo delle deformazioni.

### 3.2 Sollecitazioni a taglio nel piano della lastra

Le sollecitazioni dovute alla forza  $n_{xy}$  - anche indicata spesso come forza di taglio  $V$  se non riferita ad una porzione di lastra unitaria - creano all'interno dell'elemento XLAM uno stato tensionale a prima vista piuttosto complesso, risultante dalla struttura multistrato del materiale.

Le tensioni di tagli su un generico elemento di lastra possono essere determinate in modo molto semplice secondo la relazione:

$$\tau_{xy} = \tau_0 = \frac{n_{xy}}{t} = \frac{V_{xy}}{t \cdot a}$$

Queste tensioni di taglio  $t$  sono di regola ammesse come costanti su tutto l'elemento, a causa delle condizioni di introduzione delle sollecitazione e dei vincoli geometrici cui è assoggettato l'elemento di lastra.

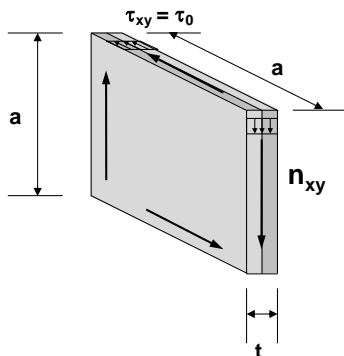


Figura 9: Tensioni di taglio su un elemento di lastra sollecitato a taglio

Nel caso dell'XLAM il materiale non è per niente omogeneo sul suo spessore, ma formato da una serie di strati incrociati, per cui è necessario considerare la composizione e l'orientazione dei singoli strati. La prima constatazione riguarda la non continuità del materiale nella direzione trasversale alla fibratura: non possono, infatti, essere escluse fessure trasversali, che interrompono questa continuità. Ciò vale, in prima analisi, indipendentemente dal tipo di materiale e indipendentemente dal fatto che le singole tavole siano incollate una di fianco all'altra o meno. L'analisi strutturale deve quindi partire dal principio secondo cui i diversi strati incrociati sono collegati fra loro soltanto tramite la superficie di contatto fra le tavole orizzontali e quelle verticali, e che la trasmissione delle forze fra uno strato e l'altro avviene tramite questa incollatura. Secondo questa ipotesi, il bordo libero delle singole tavole deve essere considerato come non sollecitato, per cui il flusso di taglio deve essere composto dall'incrocio di due tavole ortogonali, entrambe sollecitate da una forza di taglio.

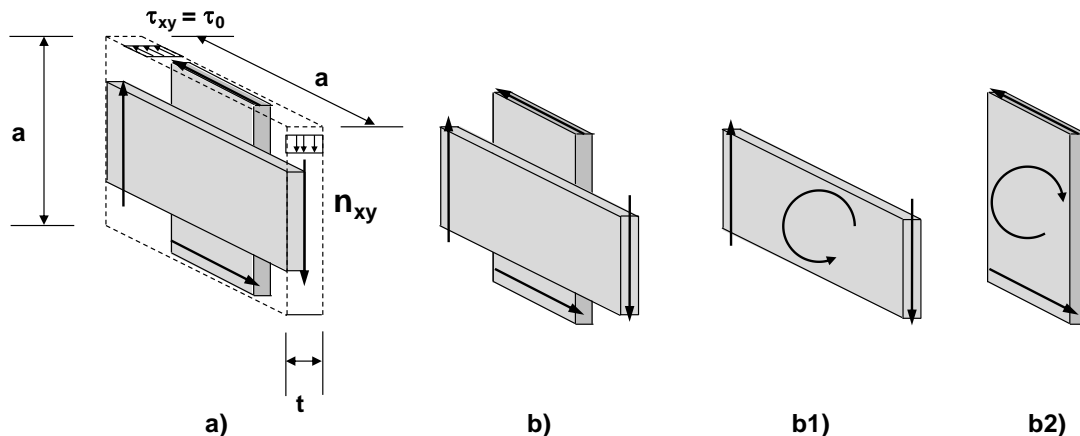


Figura 10: Sollecitazioni sulle due tavole ortogonali formanti l'elemento sollecitato a taglio

La sollecitazione a taglio dell'elemento è possibile soltanto scomponendo il flusso di taglio nella sollecitazione a taglio delle due tavole e in un momento torcente che le unisce fra loro; questo momento torcente crea la sollecitazione agente sulla superficie di contatto fra i due elementi. La sollecitazione a taglio dell'XLAM può quindi essere rappresentata come una duplice sollecitazione, formata da una componente di taglio e una componente di torsione. La sovrapposizione di queste due sollecitazioni rappresenta lo stato tensionale provocato dalla forza  $n_{xy}$  nell'XLAM. Queste due componenti sono anche definite come meccanismo di collasso 1 (taglio) e meccanismo di collasso 2 (torsione).

Le sollecitazioni dovute a questi due meccanismi devono essere determinate e verificate separatamente, in quanto si tratta di due meccanismi di rottura differenti, cui corrispondono due valori della resistenza differenti.

Le sollecitazioni derivanti dai due meccanismi possono essere rappresentate e determinate su un elemento di base e ideale, formato da due strati di tavole ortogonali e ammesso facente parte di un pacchetto di spessore non limitato, in modo da trascurare gli effetti dovuti alla mancanza della simmetria nel piano della lastra.

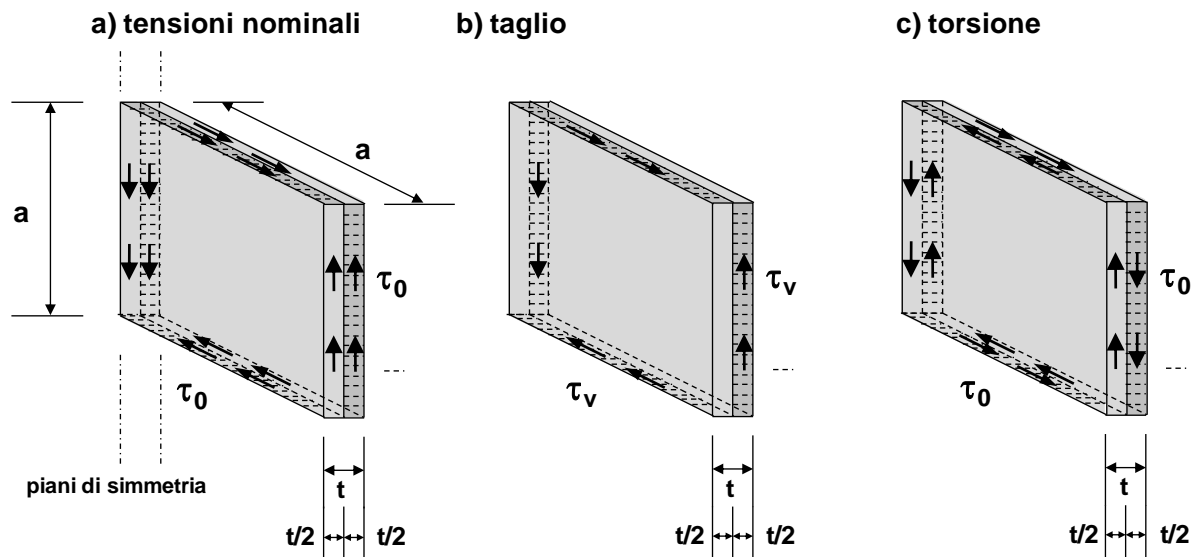


Figura 11: Caso generale della sollecitazione al taglio

Per il caso generale della figura 11 si ottiene la tensione nominale di taglio, sull'elemento ideale non fessurato e monolitico:

$$\tau_0 = \frac{V_{xy}}{t \cdot a},$$

mentre per il caso reale dell'elemento fessurato si ottiene la sovrapposizione dei casi b) e c) della figura, dove la forza di taglio  $V$  vale

$$V = t \cdot a \cdot \tau_0, \text{ che con lo spessore effettivo } t/2 \text{ permette di determinare la tensione dovuta al taglio}$$

.

La tensione dovuta alla torsione si ottiene determinando il momento torcente e dividendola per il momento resistente polare, e cioè con

$$M_t = \tau_0 \cdot t \cdot a^2, \text{ e con } W_p = \frac{a^3}{3}, \text{ si ottiene}$$

$$\tau_T = \frac{M_t}{W_p} = 3 \cdot \tau_0 \cdot \frac{t}{a}.$$

Restano da definire gli spessori effettivi da applicare al calcolo di un elemento strutturale di XLAM, e cioè non composto da elementi ideali, ma da elementi reali con un numero finito di strati e dove i

piani di simmetria, al contrario di quanto ammesso nella figura 11, non sono sempre presenti. Come riferimento per la definizione degli spessori possono essere considerate le superfici incollate, dato che le condizioni di equilibrio sono state stabilite sulla base di esse. Gli spessori dei singoli strati, come pure lo spessore totale della lastra devono essere trasformati in spessori ideali  $t^*$ , che serviranno da base per il calcolo delle tensioni di taglio e di torsione effettive.

Gli spessori ideali sono definiti nel modo seguente, in riferimento alle superfici incollate:

- per gli strati esterni: il valore minimo fra lo spessore dello strato interno e il doppio dello spessore dello strato esterno alla superficie incollata considerata:  
esempio per la superficie A:  $t^*_A = \min. (2t_1, t_2)$
- per gli strati interni: il valore minimo degli spessori degli strati adiacenti alla superficie incollata:  
esempio per la superficie B:  $t^*_B = \min. (t_3, t_4)$

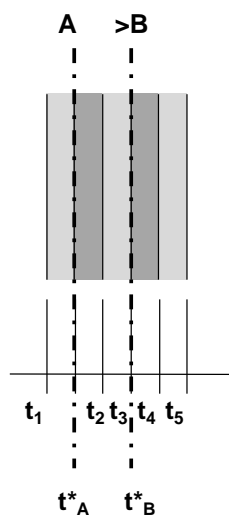


Figura 12: Spessori ideali degli strati per il calcolo della resistenza a taglio

Lo spessore totale ideale della lastra è dato dalla somma

$$t_{tot}^* = \sum_1^n t_i^*$$

dove  $t_i^*$  = spessore ideale dei singoli strati (in relazione alla superficie incollata)  
 $n$  = numero delle superfici incollate.

Si noterà che lo spessore totale ideale di calcolo è più ridotto dello spessore effettivo della lastra.

La verifica deve essere eseguita per i due casi in modo separato, e quindi nel modo seguente:

$$\tau_{T,d} \leq f_{T,d, XLAM} \quad \text{e} \quad \tau_{V,d} \leq f_{V,d, XLAM}$$

Per procedere alla verifica occorre prima di tutto definire la forza determinante, riferita alle superfici incollate:

$$n_{xy,i} = n_{xy} \frac{t_i^*}{\sum_1^n t_i^*} = n_{xy} \frac{t_i^*}{t_{tot}^*};$$

occorre quindi determinare la tensione di taglio ideale di riferimento, calcolata sullo spessore ideale della lastra:

$$\tau_{0,i} = \frac{n_{xy,i}}{t_i^*} = n_{xy} \frac{t_i^*}{\sum_1^n t_i^*} \cdot \frac{1}{t_i^*} = n_{xy} \frac{1}{\sum_1^n t_i^*} = n_{xy} \frac{1}{t_{tot}^*}.$$

È quindi possibile procedere alla verifica della resistenza per i due meccanismi in modo separato, e cioè:

$$\tau_{v,d} = 2 \cdot \tau_0^* \leq f_{v,d, XLAM} \quad \text{e} \quad \tau_{T,d} = 3 \cdot \tau_0^* \cdot \frac{t_i^*}{a} \leq f_{T,d, XLAM}.$$

I valori della resistenza a torsione risultati da prove sperimentali apposite confermano il valore spesso contenuto nelle omologazioni dei diversi prodotti, con  $f_{T,k, XLAM} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ .

Per i valori della resistenza a taglio  $f_{v,k}$  spesso si indica il valore di  $3,00 \text{ N/mm}^2$ , in analogia al legno lamellare incollato. La ricerca sperimentale conferma però l'ipotesi, secondo cui questo valore della resistenza sia, di fatto, decisamente più grande. I valori fino ad oltre  $10 \text{ N/mm}^2$ , risultanti dalle prove di laboratorio sono in accordo con i valori di resistenza a taglio nel piano noti per i pannelli di compensato di piallacci, dove le condizioni di sollecitazione e i vincoli dell'elemento sollecitato sono ben simili a quelli dell'XLAM, e ben diversi da quelli del legno lamellare incollato.

In questo modo è possibile procedere alla verifica della resistenza a taglio delle pareti XLAM sulla base di un modello di comportamento meccanico e strutturale completo. Questo modello è il risultato dalla ricerca scientifica in questo ambito. Per l'approfondimento e per lo studio completo del modello si rimanda al manuale del Politecnico di Graz già citato più sopra.

Le omologazioni dei vari prodotti XLAM, europee e nazionali, contengono in parte indicazioni per la verifica della resistenza a taglio delle pareti, che non sono basate su questo modello, ma su altri modelli di calcolo legati probabilmente alle prove sperimentali eseguite al momento della determinazione dei valori dei profili prestazionali contenuti nelle medesime omologazioni.

Per quanto riguarda le sollecitazioni a taglio, si trova nei documenti di omologazione la formulazione:

$$\tau_{v,d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{n_{xy,d}}{t_{\min}} \leq f_{v,d, XLAM}$$

dove  $t_{\min}$  = somma minima degli spessori degli strati nella medesima direzione.

La differenza è essenzialmente data dal coefficiente 3/2, che presuppone una distribuzione delle tensioni di taglio simile a quella della trave inflessa. A parte questa differenza di fondo, per il caso di elementi formati da strati di tavole di spessore identico fra loro, con il modello indicato sopra si ottengono i medesimi risultati.

Per la verifica a torsione, il modello di calcolo contenuto in alcune omologazioni conduce al medesimo risultato del modello qui rappresentato, se applicato al caso particolare della parete rettangolare, con strati di medesimo spessore e senza alcuna apertura. Per casi più complessi e con condizioni diverse l'applicazione e il confronto risultano decisamente più difficoltosi.

L'omologazione ETA-08/0242 indica, per la verifica a torsione, il seguente modello:

$$\tau_{T,d} = \frac{F_d \cdot h}{\sum J_p} \cdot \frac{a}{2} \leq f_{v,d}$$

dove

- $F_d$  = forza agente sulla parete
- $a$  = dimensione della superficie di contatto fra gli strati
- $h$  = altezza della parete
- $J_p$  = inerzia polare della medesima superficie.

### 3.2 Rigidezza a taglio nel piano della lastra e deformazioni

La rigidezza a taglio dell'elemento di parete deve tener conto dei due meccanismi definiti nel capitolo precedente e della loro effettiva sovrapposizione. La deformazione totale è data quindi dalla somma della componente data dalla tensione di taglio con la componente data dalla torsione.

Per la tensione di taglio si ha:

$$\gamma_1 = \frac{\tau_0}{G_{0,mean}};$$

per la componente data dalla torsione si ha:

$$\Phi = \gamma_2 = \frac{M_T}{G_T \cdot J_p} \cdot \frac{t}{2} = \frac{\tau_0 \cdot t \cdot a^2}{G_T \cdot \frac{a^4}{6}} \cdot \frac{t}{2} = \frac{6 \cdot \tau_0}{G_{0,mean}} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2;$$

dove  $G_T$  è stato ammesso come uguale alla metà di  $G_{0,mean}$ , cioè del valore del modulo di taglio delle tavole usate per la produzione dell'XLAM.

Interessante per l'applicazione pratica è la definizione di un modulo di rigidezza a taglio per la lastra di XLAM, e cioè nel formato:

$$D_{xy} = G^* \cdot t_{XLAM}$$

dove

- $D_{xy}$  = rigidezza a taglio della lastra XLAM
- $G^*$  = modulo di taglio della lastra XLAM
- $t_{XLAM}$  = spessore della lastra.

La determinazione di  $D_{xy}$  dipende da molti fattori, fra cui la geometria dell'XLAM ( $a$ ,  $t$ ); inoltre l'approccio qui rappresentato comprende diverse semplificazioni e approssimazioni, che possono essere corrette con appositi coefficienti di correzione. Rinunciando in questa sede a descrivere la procedura di determinazione dei valori esatti, ci si limita ad indicare il modello per determinare la rigidezza richiesta della lastra di XLAM. Partendo dal valore di  $G_{0,mean}$ , dato dalle caratteristiche del materiale, si può ottenere la rigidezza cercata con la relazione seguente:

$$\frac{G^*}{G_{0,mean}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_T \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2}$$

$$\alpha_T = 0.32 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{0.77}$$

Il fattore di correzione  $\alpha_T$  rappresenta una correzione numerica del modello.

Lo studio della rigidezza della lastra XLAM sollecitata a taglio ha dimostrato che una buona approssimazione per il calcolo pratico e quotidiano della deformazione di elementi di questo tipo può essere ottenuta calcolando con un valore di  $G^*$  di 450 - 500 N/mm<sup>2</sup>, indipendentemente dal tipo di pannello XLAM usato e dalla sua stratigrafia.

### 3.3 Forze $n_x$ e $n_y$ (forze assiali nel piano della lastra)

Il comportamento strutturale, e le procedure di verifica per le forze assiali  $n_x$  e  $n_x$  agenti nel piano della lastra possono essere analizzati sulla base delle riflessioni relative al comportamento dell'elemento di piastra o inflesso.

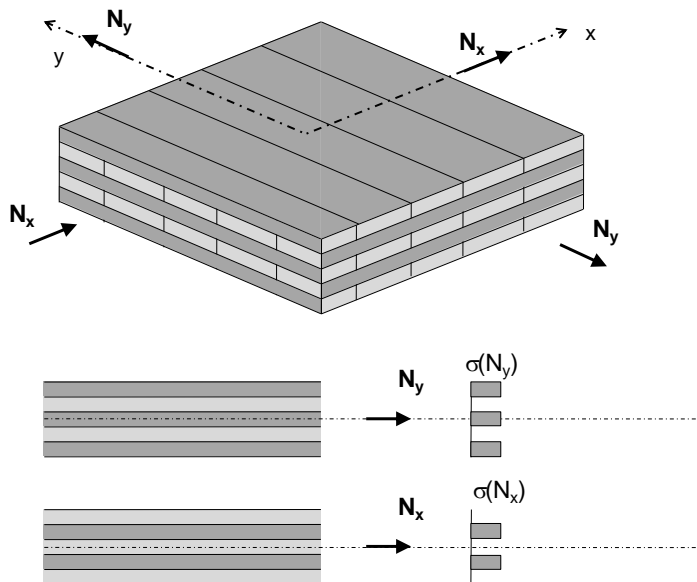


Figura 13: Sollecitazioni dovute alle forze assiali  $N_x$  e  $N_y$  (oppure  $n_x$  e  $n_y$  se riferite all'elemento unitario)

Il calcolo delle tensioni deve tener conto delle caratteristiche dei diversi strati che compongono l'elemento XLAM. In analogia a quanto fatto per la flessione (effetto piastra), considerando la grande differenza fra il modulo E degli strati orientati nella direzione considerata e quelli trasversali, è senz'altro possibile trascurare gli strati trasversali e eseguire il calcolo considerando solo gli strati nella direzione delle sollecitazioni.

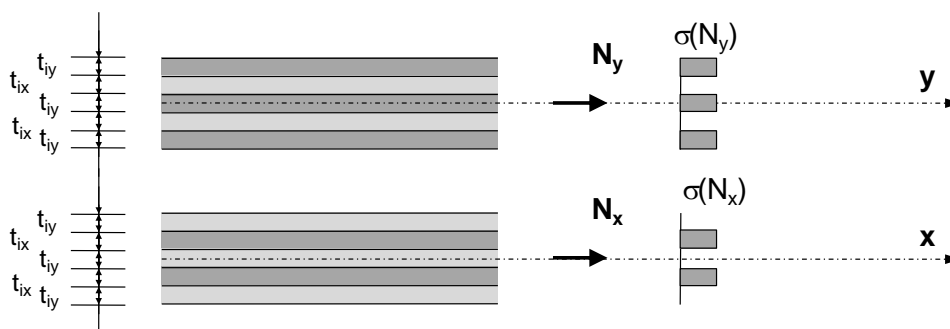


Figura 14: Definizioni delle sezioni per il calcolo delle tensioni

Per il calcolo si definisce la sezione efficace riferita alla direzione considerata:

$$A_x = \sum t_{ix} \cdot b = t_x \cdot b$$

$$A_y = \sum t_{iy} \cdot b = t_y \cdot b$$

dove

- $t_{iy}$  = spessore dei singoli strati orientati nella direzione y
- $t_y$  = spessore totale degli strati orientati nella direzione y
- $b$  = larghezza dell'elemento
- $A_y$  = superficie efficace nella direzione y.



Il calcolo delle tensioni è dato da:

$$\sigma_x = \frac{n_x}{t_x} = \frac{N_x}{A_x}$$

$$\sigma_y = \frac{n_y}{t_y} = \frac{N_y}{A_y}$$

dove  $N_y$  = forza assiale nella direzione y  
 $n_y$  = forza assiale per unità di larghezza nella direzione y.

La verifica avviene nella forma abituale, dove per la resistenza si può fare riferimento ai valori della resistenza del materiale delle lamelle, tenendo conto che i valori della resistenza a trazione sono diversi dai valori di resistenza a compressione:

$$\sigma_{x,c,d} = \frac{n_x}{t_x} \leq f_{c,d,XLAM} = f_{c,0,d}$$

$$\sigma_{x,c,d} = \frac{n_x}{t_x} \leq f_{t,d,XLAM} = f_{t,0,d}$$

oppure

$$\sigma_{y,c,d} = \frac{n_y}{t_y} \leq f_{c,d,XLAM} = f_{c,0,d}$$

$$\sigma_{y,c,d} = \frac{n_y}{t_y} \leq f_{t,d,XLAM} = f_{t,0,d}$$

In caso di sollecitazione costante su una larghezza di almeno 4 lamelle, è possibile moltiplicare il valore della resistenza con il coefficiente di sistema, come già fatto per la verifica a flessione della lastra. Se invece la verifica avviene in una zona con un picco locale nella distribuzione delle sollecitazioni, allora ciò non è possibile.

I valori della rigidezza nelle due direzioni principali del piano, cioè i valori di rigidezza all'allungamento (o all'accorciamento in caso di compressione) possono essere definiti in modo analogo, e si ottiene:

$$\varepsilon_x = \frac{n_x}{D_x} = \frac{N_x}{D_x \cdot b} = \frac{N_x}{E_{0,mean} \cdot A_x}$$

con

$$\varepsilon_y = \frac{n_y}{D_y} = \frac{N_y}{D_y \cdot b} = \frac{N_y}{E_{0,mean} \cdot A_y}$$

$$D_x = E_{0,mean} \cdot t_x$$

$$D_y = E_{0,mean} \cdot t_y$$

### 3.4 Stabilità

In caso di forze di compressione agenti su una parete verticale, questa può essere soggetta all'instabilità dovuta allo sbandamento; la presenza di un carico trasversale - come ad esempio il vento - crea un momento flettente sulla parete, che aumenta il rischio di sbandamento, e che deve essere considerato. Per la verifica dello stato limite ultimo può essere applicato il medesimo principio di verifica applicato agli elementi lineari sottoposti a compressione e flessione.

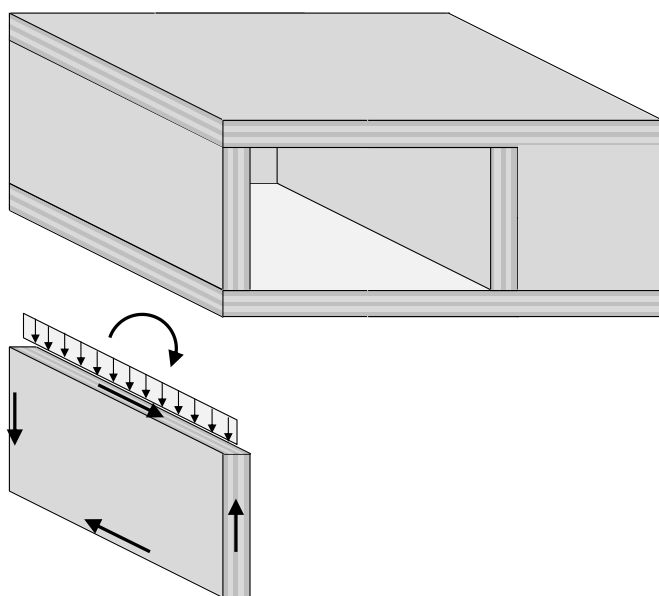


Figura 15: Elemento di parete per la verifica della stabilità

La parete della figura 15 è sollecitata a compressione verticale e a flessione trasversale. Per considerare l'instabilità dovuta allo sbandamento si considera la parte centrale della parete, quindi a metà altezza e la zona con la forza di compressione maggiore, quindi in prossimità dei bordi verticali liberi. Gli sforzi interni possono essere determinati tramite semplici condizioni di equilibrio, ottenendo così in modo rapido una prima - e spesso buona - approssimazione delle forze in gioco.

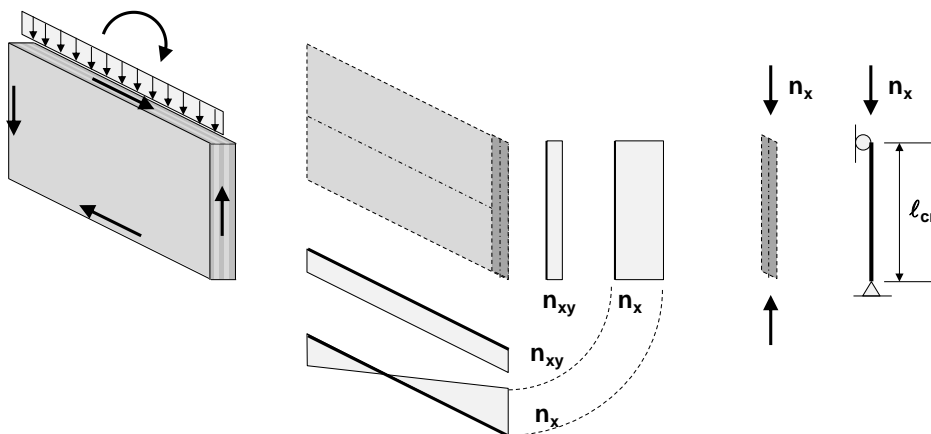


Figura 16: Sollecitazioni dovute alla forza assiale di compressione

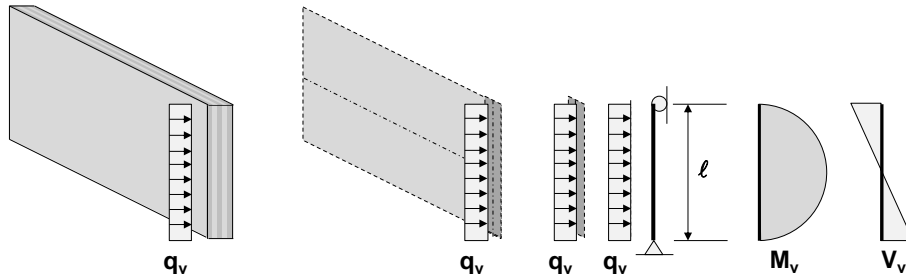


Figura 17: Sollecitazioni dovute al momento flettente e al carico trasversale

La verifica dello stato limite ultimo deve considerare la sovrapposizione delle sollecitazioni dovute al momento e alla forza assiale, e assume la forma:

$$\frac{\sigma_{x,c,d}}{k_c \cdot f_{c,d, XLAM}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d, XLAM}} \leq 1.0$$

dove

$k_c$	=	coefficiente di sbandamento, con la rigidezza a flessione K
$f_{c,d, XLAM}$	=	resistenza a compressione, come indicato sopra
$\sigma_{x,c,d}$	=	tensione effettiva di compressione, come indicato sopra.

#### 4 Elementi complessi

Le considerazioni dei capitoli precedenti trattano gli elementi strutturali di base, cioè la verifica dell'elemento strutturale di XLAM in caso di sollecitazione definita da una o più forze combinate fra loro, applicando i principi di verifica fondamentali degli elementi strutturali di legno alle caratteristiche meccaniche e al comportamento strutturale dell'XLAM. Questi casi descrivono le situazioni reali più comuni, ma le possibilità di sfruttare l'elemento di superficie quale elemento strutturale richiedono l'analisi di situazioni più complesse, e dal punto di vista della flessibilità della costruzione, più interessanti.

Questi casi sono caratterizzati da elementi dalle forme e dai vicoli strutturali irregolari, e richiedono un'analisi più impegnativa per determinare gli sforzi interni; questa analisi, che può senz'altro avvenire anche sulla base di considerazioni semplici, fornisce le forze che permettono di eseguire le verifiche nel modo indicato sopra per ogni singolo caso di sollecitazione o di combinazione di sollecitazioni.

##### 4.1 Piastra irregolare

L'elemento strutturale piastra di XLAM permette di sfruttare la capacità strutturale (flessione e taglio trasversale al piano) del materiale nelle due direzioni del piano. Condizioni di appoggio particolari o la formazione di aperture nella soletta XLAM portano ad una distribuzione non regolare degli sforzi

interni, che devono essere verificati in tutti i punti in cui raggiungono un valore massimo, o in cui la loro combinazione crea una situazione critica.

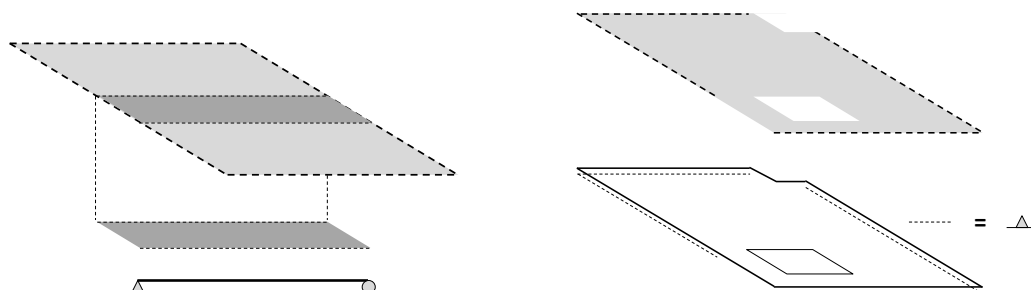


Figura 18: a) Modello strutturale semplice per la piastra con forma e vincoli regolari  
b) Modello strutturale piano per piastra con forme e vincoli irregolari

La determinazione degli sforzi interni avviene in questi casi tramite la modellazione numerica dell'elemento strutturale, definendone nel modello di calcolo le diverse caratteristiche di rigidità nelle due direzioni del piano.

Gli eventuali collegamenti e giunti della soletta composta da più elementi XLAM collegati fra loro devono essere accuratamente considerati nella definizione del modello di calcolo. In particolare modo i collegamenti più semplici e comuni fra i diversi elementi hanno spesso un effetto tutt'altro che trascurabile sul modello strutturale dell'intero elemento: spesso i collegamenti fra i diversi elementi che compongono la soletta formano una cerniera su tutta la loro estensione, in altri casi possono essere realizzati dei giunti semi-rigidi, decisamente più impegnativi, ma più efficaci e in alcuni casi indispensabili. La composizione dell'elemento - comprese quindi le caratteristiche strutturali dei collegamenti scelti - hanno, comunque, in questi casi un effetto importante sul comportamento strutturale di tutto l'elemento, e sono quindi di rilevanza essenziale ai fini del dimensionamento e delle verifiche.

#### 4.2 Pareti con aperture e pareti con funzione di trave

Per le aperture nelle pareti e per le pareti con funzione di trave (o travi parete) valgono le medesime riflessioni fatte per le piastre irregolari. La particolarità di questi elementi non si trova nella verifica dello stato ultimo, ma nella determinazione degli sforzi interni risultanti dai carichi e dai vincoli di appoggio dell'elemento stesso.

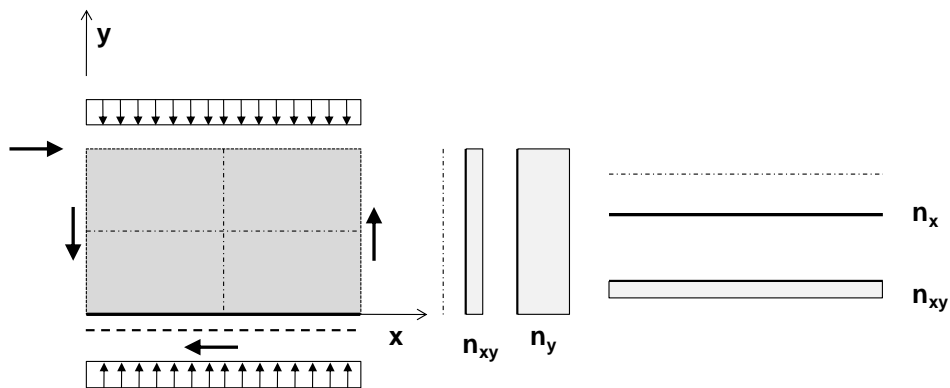


Figura 19: Parete semplice con vincolo su tutti i 4 lati

Nel caso della presenza di aperture nelle pareti, il calcolo degli sforzi interni diventa più complesso e può essere eseguito, sotto forma di approssimazione, sulla base di modelli semplici, oppure procedendo ad un'analisi numerica, per esempio sulle base di un modello ad elementi finiti.

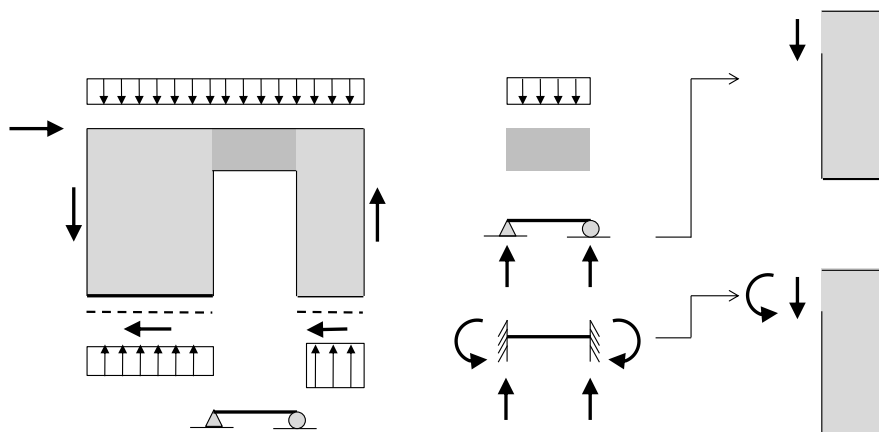


Figura 20: Parete con apertura e schema strutturale della parte con funzione di architrave

Nel caso rappresentato nella figura 20, la parte di parete con funzione di architrave può essere analizzata, in prima approssimazione come un elemento di trave, i cui vincoli saranno definiti dalla tipologia costruttiva scelta: nel caso di composizione della parete con un unico elemento XLAM il modello della trave con incastri agli appoggi è probabilmente il più corretto, mentre nel caso di giunti con rigidità ridotta (giunti con collegamenti meccanici) il grado di incastro risulterà più ridotto e dovrà eventualmente essere definito in funzione dello scorrimento nei collegamenti.

Il caso della trave parete è l'esempio più avanzato dell'applicazione dell'elemento strutturale piano e di grandi dimensioni. Il modello strutturale è quello della trave, formata dalla parete in questione.

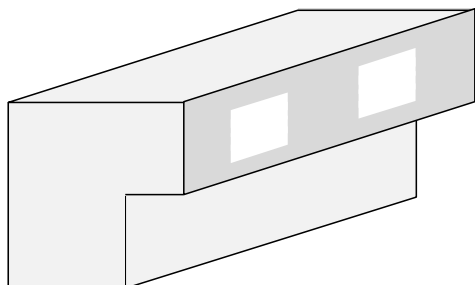


Figura 21: parete con funzione di trave

I carichi sono dati dalle solette superiore e inferiore, mentre gli appoggi sono dati dalle pareti laterali, che sostengono la trave-parete. Le sollecitazioni che risultano nella parete sono in questo caso ben più importanti del caso in cui la parete appoggiata su tutta la sua lunghezza alla parte sottostante dell'edificio; l'effetto trave è senza dubbio preponderante, e la presenza delle aperture porta a sollecitazioni localmente molto importanti. Nella figura seguente è rappresentata in modo schematico una parte delle sollecitazioni all'interno della lastra della parete, che servono da base per il calcolo e la verifica dello stato limite ultimo e dello stato di servizio. Appare subito evidente, come gli eventuali collegamenti fra i vari elementi della parete possano avere un effetto decisamente importante sul comportamento strutturale della parete, sia riguardo alla resistenza che riguardo alla rigidezza della struttura.

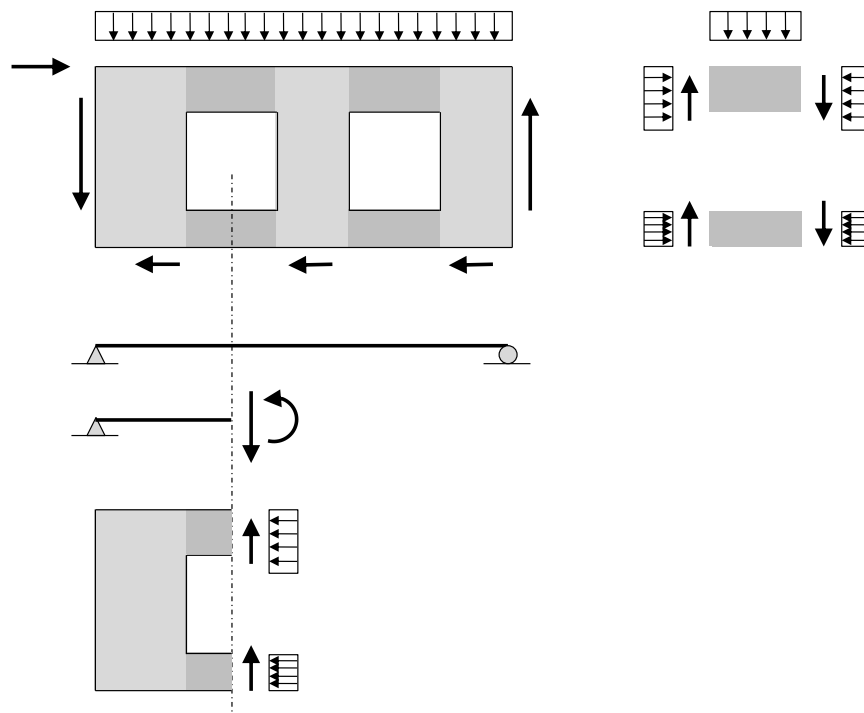


Figura 22: Sollecitazioni nella trave parete

## 5 Aspetti particolari

Nei capitoli precedenti sono stati descritti brevemente i principali aspetti legati al calcolo e alla verifica strutturale degli elementi di XLAM, mettendo in risalto gli aspetti legati alle particolarità e alle potenzialità di questo materiale.

Le particolarità dell'XLAM hanno però un effetto diretto su tutte le fasi della progettazione, di cui fanno parte fra l'altro il comportamento al sisma, il comportamento al fuoco, o, ancora, l'analisi del comportamento oscillatorio in funzione della verifica dello stato di servizio.

Questi aspetti sono oggetto di una trattazione separata.

## 6 Bibliografia - approfondimento

L'XLAM è un materiale molto recente, e per questa ragione le basi bibliografiche per un approfondimento delle tematiche tecniche ad esso riferite sono contenute principalmente nella letteratura scientifica, dove si descrive, spesso in modo molto dettagliato, come sono stati ottenuti le informazioni necessarie alla definizione dei modelli di comportamento e di calcolo descritti sopra.

Per l'approfondimento dei temi trattati e per una bibliografia dettagliata sui singoli aspetti legati all'uso strutturale dell'XLAM, si rimanda al manuale sull'XLAM redatto e pubblicato in lingua tedesca dall'Istituto per la costruzione e la tecnologia del legno del Politecnico di Graz, diretto dal Prof. G. Schickhofer:

BSPHandbuch, Holz-Massivbauweise in Brettsper Holz - Nachweise auf der Basis des neuen europäischen Normkonzepts, Graz 2009.

Per le indicazioni specifiche ai singoli prodotti XLAM, omologati e distribuiti in tutta Europa dai diversi produttori sotto nomi e definizioni di prodotto diversi, si rimanda alla documentazione di riferimento dei rispettivi prodotti, sotto forma di omologazioni europee e nazionali, come di documentazione tecnica.