

MODELLAZIONE ED ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Ing. Mauro Andreolli, PhD
TimberTech

TIMBERTECH
SOLUTIONS FOR TIMBER ENGINEERING

TIMBERTECH
SOLUTIONS FOR TIMBER ENGINEERING

ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

CAPITOLO 10.

REDAZIONE DEI PROGETTI STRUTTURALI ESECUTIVI E DELLE RELAZIONI DI CALCOLO

10.2. ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista, dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso la documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.

Spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con riferimento a schemi o soluzioni noti e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

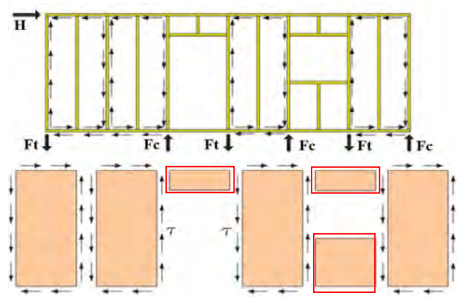
Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc.



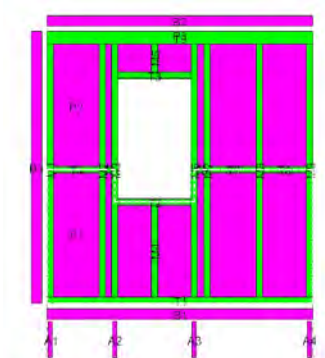
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

p.to 9.2.4.2 UNI-EN-1995-1-1

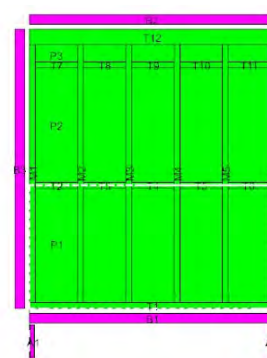
«Si raccomanda che i pannelli contenenti un'apertura di porta o finestra non siano considerati come in grado di contribuire alla capacità portante di piastra»



ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

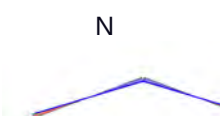
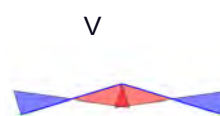
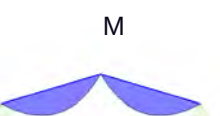
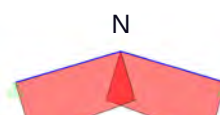
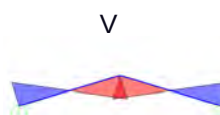
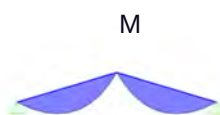
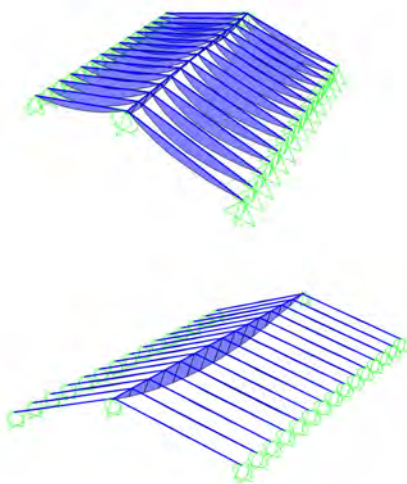


Proprietà	
Pannello	
Descrizione	Default (Pannello 1)
Pannellatura anteriore	Si.OSB EN 300 OSB/3,1.5,7.5,15,Rotho Blas-ANCHER 4*6
Pannellatura posteriore	Si.OSB EN 300 OSB/3,1.5,7.5,15,Rotho Blas-ANCHER 4*6
Stato di verifica	Verifiche non soddisfatte
Anomalie	Verifica capacità portante di piastra non soddisfatta

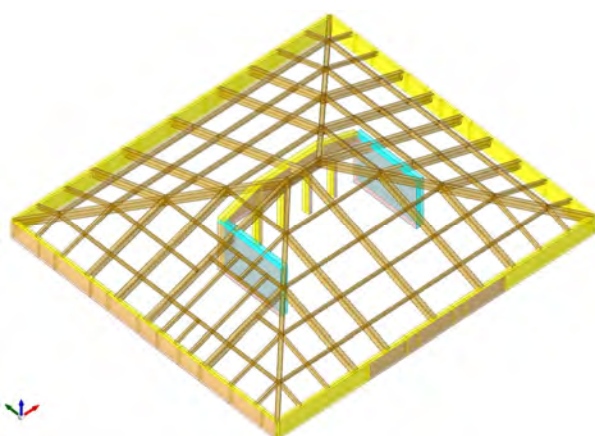


Proprietà	
Pannello	
Descrizione	Default (Pannello 1)
Pannellatura anteriore	Si.OSB EN 300 OSB/3,1.5,5,10,Rotho Blas-ANCHER 4*6
Pannellatura posteriore	Si.OSB EN 300 OSB/3,1.5,5,10,Rotho Blas-ANCHER 4*6
Stato di verifica	Verifiche soddisfatte
Anomalie	Nessuna anomalia

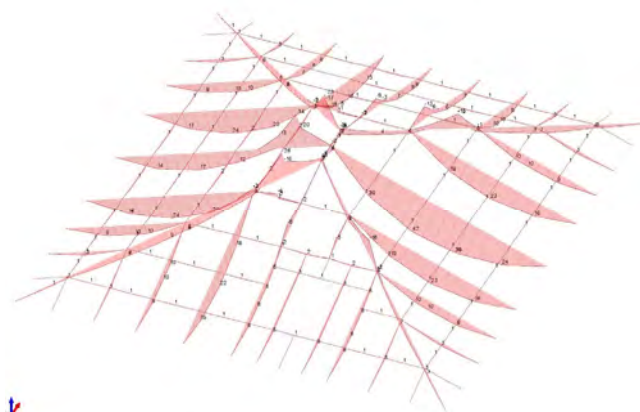
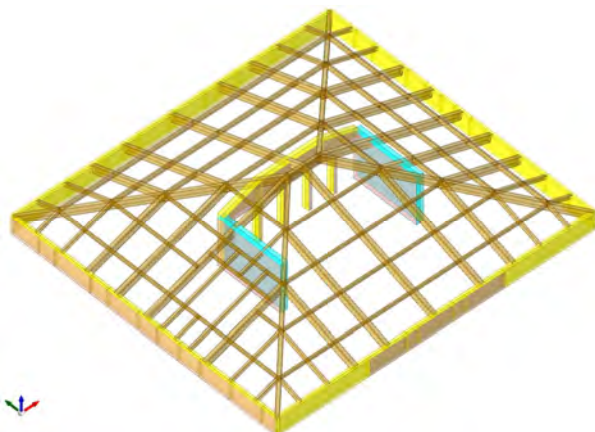
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



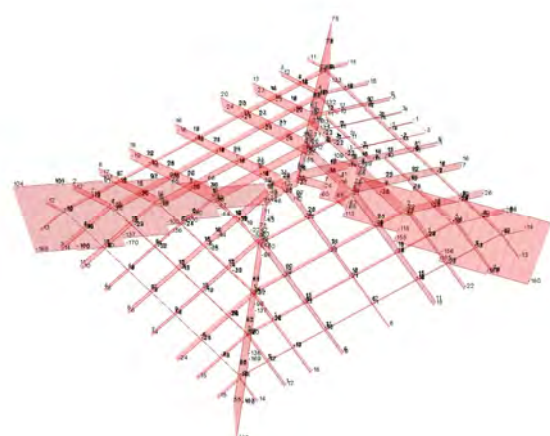
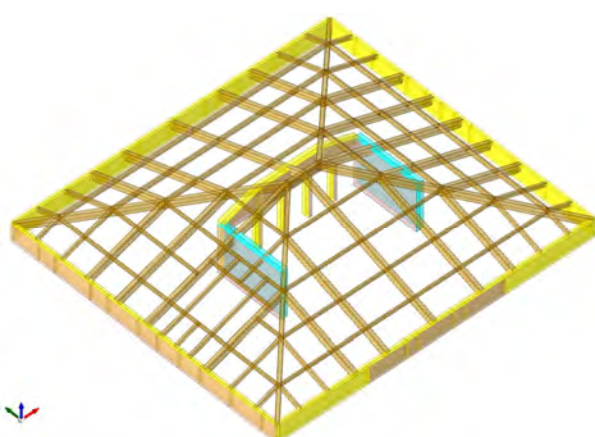
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



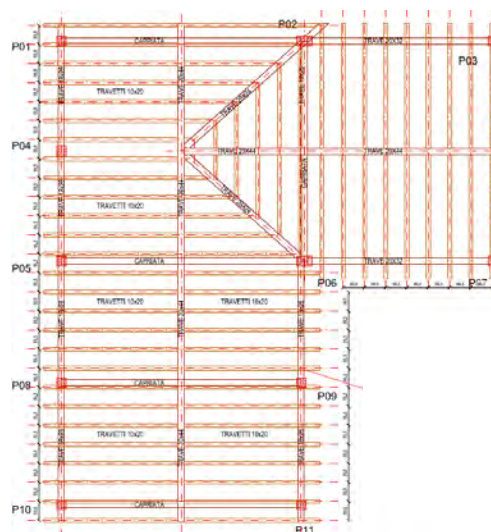
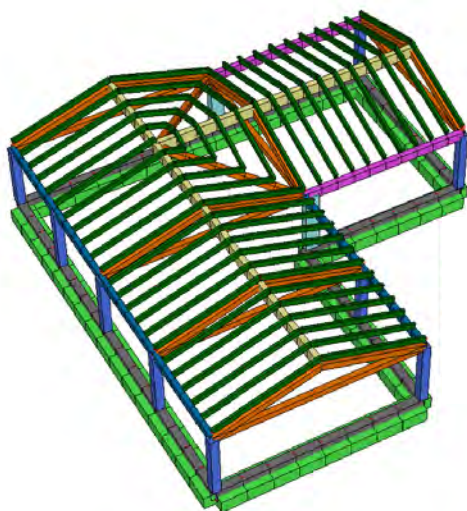
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



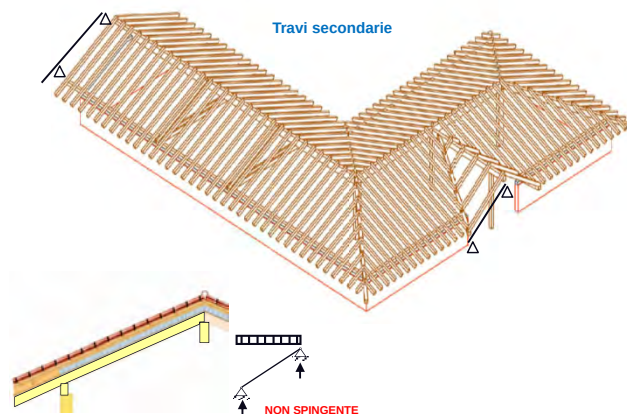
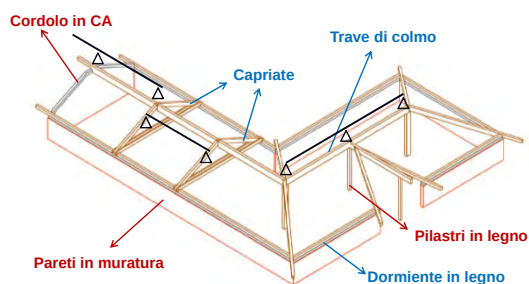
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



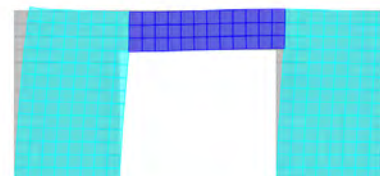
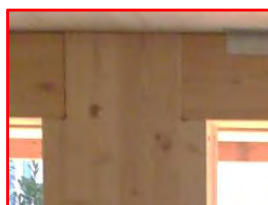
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



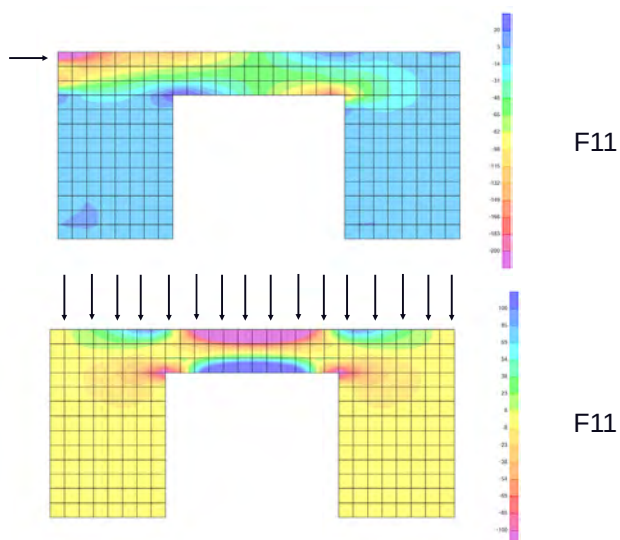
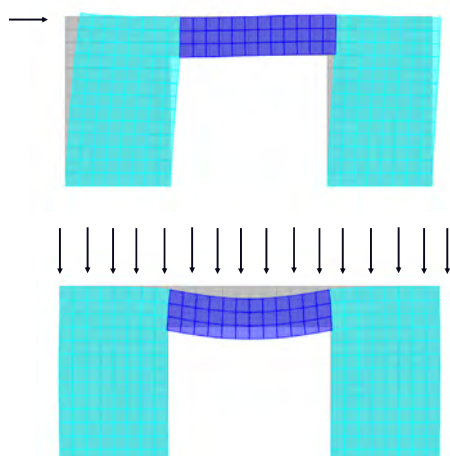
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

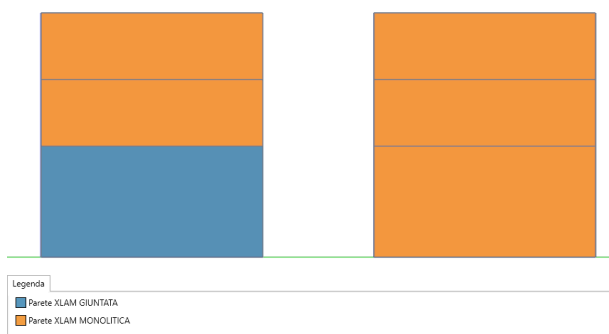


ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

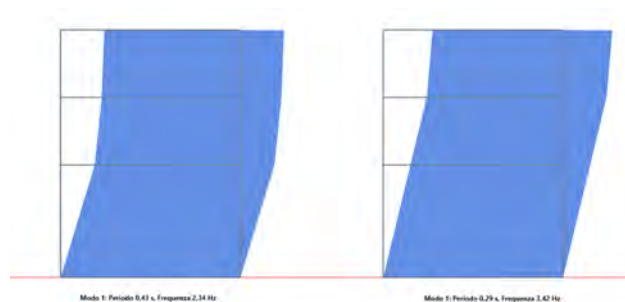
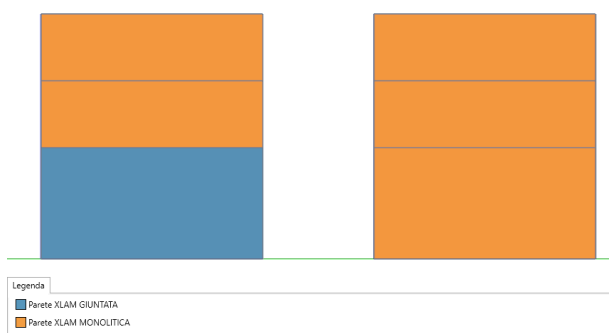
Pareti giuntate



Piano terra: 4 metri

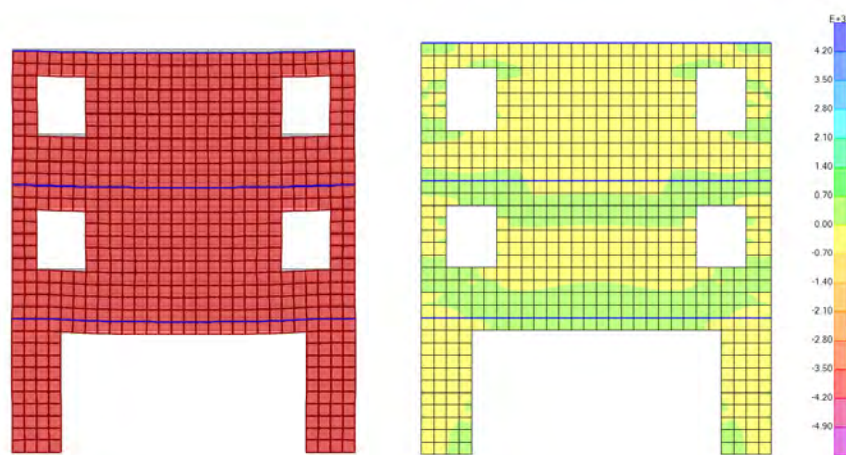
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

Pareti giuntate



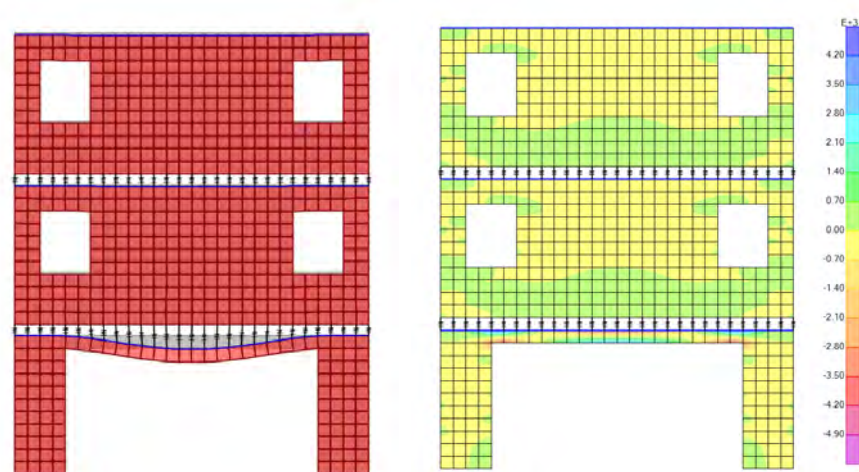
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

Pareti XLAM con aperture



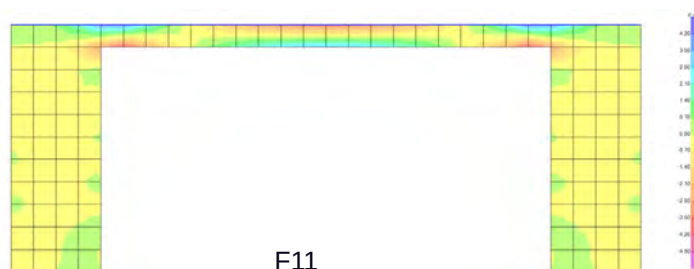
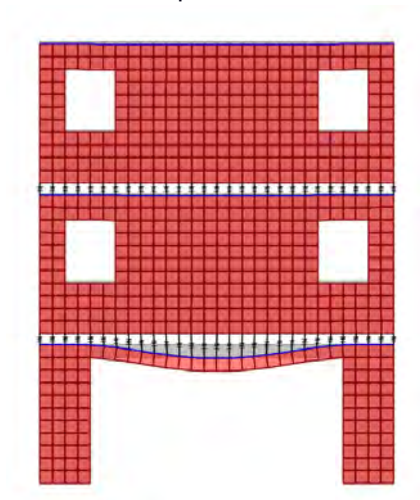
ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

Pareti XLAM con aperture



ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

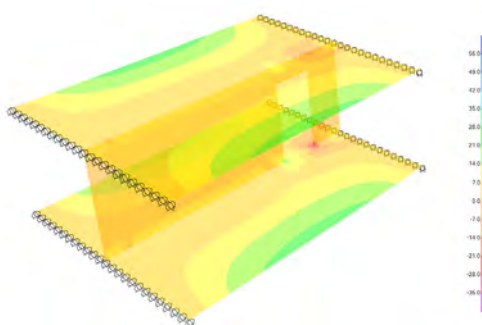
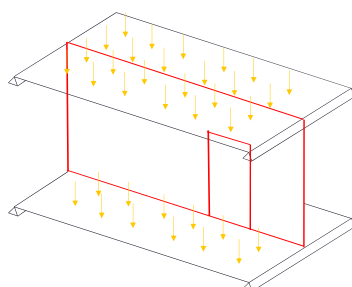
Pareti XLAM con aperture



F11

ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

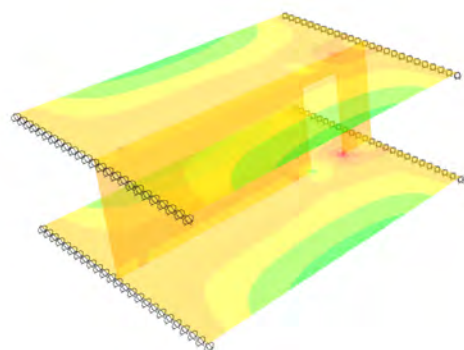
Parete XLAM in falso



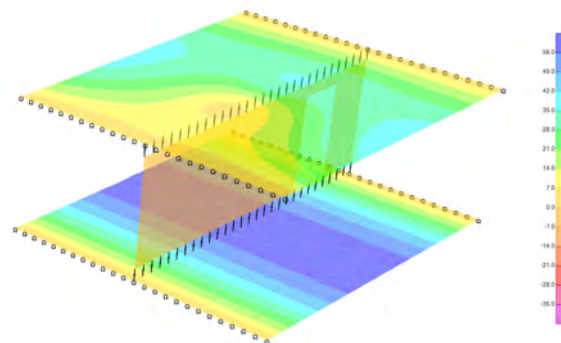
M22

ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

Parete XLAM in falso

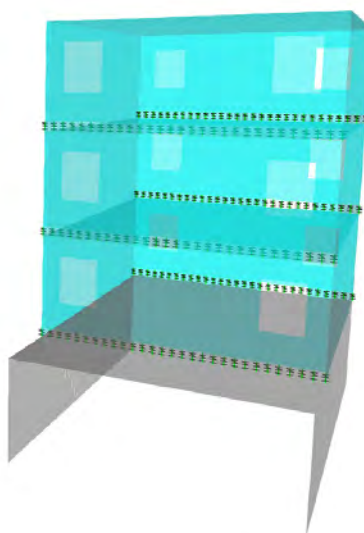
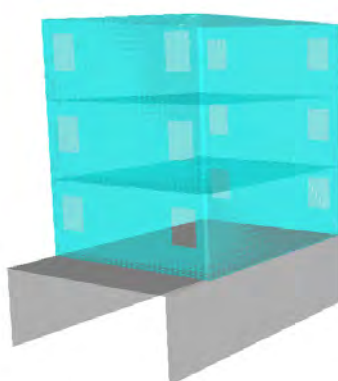


M22

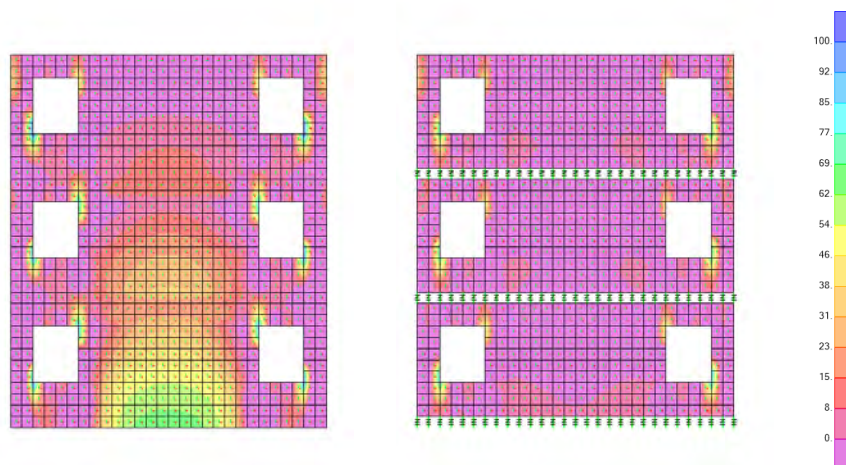


M22

ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA

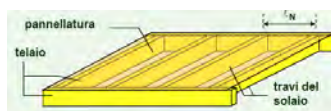
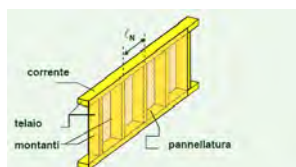


ERRORI DI MODELLAZIONE E VERIFICA



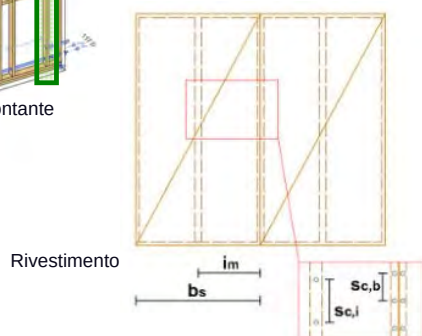
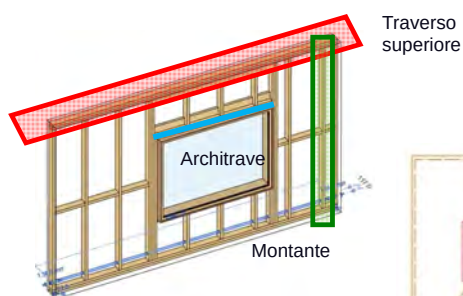
SPUNTI SULLA MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN TELAIO LEGGERO



EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN TELAIO LEGGERO

ELEMENTI STRUTTURALI



LEGNO STRUTTURALE

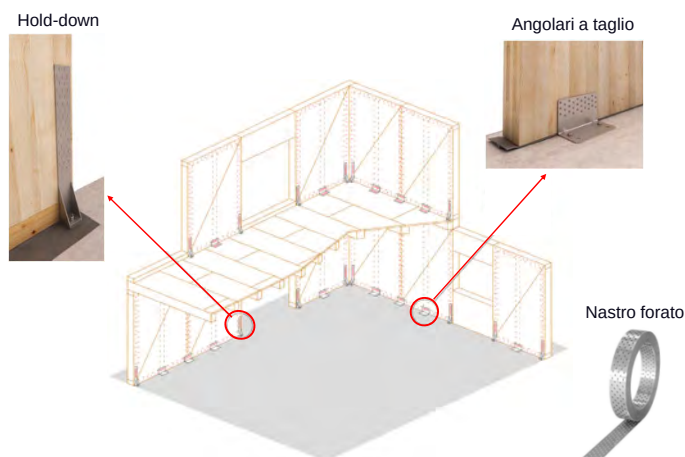
- montanti in legno
- traversi in legno
- architravi e travi

RIVESTIMENTO

È di fondamentale importanza in quanto possiede funzione controventante nel piano della parete

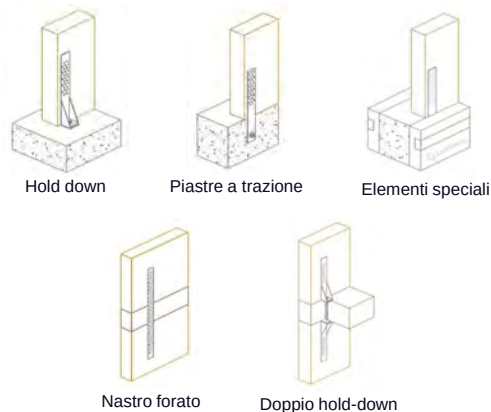
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN TELAIO LEGGERO

ELEMENTI STRUTTURALI



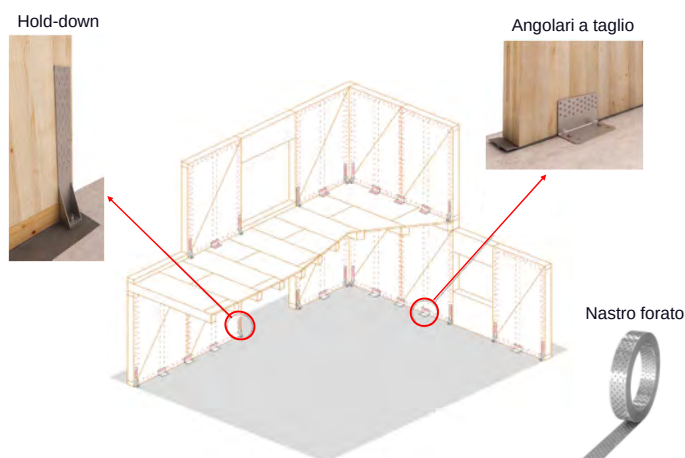
CONNESSIONI

- connettori a trazione



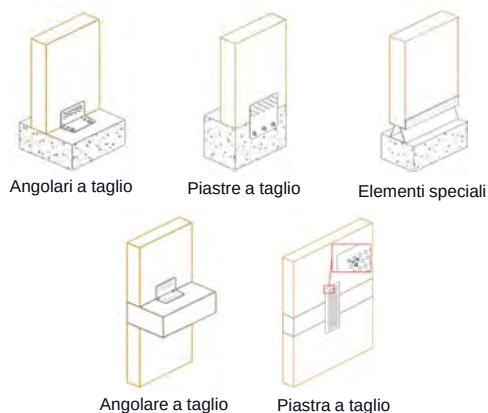
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN TELAIO LEGGERO

ELEMENTI STRUTTURALI



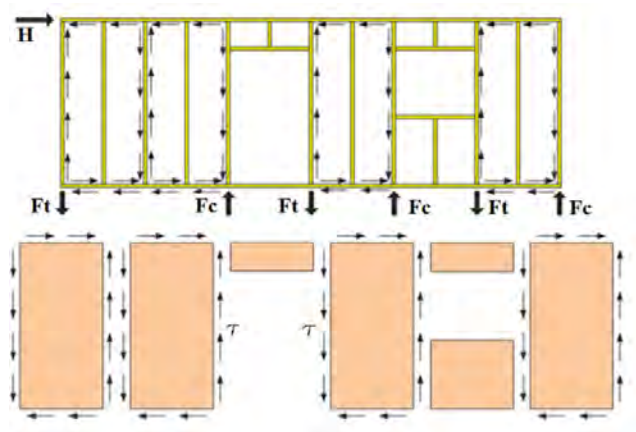
CONNESSIONI

- connettori a taglio



MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

GENERALITA'



PARETI A TELAIO LEGGERO CON APERTURA

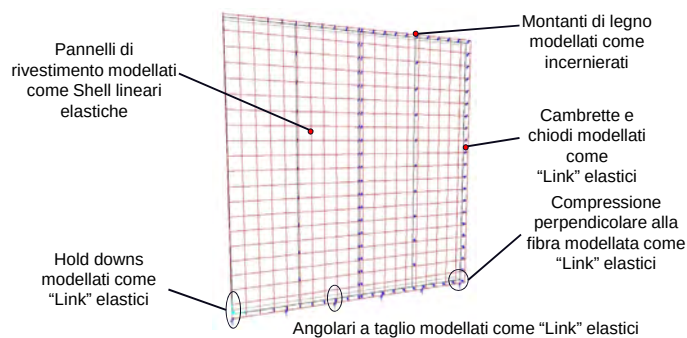
p.to 9.2.4.2 UNI-EN-1995-1-1

«Si raccomanda che i pannelli contenenti un'apertura di porta o finestra non siano considerati come in grado di contribuire alla capacità portante di piastra»



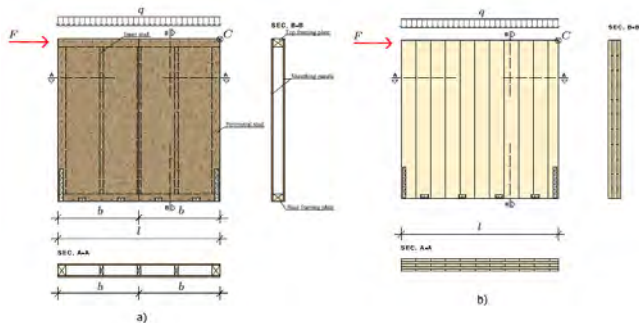
MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

MODELLAZIONE



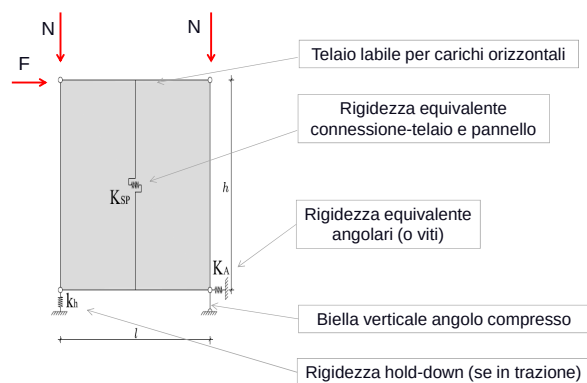
MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

MODELLAZIONE



Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls -
D. Casagrande, S. Rossi, T. Sartori, R. Tomasi

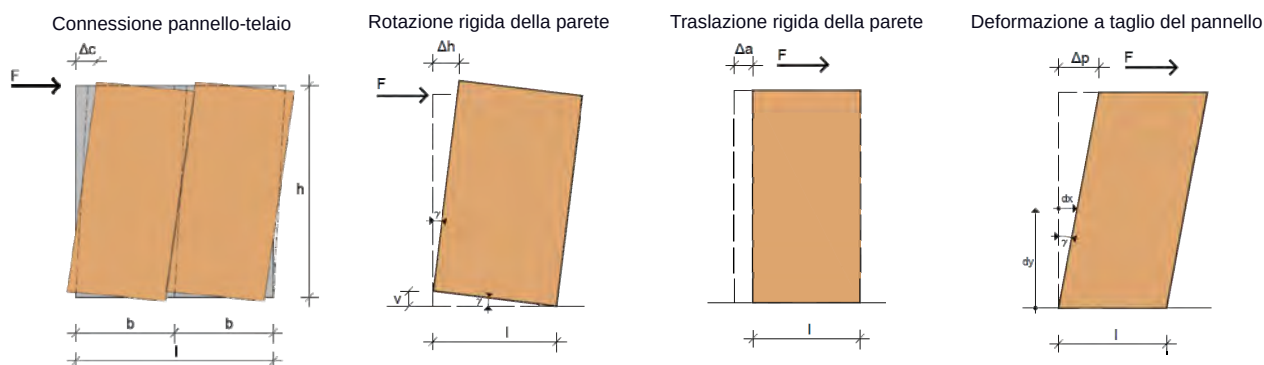
PARETI A TELAIO LEGGERO



MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

MODELLAZIONE

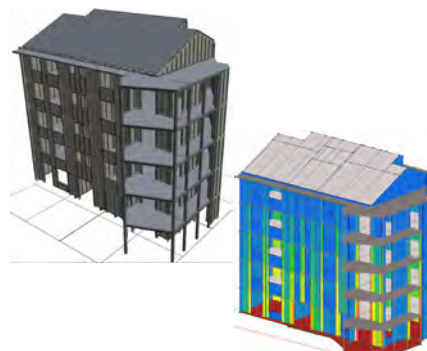
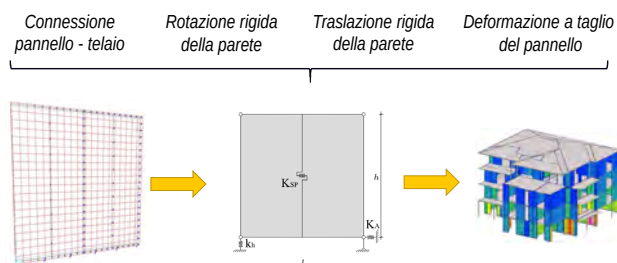
PARETI A TELAIO LEGGERO



Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls -
D. Casagrande, S. Rossi, T. Sartori, R. Tomasi

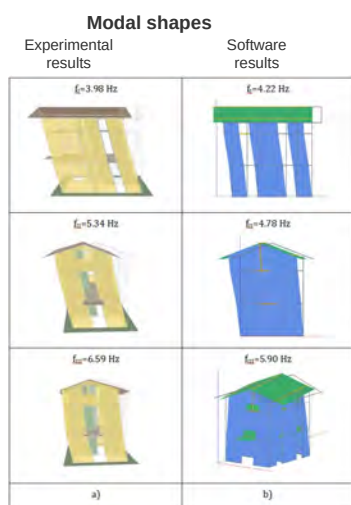
MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

Contributi di deformazione



MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

Analytical model validated through real scale tests

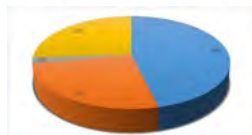


MODELLAZIONE DI EDIFICI A TELAIO LEGGERO

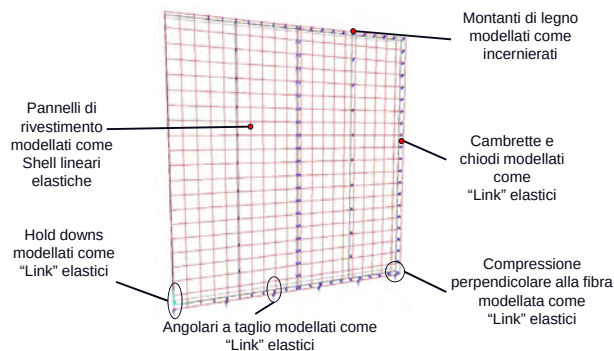
GENERALITA'

	TIMBERTECH BUILDINGS	PROGRAMMA AD ELEMENTI FINITI
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA DEFORMAZIONE DEI CONNETTORI	$\frac{\Delta_c}{F} = 0,2007 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_c}{F} = 0,2078 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA DEFORMAZIONE DEL PANNELLO	$\frac{\Delta_p}{F} = 0,1111 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_p}{F} = 0,1123 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA TRASLAZIONE RIGIDA DEL PANNELLO	$\frac{\Delta_s}{F} = 0,0096 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_s}{F} = 0,0101 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA ROTAZIONE RIGIDA DEL PANNELLO	$\frac{\Delta_h}{F} = 0,1126 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_h}{F} = 0,1209 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO ORIZZONTALE TOTALE	$\frac{\Delta_{TOT}}{F} = 0,4286 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_{TOT}}{F} = 0,4433 \frac{mm}{kN}$
RIGIDEZZA EQUIVALENTE A TAGLIO DELLA PARETE	$k_{par} = 2333 \frac{kN}{m}$	$k_{par} = 2256 \frac{kN}{m}$

Contributi di deformazione di una parete a telaio leggero



PARETI A TELAIO LEGGERO



SPUNTI SULLA MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

TIMBERTECH
SOLUTIONS FOR TIMBER ENGINEERING



rothoschool

Mauro Andreolli
MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI

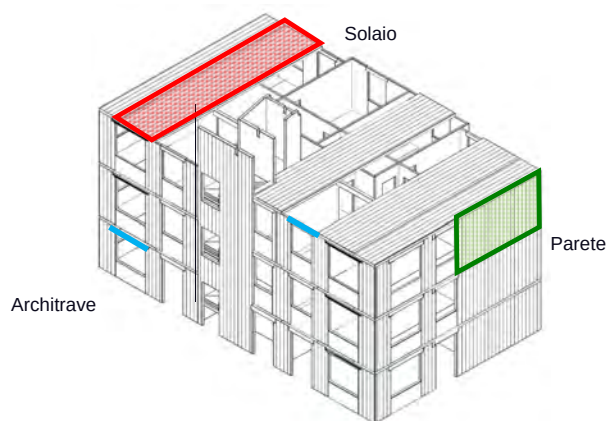
This material is the property of TimberTech. All rights reserved. The free reproduction of such teaching materials in educational or educational contexts not falling within the scope of the training activities is prohibited.

35

EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

ELEMENTI STRUTTURALI

TIMBERTECH
SOLUTIONS FOR TIMBER ENGINEERING



LEGNO STRUTTURALE

- pannelli di solaio
- pannelli di parete
- architravi e travi



rothoschool

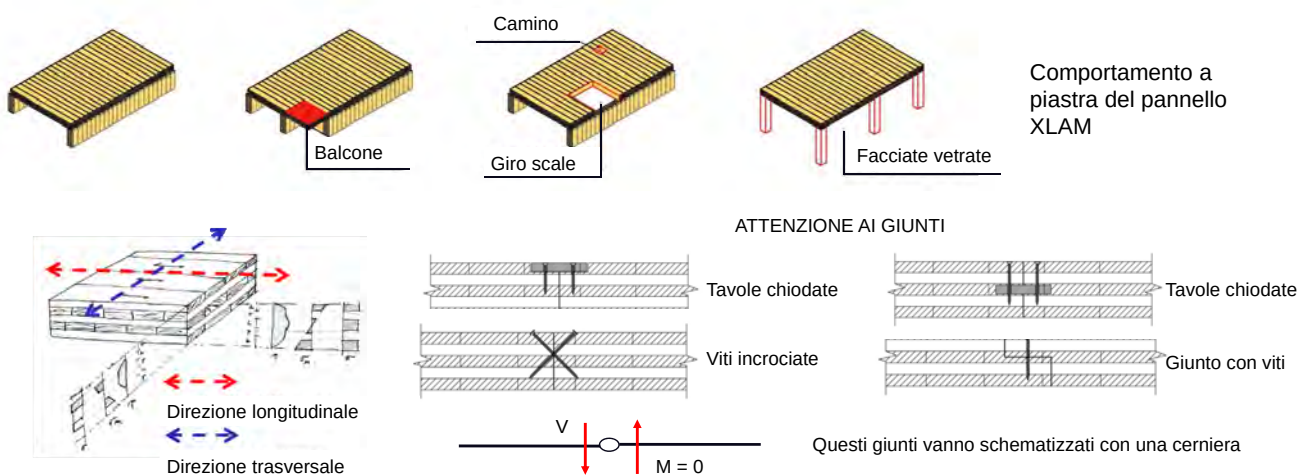
Mauro Andreolli
MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI

This material is the property of TimberTech. All rights reserved. The free reproduction of such teaching materials in educational or educational contexts not falling within the scope of the training activities is prohibited.

36

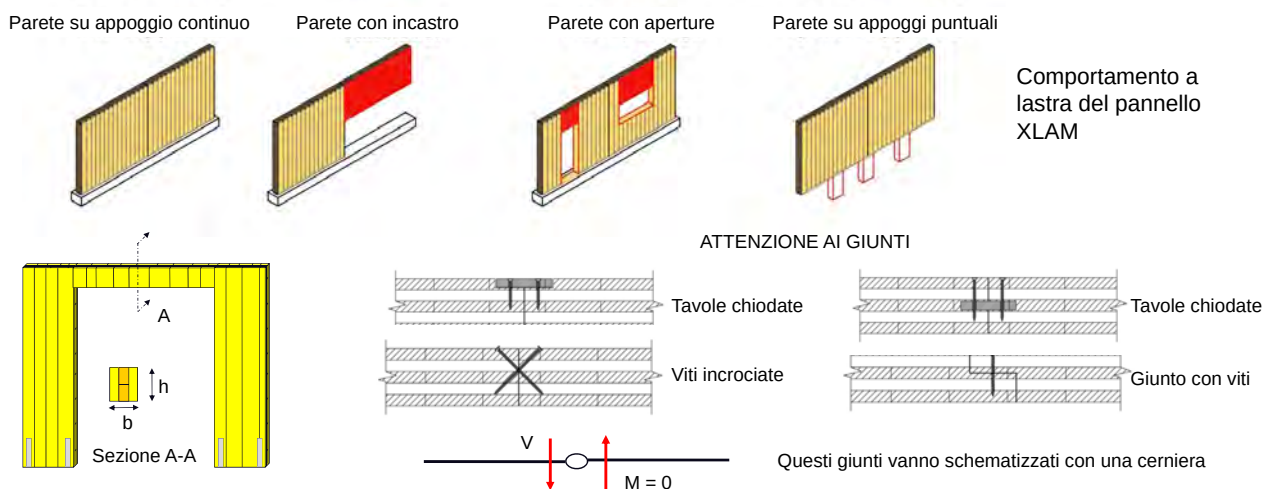
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

COMPORTAMENTO FUORI PIANO



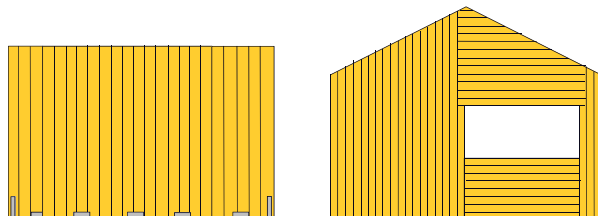
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

COMPORTAMENTO NEL PIANO



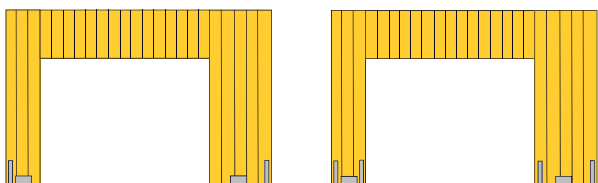
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

COMPORTAMENTO GLOBALE



Parete monolitica intera

Parete giuntata



Pareti monolitiche con apertura

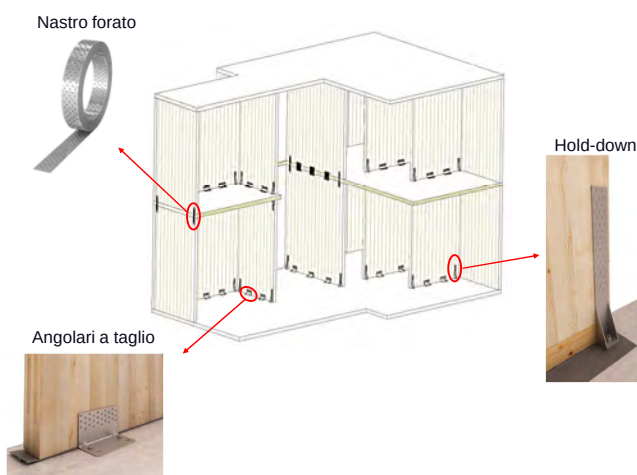
Pareti giuntate con architrave

TIPOLOGIE DI PARETI

- pareti monolitiche
- pareti giuntate
- pareti con architravi (XLAM, lamellare, acciaio)

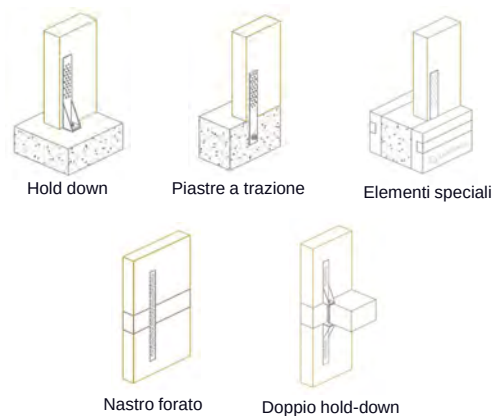
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

ELEMENTI STRUTTURALI



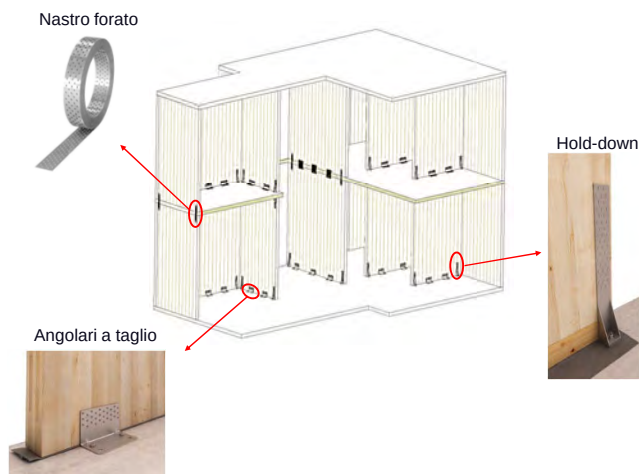
CONNESSIONI

- connettori a trazione



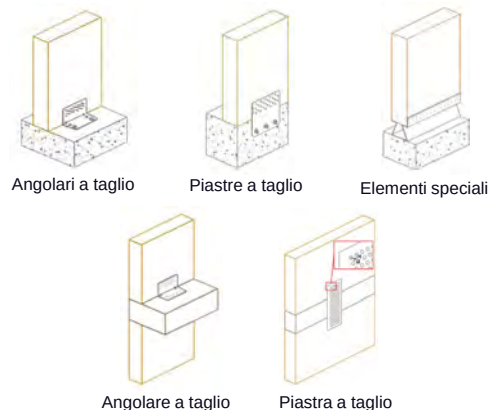
EDIFICI A STRUTTURA PORTANTE IN XLAM

ELEMENTI STRUTTURALI

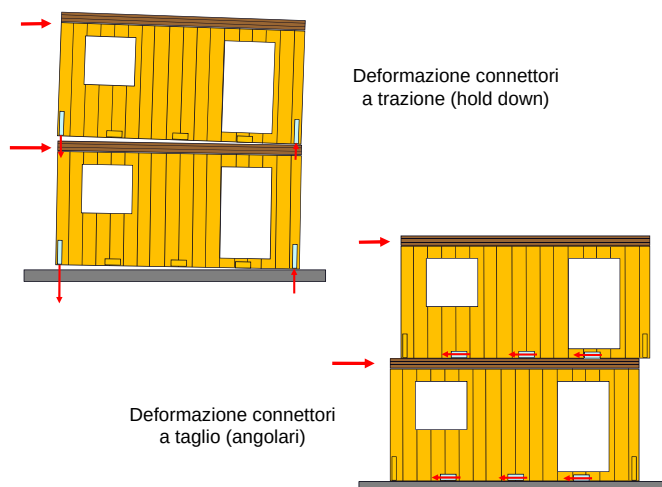


CONNESSIONI

- connettori a taglio



MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

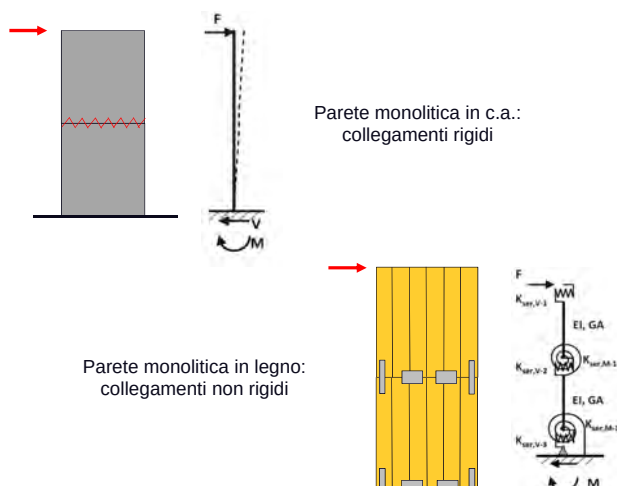


CONNESSIONI

Negli edifici a setti portanti in legno è di fondamentale importanza modellare il corretto comportamento delle connessioni in termini di rigidità e resistenza:

- corretta stima della rigidità globale della struttura nei confronti delle azioni orizzontali
- corretta valutazione delle modalità di rottura
- valutazione della risposta sismica dell'edificio

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM



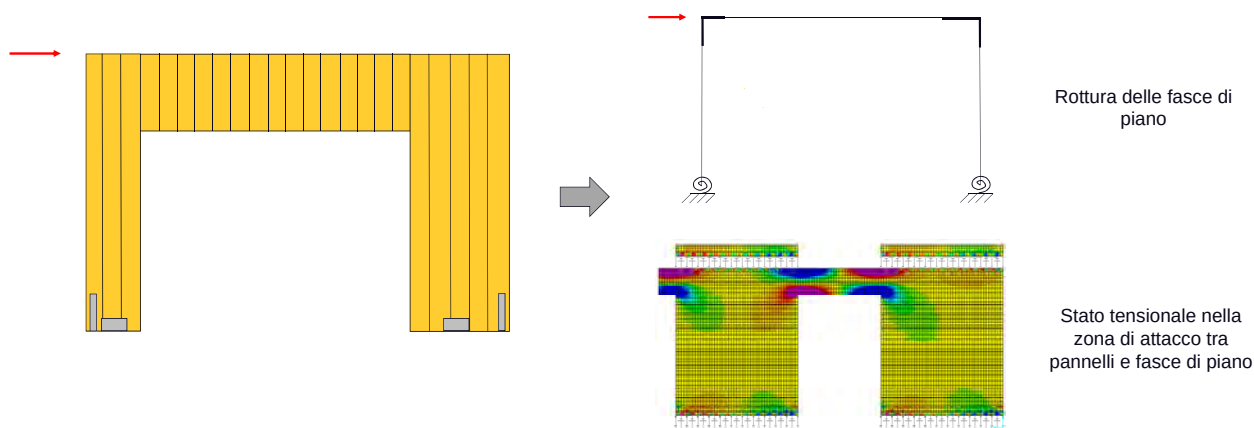
CONNESSIONI



Nucleo in c.a. e pareti in XLAM

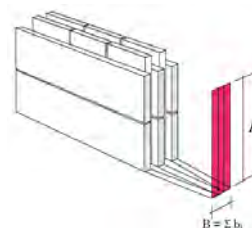
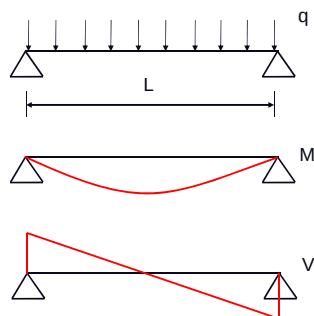
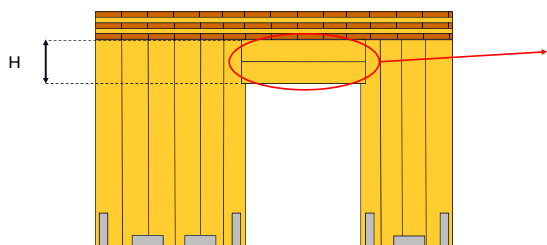
MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

PARETI MONOLITICHE CON APERTURA



MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

PARETI CON ARCHITRAVE

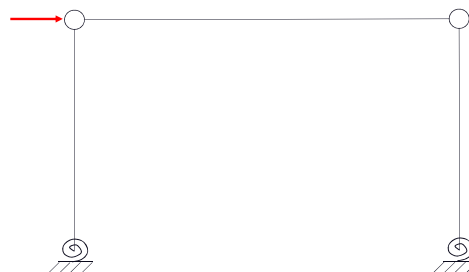
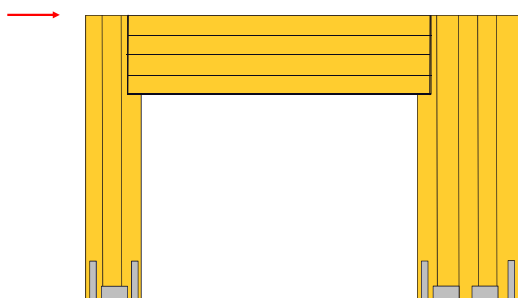


$$J_{net} = \frac{B \cdot H^3}{12}$$

$$W_{eff} = \frac{J_{net}}{H/2}$$

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

PARETI CON ARCHITRAVE

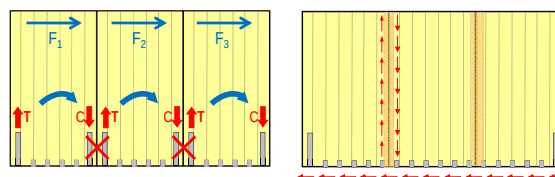


MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

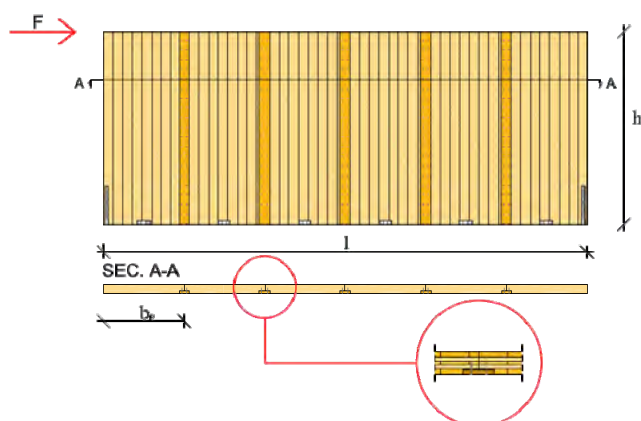


PARETI GIUNTATE

Le dimensioni laterali dei pannelli possono essere limitate da ragioni produttive, per cui risulta necessario collegare verticalmente più pannelli di tavole incrociate per realizzare una parete di una certa lunghezza.



MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

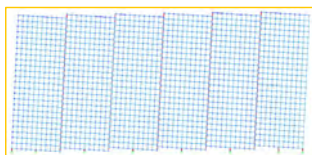


PARETI GIUNTATE

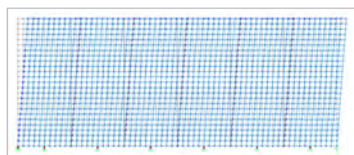
Lo spostamento elastico orizzontale di una parete giuntata in XLAM è dato dalla somma dei seguenti contributi:

- lo spostamento dovuto alla deformazione flessionale del pannello
- lo spostamento dovuto alla deformazione a taglio del pannello
- spostamento dovuto allo scorrimento tra i diversi pannelli componenti la parete (deformazione giunto)
- lo spostamento dovuto alla rotazione rigida della parete (connessioni a trazione)
- lo spostamento dovuto alla traslazione rigida della parete (connessioni a taglio)

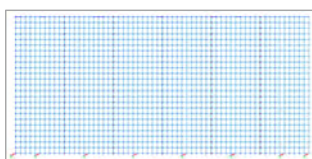
MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM



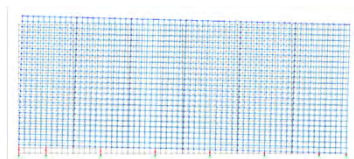
Deformazione dei connettori tra i giunti



Deformazione dei pannelli



Traslazione rigida della parete



Rotazione rigida della parete

PARETI GIUNTATE

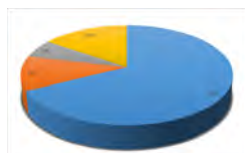
Lo spostamento elastico orizzontale di una parete giuntata in XLAM è dato dalla somma dei seguenti contributi:

- lo spostamento dovuto alla deformazione flessionale del pannello
- lo spostamento dovuto alla deformazione a taglio del pannello
- spostamento dovuto allo scorrimento tra i diversi pannelli componenti la parete (deformazione giunto)
- lo spostamento dovuto alla rotazione rigida della parete (connessioni a trazione)
- lo spostamento dovuto alla traslazione rigida della parete (connessioni a taglio)

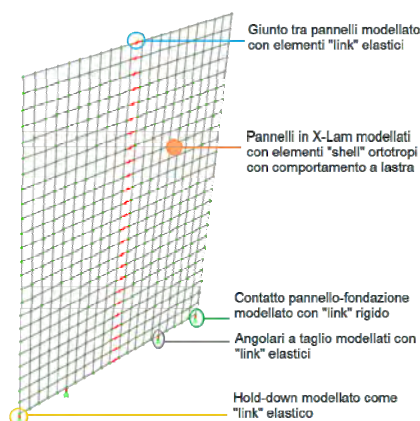
MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

	TIMBERTECH BUILDINGS	PROGRAMMA AD ELEMENTI FINITI
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA DEFORMAZIONE DEI CONNETTORI	$\frac{\Delta_c}{F} = 0,03544 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_c}{F} = 0,03474 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA DEFORMAZIONE DEL PANNELLO	$\frac{\Delta_p}{F} = 0,00581 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_p}{F} = 0,00578 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA TRASLAZIONE RIGIDA DEL PANNELLO	$\frac{\Delta_s}{F} = 0,00319 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_s}{F} = 0,00320 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO DOVUTO ALLA ROTAZIONE RIGIDA DEL PANNELLO	$\frac{\Delta_r}{F} = 0,00001 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_r}{F} = 0,00019 \frac{mm}{kN}$
SPOSTAMENTO ORIZZONTALE TOTALE	$\frac{\Delta_{TOT}}{F} = 0,05248 \frac{mm}{kN}$	$\frac{\Delta_{TOT}}{F} = 0,05191 \frac{mm}{kN}$
RIGIDEZZA EQUIVALENTE A TAGLIO DELLA PARETE	$k_{par} = 19054 \frac{kN}{m}$	$k_{par} = 19264 \frac{kN}{m}$

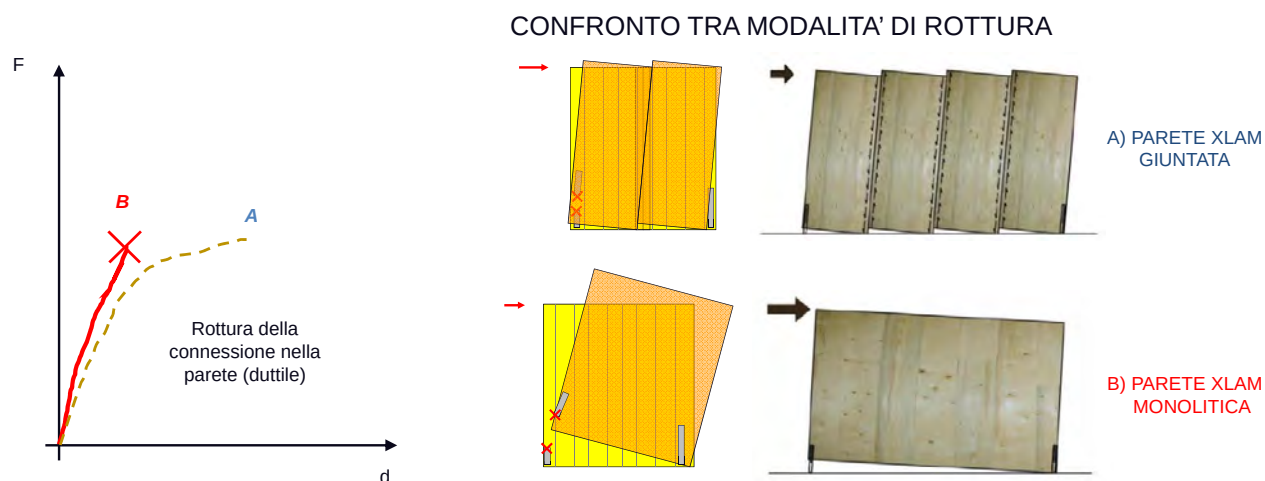
Contributi di deformazione di una parete in XLAM giuntata



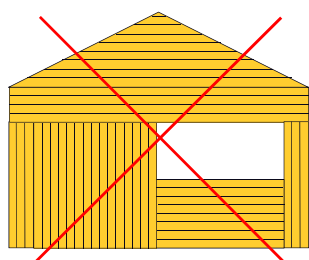
PARETI GIUNTATE



MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

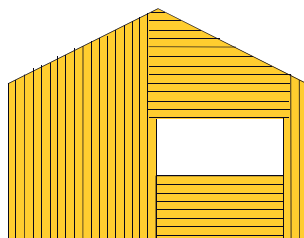


MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM



VERIFICA DI STABILITA' DELLA PARETE?

TRASMISSIONE DELLE AZIONI ORIZZONTALI?



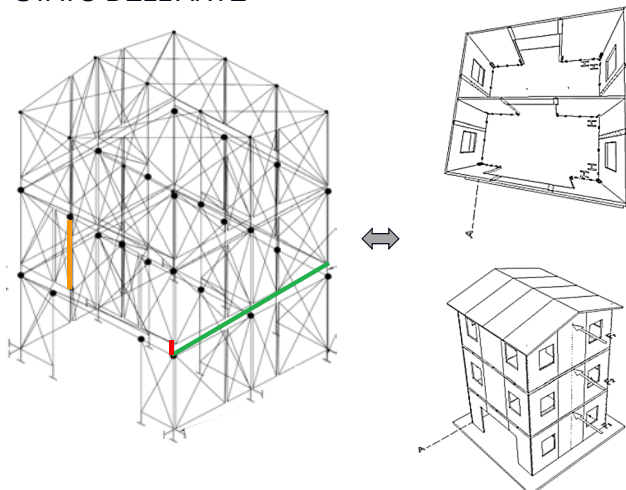
PARETI GIUNTATE

Per assicurare un'adeguata resistenza nei confronti dell'instabilità, deve essere assicurata la continuità flessionale della porzione di parete compresa tra due impalcati successivi.



MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

STATO DELL'ARTE



CONNESSIONI

In letteratura sono stati proposti diversi metodi per modellare gli edifici con pareti portanti in legno.

Modello con pannelli di parete rigidi, collegati alla fondazione ed ai solai di interpiano mediante elementi molla non lineari verticali (hold-down) ed orizzontali (angolari a taglio). Ulteriori molle non lineari usate per modellare i collegamenti tra i pannelli XLAM.

Quale fattore di struttura per gli edifici multipiano a struttura di legno con pannelli a strati incrociati? - Ario Ceccotti, Maurizio Follesa, Marco Pio Lauriola

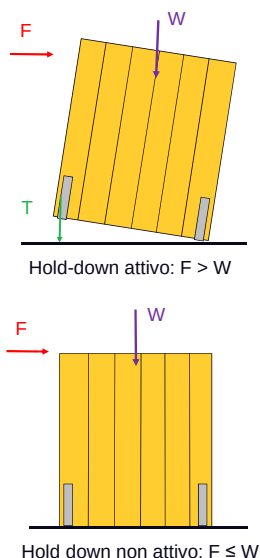
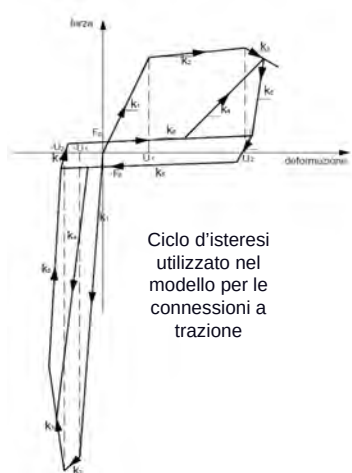
HOLD-DOWN: Molla verticale asimmetrica

ANGOLARI TAGLIO: Molla orizzontale simmetrica

GIUNTI VERTICALI TRA PANNELLI PARETE: Molla verticale simmetrica

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE



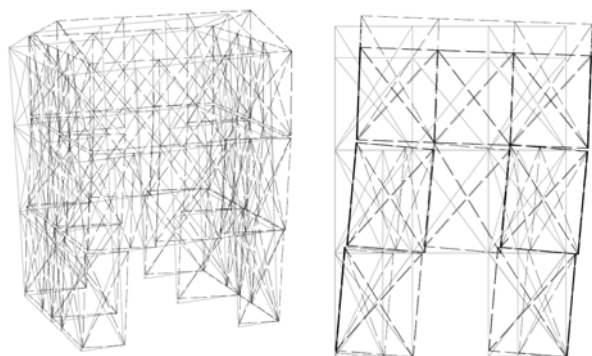
IPOTESI

- Solai considerati infinitamente rigidi nel piano
- Connessioni a trazione modellate come molle non lineare a comportamento non simmetrico per cogliere il reale comportamento della struttura
- Hold-down presentano un comportamento fortemente non lineare con rigidità molto diverse a trazione (angolare attivo) e a compressione (contatto con elementi lignei)
- Carico verticale W sulla parete ha notevole influenza

analisi non lineare

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE

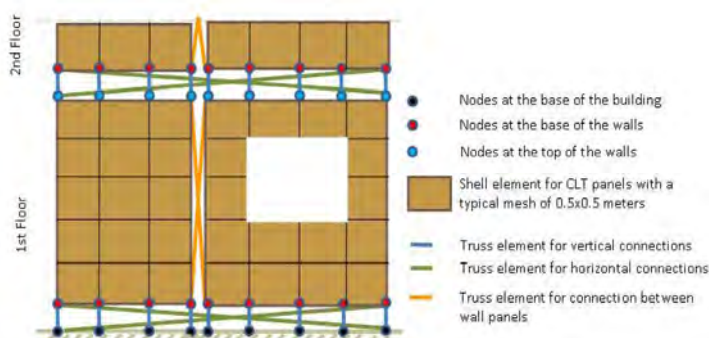


PROBLEMATICHE

- Modellando i pannelli infinitamente rigidi, non è possibile eseguire alcuna verifica sul materiale XLAM
- Metodi di analisi complessi, generalmente non adatti all'uso professionale
- Il metodo prevede l'uso dell'analisi non lineare la quale richiede **la conoscenza di dati sperimentali relativi al comportamento delle connessioni metalliche utilizzate nel progetto**
- È richiesto l'uso di software adeguati che siano in grado di simulare l'effettiva risposta non lineare dei connettori metallici

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE



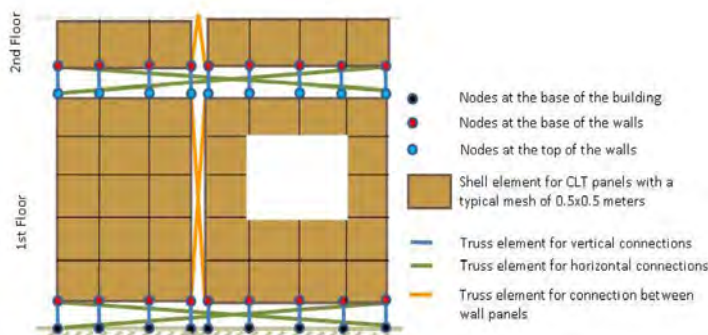
Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to Eurocode 8 - M. Follesa, I. P. Christovasilis, M. Fragiaco

Modello numerico:

- Tridimensionale (NTC2018)
- Analisi lineare statica e dinamica
- Pannelli in XLAM modellati con elementi shell a 4 nodi (24 gradi di libertà) di dimensione 0,5x0,5 m considerando sia il comportamento membranale (lastra) sia quello flessionale (piastra)
- Elementi truss a 2 nodi (6 gradi di libertà) per modellare i collegamenti tra i diversi pannelli XLAM componenti le pareti
- Vincolo di diaframma rigido per connettere i nodi situati allo stesso livello

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE



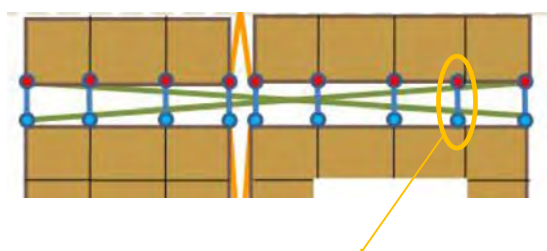
Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to Eurocode 8 - M. Follesa, I. P. Christovasilis, M. Fragiaco

IPOTESI SEMPLIFICATIVE

- I diaframmi di impalcati possono essere assunti come infinitamente rigidi nel piano, mentre la rigidità fuori piano non è considerata
- Le connessioni tra i pannelli in XLAM appartenenti ad una parete (complanari) sono considerate con la loro effettiva rigidità
- Le connessioni tra le pareti e i solai sono infinitamente rigide
- Gli hold-down non vengono modellati esplicitamente

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE



Rigidità ricavata considerando $E_{90,mean}$ del legno del solaio

Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to Eurocode 8 - M. Follesa, I. P. Christovasilis, M. Fragiaco

CONNESSIONI A TRAZIONE

Le connessioni a trazione giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della rigidità e della resistenza delle pareti.



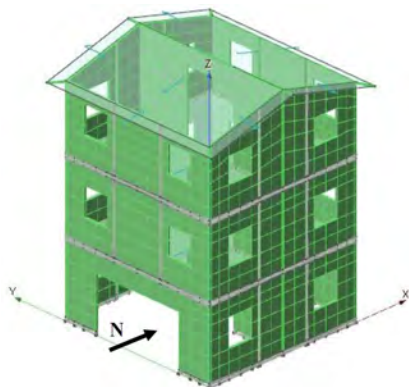
Tuttavia...

Non sono esplicitamente simulate nel modello numerico a seguito della natura del loro comportamento non lineare.

Al loro posto si utilizzano elementi truss verticali con rigidità tale da simulare il comportamento a compressione ortogonale alla fibratura dei solai. Le forze di trazione negli hold-down vengono ricavate come somma delle trazioni sui truss verticali.

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE



Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to Eurocode 8 - M. Follesa, I. P. Christovasilis, M. Fragiaco

VALIDAZIONE DEL MODELLO STUDIO

I risultati del modello numerico sono stati confrontati con quelli dei test su tavola vibrante in termini di:

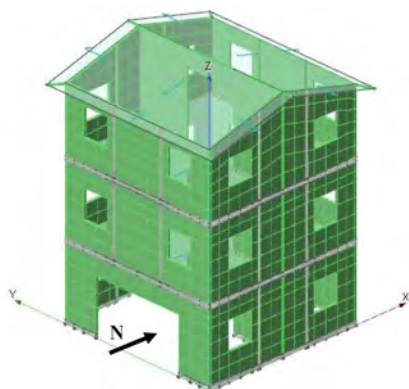
- periodo proprio di vibrazione
- massimo taglio alla base
- spostamenti relativi alla base misurati nei baricentri dei piani

Sono stati sviluppati altri due modelli:

- uno tenendo conto dell'incremento di rigidezza dovuta all'attrito
- l'altro modellando le connessioni tra i pannelli in XLAM come infinitamente rigide

MODELLAZIONE DI EDIFICI IN XLAM

MODELLAZIONE



Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to Eurocode 8 - M. Follesa, I. P. Christovasilis, M. Fragiaco

CONFRONTO MODELLO-DATI SPERIMENTALI

- il primo modello, con rigidezza delle connessioni meccaniche esplicitamente considerata, presenta un buon accordo tra i dati sperimentali e risultati numerici per quanto riguarda il periodo proprio e il taglio alla base anche se si ha una sovrastima degli spostamenti
- il secondo modello presenta un ottimo accordo con i dati sperimentali anche se il periodo di vibrazione è sovrastimato. Nella pratica è difficile stimare correttamente i contributi dovuti all'attrito
- il terzo modello, senza le connessioni, presenta forti scostamenti tra dati sperimentali e risultati dell'analisi numerica

**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE**

mauro.andreolli@timbertech.it

Ing. Mauro Andreolli, PhD
TimberTech

TIMBERTECH
SOLUTIONS FOR TIMBER ENGINEERING