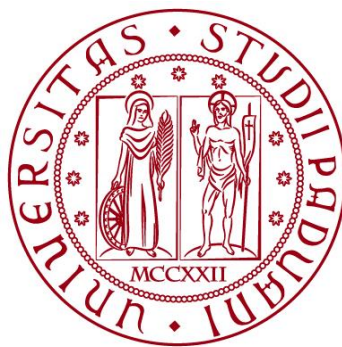


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Magistrale a ciclo unico in Ingegneria Edile - Architettura



**TESI DI LAUREA**

**Il BIM per le strutture in legno prefabbricate:  
interoperabilità tra modellazione, analisi strutturale e  
produzione industriale**

**Relatore:**

PROF. CARLO PELLEGRINO

**Correlatori:**

PHD. ING. CARLO ZANCHETTA

ING. KLAJDI TOSKA

**Laureando:**

EDOARDO RUDELLA

1024228

**ANNO ACCADEMICO 2017-2018**



---

# INDICE

---

Acronimi.....	V
1 INTRODUZIONE.....	1
2 L'ATTUALE SITUAZIONE DEL BIM PER LE STRUTTURE PREFABBRICATE IN LEGNO.....	9
2.1 Principali sfide nelle costruzioni prefabbricate in legno .....	9
2.2 L'importanza dei Metodi Moderni di Costruzione nel settore.....	10
2.3 Requisiti e limitazioni del BIM nelle costruzioni in legno prefabbricate .....	12
2.3.1 Flessibilità del design .....	12
2.3.2 Processo di prefabbricazione.....	13
2.3.3 Consegna, assemblaggio, costruzione.....	14
2.3.4 Performance strutturali .....	15
2.4 Problemi e potenzialità nell'utilizzo delle tecnologie BIM attualmente esistenti nelle costruzioni prefabbricate.....	16
2.5 Applicazioni sperimentali.....	18
2.6 Conclusioni.....	22
3 VERIFICA DI ELEMENTI LIGNEI.....	23
3.1 Il legno strutturale.....	23
3.1.1 Legno massiccio.....	24
3.1.2 Legno lamellare incollato.....	25
3.1.3 Pannelli a tavole incrociate tipo X-LAM.....	25
3.2 Proprietà del legno strutturale .....	27
3.2.1 Classi di servizio .....	27
3.2.2 Proprietà meccaniche di calcolo.....	27
3.3 Resistenze di calcolo .....	29
3.4 Principali verifiche di resistenza agli stati limite ultimi .....	30
3.5 Principali verifiche di stabilità.....	36
3.6 Principali verifiche dei pannelli a tavole incrociate tipo X-LAM.....	37
4 IL SISTEMA X-RAD .....	43
4.1 X-One .....	43
4.1.1 Caratteristiche dimensionali.....	44

4.2	X-Plate .....	46
4.3	X-Seal.....	47
4.4	Ingegneria strutturale .....	48
4.4.1	Componenti elementari.....	48
4.4.2	Caratteristiche meccaniche dell'acciaio.....	52
4.4.3	Prove sperimentali .....	53
4.4.4	Analisi FEM.....	59
4.4.5	Analisi delle condizioni di sollecitazione .....	62
4.4.6	Definizione di un criterio di resistenza .....	72
4.4.7	Coefficienti di sicurezza .....	78
4.4.8	Campo di utilizzo della connessione.....	79
4.4.9	Dominio di rottura caratteristico .....	80
4.4.10	Dominio di rottura di progetto.....	81
4.4.11	Prescrizioni da Benestare Tecnico Europeo (ETA 15/0632).....	83
5	ANALISI STRUTTURALE CON IL SISTEMA X-RAD .....	87
5.1	Modalità di modellazione agli elementi finiti proposta da rothoblaas ..	87
5.2	Modellazione della parete singola .....	96
5.2.1	Parete singola in Midas Gen 2018 .....	96
5.2.2	Parete singola in Sismicad 12.....	101
5.2.3	Confronto fra i risultati per la parete singola fra i software Midas Gen 2018 e Sismicad 12.....	109
5.3	Modellazione del caso studio.....	110
5.3.1	Implementazione del caso studio in Midas Gen 2018.....	111
5.4	Verifica del sistema X-Rad con MyProject.....	116
6	ANALISI DI INTEROPERABILITÀ.....	119
6.1	Interoperabilità Revit 2017 – Sismicad 12 .....	119
6.1.1	Esportazione tramite file IFC.....	119
6.1.2	Esportazione diretta tramite <i>Esporta in Sismicad</i> .....	121
6.1.3	Conclusioni.....	125
6.2	Interoperabilità Revit 2017 – Midas Gen 2018.....	126
6.2.1	Esportazione tramite <i>Midas Link</i> .....	126
6.2.2	Conclusioni.....	134
7	FILIERA DI INTEROPERABILITÀ.....	135
7.1	Modellazione in Revit .....	135

7.1.1	Geometria .....	135
7.1.2	Modellazione degli elementi <i>beam</i> della connessione X-One ....	137
7.1.3	Pareti .....	142
7.1.4	Vincoli .....	145
7.1.5	Altri elementi .....	146
7.2	Importazione in Midas Gen .....	146
7.3	Esportazione dei risultati dell'analisi da Midas Gen .....	147
7.4	Verifica della connessione tramite software Rothoblaas .....	148
7.5	Esportazione verso Dietrich's .....	148
8	CONCLUSIONI .....	151
	Bibliografia .....	155



---

## ACRONIMI

---

- BIM** Building Information Modeling
- CAD** Computer Aided Design
- CAM** Computer Aided Manufacturing
- CNC** Computer Numerical Control
- DXF** Drawing Exchange Format
- IDM** Information Delivery Manual
- IFC** Industry Foundation Classes
- IFD** International Framework for Dictionaries
- ISO** International Organization for Standardization
- MVD** Model view Definitions
- NIBS** National Institute of Building Sciences
- NBS** National Building Specification
- XML** Extensible Markup Language





---

## INTRODUZIONE

---

Il settore delle costruzioni in legno sta vivendo, nonostante il momento di crisi del mercato dell'edilizia, un periodo di grande crescita, guadagnando quote di mercato.

In Italia nel 2015, il settore ha generato un valore di produzione di 700 milioni di euro, posizionandosi al quarto posto fra i paesi europei<sup>1</sup>.

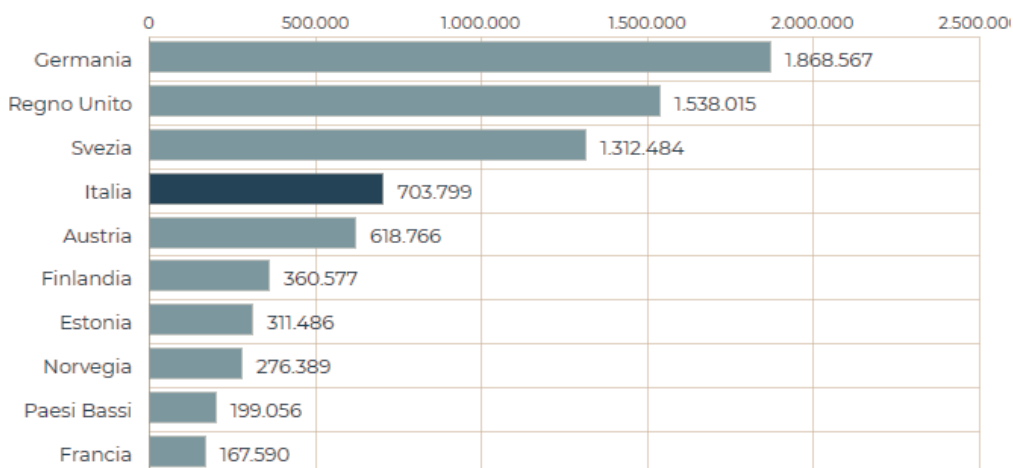


Immagine 1.1: valore della produzione in milioni di euro di edifici in legno fra i paesi europei.

(Fonte: elab. Centro studi Fla su dati Eurostat)

Questo dato rappresenta una crescita rispetto l'anno precedente del 9.9%, ed ha permesso al settore di arrivare alla quota di mercato dei permessi di costruire del 7.2% in Italia<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Mancini Giovanna. "L'edilizia in legno in Italia raggiunge quota 700 milioni". *Il sole 24 ore*, 12 luglio 2017. Web 11/01/2017. <<http://www.ilsole24ore.com/art/impresa-e-territori/2017-07-11/l-edilizia-legno-italia-raggiunge-quota-700-milioni-143305.shtml?uuid=AEFYeTvB>>

<sup>2</sup> Federlegno Arredo, "2° Rapporto case ed edifici in legno".

Nello stesso periodo si è verificata anche una crescita delle esportazioni, che per la prima volta hanno superato le importazioni<sup>1</sup>.

I dati raccolti nel 2° Rapporto case ed edifici in legno sono stati riassunti da Federlegno Arredo nel seguente schema<sup>3</sup>.

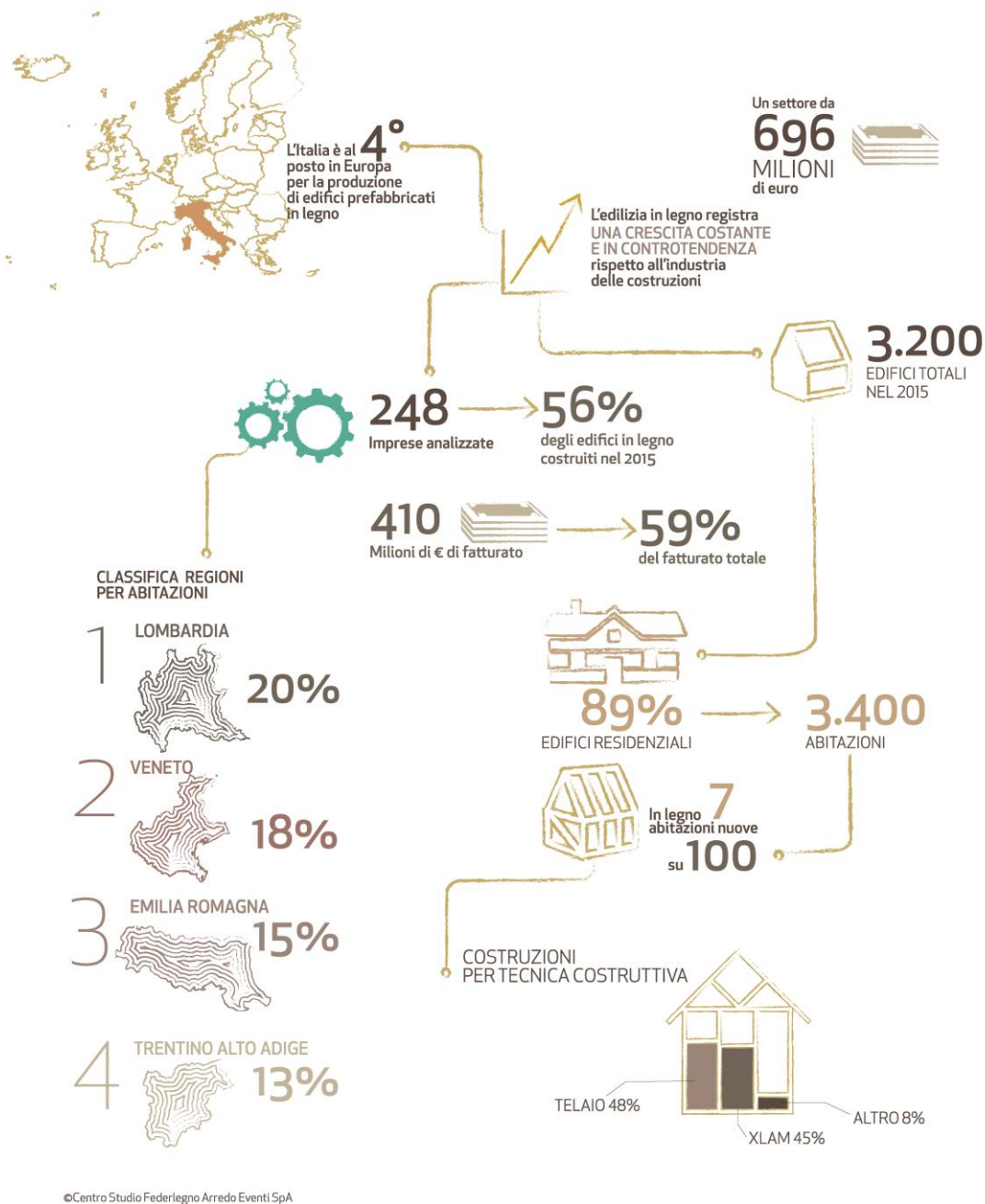


Immagine 1.2: schema riassuntivo dei risultati emersi dal 2° Rapporto case ed edifici in legno, condotto da Federlegno Arredo.

<sup>3</sup> Federlegno Arredo, “2° Rapporto case in sintesi”. Web 15/01/2018.

< [http://www.federlegnoarredo.it/ContentsFiles/info\\_nuova.pdf](http://www.federlegnoarredo.it/ContentsFiles/info_nuova.pdf) >

Le ragioni di questa crescita sono da ricercare in una maggiore sostenibilità e versatilità, che consente tempi di costruzione più rapidi rispetto ai metodi costruttivi tradizionali<sup>1</sup>.

Anche le imprese hanno investito molto per sviluppare soluzioni tecnologiche e materiali sempre più all'avanguardia. Un esempio ne sono i pannelli in X-Lam, che in pochi anni sono diventati la soluzione tecnologica utilizzata nel 45% delle nuove costruzioni in legno<sup>1</sup>.

Ad un quadro di grande crescita tecnologica e di mercato per il settore, come evidenziato nel rapporto, si è notato che non è corrisposta una crescita delle possibilità di interoperabilità del settore.

Ciò che è avvenuto attraverso l'impiego della metodologia BIM (Building Information Modeling) per il legno ed il calcestruzzo non è ancora avvenuto per il legno.

Il BIM infatti è, secondo la definizione dell'inglese NBS (National Building Specification), un processo per creare e gestire informazioni riguardo un edificio attraverso tutto il suo ciclo di vita.

È chiaro che il fulcro di questa metodologia siano le informazioni, di qualsiasi tipologia, che vengono associate a determinati oggetti. Le informazioni vengono inserite all'interno di un modello parametrico che riguarda l'intero edificio, in cui i componenti si relazionano fra loro in base ad informazioni e parametri a loro associati.

Un processo di questo genere ha quindi la potenzialità di velocizzare e rendere più efficiente l'intero processo di design di un edificio, concentrando il carico di lavoro coordinato fra i vari professionisti all'inizio del processo, attraverso la possibilità di una migliore collaborazione fra le parti coinvolte, in cui i costi per le variazioni sono relativamente bassi, come evidenziato dal diagramma di MacLeamy in *Immagine 1.3*.

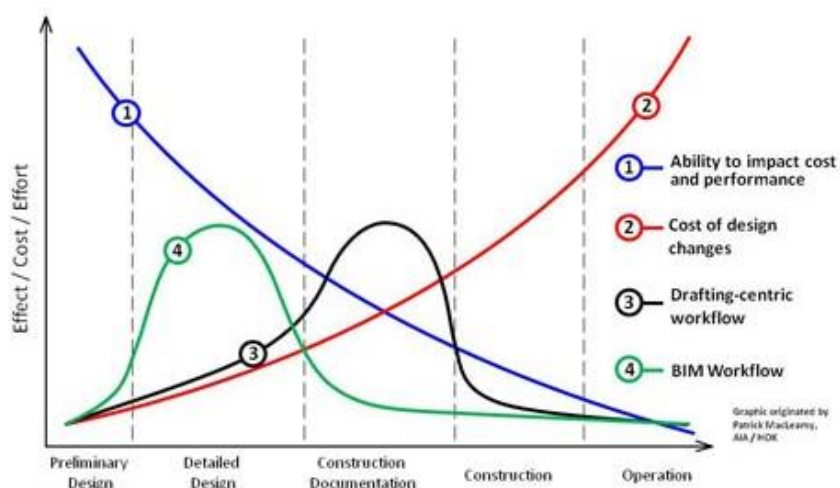


Immagine 1.3: diagramma di MacLeamy.

Le potenzialità offerte da questo tipo sono enormi, soprattutto per quanto riguarda sistemi di costruzione prefabbricati, come lo è il legno.

Mentre questo processo si trova già in fasi molto avanzate per l'acciaio, per il legno non esistono ancora tecnologie specifiche in grado di supportare il processo.

La seguente tesi è nata quindi con l'intento di capire quale sia l'attuale situazione degli strumenti BIM per le costruzioni prefabbricate in legno.

È stata svolta una prima parte di ricerca di letteratura, per comprendere non solo le tecnologie, ma anche le dinamiche di mercato che conducono all'attuale situazione commerciale degli edifici prefabbricati in legno.

A seguito della parte di analisi si è svolta una parte sperimentale, volta a verificare le conclusioni tratte e comprendere in quale ruolo il BIM possa collocarsi per produrre un effettivo vantaggio nella filiera di produzione di edifici prefabbricati in legno.

Sono state quindi scelte le tecnologie da analizzare. Essendo risultata la tecnica costruttiva con pannelli X-Lam in notevole ascesa come percentuali di utilizzo, avendo quasi raggiunto come uso le pareti a telaio<sup>2</sup>, si è optato per questa soluzione.

I pannelli X-Lam sono pannelli di legno di grandi dimensioni formati da più strati di tavole incollati fra loro, in modo che la fibratura di ogni strato risulti ruotata di 90° rispetto allo strato precedente<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Bernasconi Andrea (2010). *Il materiale XLAM Caratteristiche e prestazioni*. Web 16/03/2018. <<http://www.promolegno.com/tecnologia/sistemi-costruttivi/xlam/>>



*Immagine 1.4: Pannello tipo X-Lam a 5 strati.*

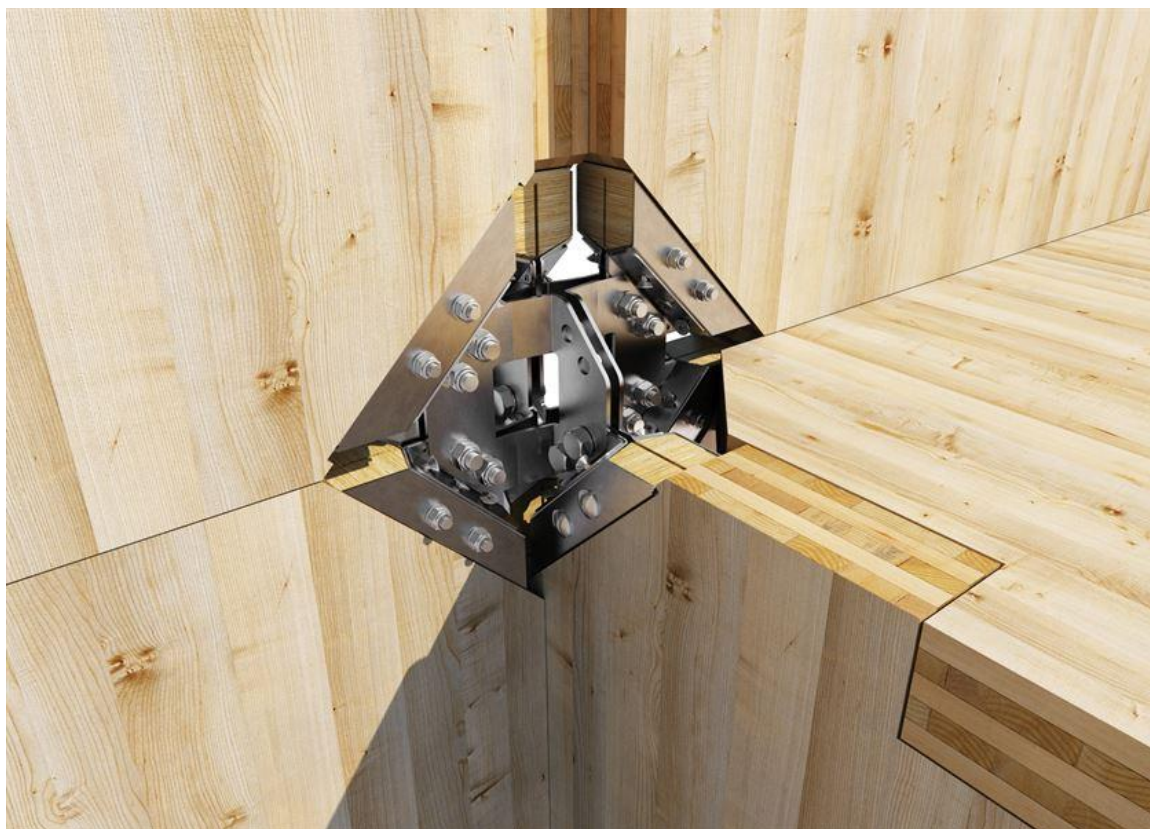
Questa tipologia costruttiva sembra suscitare sempre maggiore interesse, ed a lungo termine potrebbe risultare concorrenziale rispetto ai metodi di costruzione tradizionali.



*Immagine 1.5: esempio di struttura con sistema costruttivo X-Lam.*

Essendo i pannelli X-Lam non ancora specificamente normati secondo specifiche di settore ma tramite ETA che ne definiscono le prestazioni, e richiedenti quindi una certa esperienza del progettista nelle costruzioni in legno, si è scelto di optare per un sistema di connessioni che esponesse delle precise linee guida nella modellazione. Il sistema scelto è il sistema X-Rad di Rothoblaas, azienda leader nello sviluppo e nella fornitura di soluzioni ad elevato contenuto tecnologico per la carpenteria e l'edilizia in legno.

Questo meccanismo di fissaggio, recente ed innovativo, consente di elevare il grado di prefabbricazione delle strutture, riducendo il grado di fissaggio manuale in cantiere, grazie alla particolarità del montaggio tramite bullonature.



*Immagine 1.6: esempio di nodo realizzato con sistema X-Rad.*

Il carattere innovativo del sistema ha reso necessario uno studio approfondito del sistema costruttivo, per poterne comprendere a fondo le caratteristiche, i metodi di progettazione e le modalità di modellazione.

Dopo aver acquisito le conoscenze di base riguardanti la progettazione con questo sistema costruttivo si è provveduto ad un'analisi di interoperabilità, per sondare l'effettiva possibilità di creare una filiera che consenta lo scambio di informazioni tra le fasi di modellazione, analisi strutturale e produzione industriale per strutture prefabbricate in legno.

Si è optato per l'analisi di interoperabilità a partire dal software Revit Autodesk 2017 verso due tipologie di software per analisi strutturale diversi.

La prima tipologia riguarda un software FEM, Midas Gen 2018, la cui interoperabilità è già stata oggetto di studio, ma le cui tipologie costruttive trattate risultano essere solamente acciaio e cemento armato.

La seconda riguarda un software di analisi strutturale ad elementi finiti con interfaccia tridimensionale, Sismicad 12, molto utilizzato nell'analisi strutturale di edifici in legno per la velocità e semplicità di input delle informazioni, e per la specificità delle soluzioni presenti per le pareti in legno.

Infine è stato effettuato un tentativo di interoperabilità verso il software Dietrich's, leader nel settore delle costruzioni in legno e del controllo delle macchine CNC di produzione.





---

## L'ATTUALE SITUAZIONE DEL BIM PER LE STRUTTURE PREFABBRICATE IN LEGNO

---

Le strutture prefabbricate in legno hanno la potenzialità di portare importanti benefici al settore delle costruzioni, ma vi sono degli ostacoli che ne impediscono una grande diffusione.

Il rapido sviluppo del BIM può giocare un ruolo importante in questo settore, portando a superare parte di questi ostacoli.

### 2.1 PRINCIPALI SFIDE NELLE COSTRUZIONI PREFABBRICATE IN LEGNO

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha portato ad un incremento della velocità, precisione ed efficienza degli impianti di produzione degli elementi prefabbricati in legno.

Nonostante lo sviluppo della parte manifatturiera delle costruzioni in legno prefabbricate, rimangono due importanti differenze rispetto ad un prodotto puramente industriale.

La prima è che le costruzioni sono dipendenti dal sito in cui devono essere costruite, pertanto delle soluzioni standardizzate per la produzione in serie difficilmente potranno rispondere ai requisiti necessari per la costruzione nello stesso modo di quanto sarebbero in grado di fare delle soluzioni studiate per il caso specifico.

La seconda è che l'industria delle costruzioni è molto frammentata. I processi industriali fanno affidamento su un gran numero di piccole imprese che producono componenti e servizi altamente specializzati, molto spesso focalizzati su particolari ambiti territoriali.

Entrambi questi ostacoli non sono insormontabili. Potranno essere superati se il settore genererà abbastanza volume di lavoro per diventare finanziariamente competitivo.

In secondo piano vi è anche una certa diffidenza verso questo materiale, dovuta alla scarsa conoscenza dei sistemi costruttivi moderni e dall'uso del termine "prefabbricato"<sup>1</sup>.

Il reale ostacolo, riguardo questo aspetto, sembra quindi essere non tecnico, ma culturale.

## 2.2 L'IMPORTANZA DEI METODI MODERNI DI COSTRUZIONE NEL SETTORE

L'importanza del BIM per le costruzioni prefabbricate è stata riconosciuta da Arif et al (2012)<sup>2</sup> e Goulding et al (2014)<sup>3</sup>, secondo cui le potenzialità di crescita offerte dal suo impiego sono riconosciute come un aspetto chiave del design tecnologico durante il processo di prefabbricazione, ed i benefici che ne derivano coprono svariati settori.

Per raggiungere tali scopi è necessario implementare delle strutture e dei processi appropriati.

Un modello iniziale per le costruzioni prefabbricate, che si basa su un Information Delivery Manual (IDM), viene proposto da Nawari (2012)<sup>1</sup>, che descrive i requisiti del modello informativo per le varie fasi del processo.

---

<sup>1</sup> Nawari, N. (2012). "BIM Standard in Off-Site Construction". *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 107-113.

<sup>2</sup> Arif, M., Goulding J., Rahimian F. (2012). "Promoting Off-Site Construction: Future Challenges and Opportunities". *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 75-78.

<sup>3</sup> Goulding, J., et al. (2014). "New offsite production and business models in construction: priorities for the future research agenda". *Architectural Engineering and Design Management*, 1 - 22.

## L'attuale situazione del BIM per le strutture prefabbricate in legno

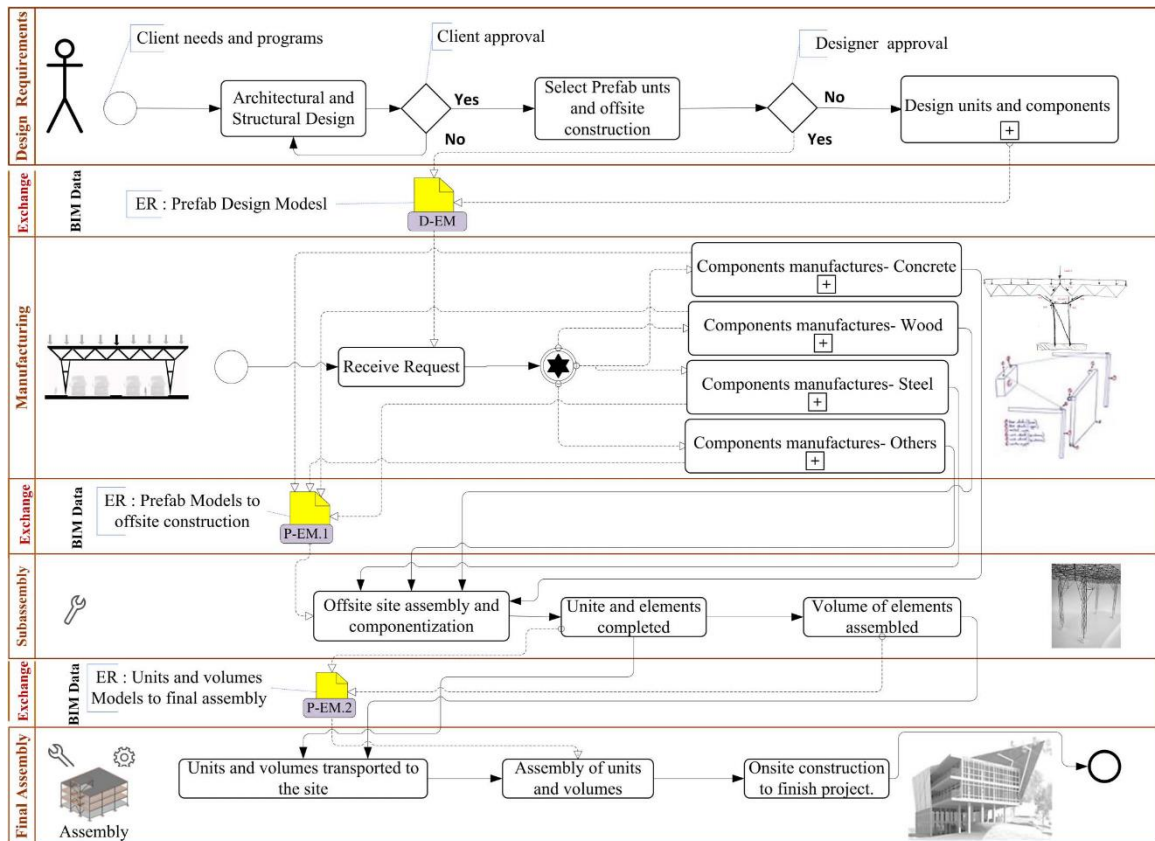


Immagine 2.1: mappa di processo per le costruzioni prefabbricate proposta da Nawari<sup>1</sup>.

L'ambizione è di riuscire a sviluppare queste strutture all'interno del framework esistente, utilizzando Model View Definition (MVD) e Industry Foundation Classes (IFCs).

Questo tipo di lavoro, fino ad ora, si è concentrato su materiali quali il calcestruzzo e l'acciaio. Il legno presenta sfide specifiche da superare, quali la naturalità del materiale ed il fatto che l'industria della prefabbricazione in legno è composta da una moltitudine di piccole e medie imprese.

## 2.3 REQUISITI E LIMITAZIONI DEL BIM NELLE COSTRUZIONI IN LEGNO PREFABBRICATE

Per lo sviluppo futuro del BIM nel settore delle costruzioni prefabbricate in legno è necessario implementare un framework che abbia la possibilità di supportare anche la crescita tecnologica del settore per poter essere competitivo. Le aree di sviluppo da coprire possono essere così categorizzate<sup>4</sup>:

- Flessibilità del design;
- Processo di prefabbricazione;
- Consegna, assemblaggio, costruzione;
- Performance strutturali;

### 2.3.1 Flessibilità del design

Uno dei maggiori problemi delle costruzioni prefabbricate è che i requisiti delle linee di produzione hanno condotto ad una scarsa flessibilità nella progettazione. La standardizzazione dei componenti, necessaria per le linee di produzione, si traduce in un range limitato di soluzioni.<sup>5</sup>

Questo, negli anni, ha messo in cattiva luce il settore, portando all'immagine negativa di cui godono le costruzioni prefabbricate<sup>4</sup>.

L'utilizzo del BIM potrebbe essere di grande aiuto. La possibilità di cambiare le variabili di oggetti predefiniti che possiedono caratteristiche "intelligenti" è un aspetto chiave del BIM che contribuirebbe ad incrementare la flessibilità.

Inoltre il processo può essere razionalizzato attraverso librerie che permettono di lavorare a scale diverse, dal singolo componente di progetto alle unità volumetriche.

Esistono già delle librerie di componenti BIM, ma il passo successivo dovrebbe essere quello di creare oggetti che vadano oltre il modello 3D, implementandovi caratteristiche specifiche per il legno ed il suo processo di fabbricazione, che portino a maggior interoperabilità e qualità.

---

<sup>4</sup> Hairstans, Robert (2010). *Off-site and modern methods of timber construction: a sustainable approach*, High Wycombe, TRADA Technology Ltd.

<sup>5</sup> Patlakas, Panagiotis, Andrew Livingstone, Robert Hairstans (2015). "A BIM Platform for Offsite Timber Construction". *Real Time – Proceedings of the 33rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Vienna, Austria, 16-18th September 2015*, eds. Bob Martens et al., vol. 1, 597-604.

Librerie di questo tipo consentirebbero ai progettisti di avere accesso ad un ampio database di parti costituenti, incrementando la flessibilità del design<sup>5</sup>.

### 2.3.2 Processo di prefabbricazione

Un incremento della flessibilità del design porta però ad altri problemi tecnici nel processo di prefabbricazione. Non tanto la complessità delle geometrie, che le moderne macchine Computer Numerical Control (CNC) sono in grado di affrontare, ma la necessità di standard comuni per la corretta traduzione di tutte le geometrie parametriche come appropriate istruzioni CNC. All'interno dell'ambiente BIM è possibile sviluppare plug-in che forniscano al progettista la corretta precisione e tolleranza di macchine CNC, consentendo un design corretto dall'inizio della progettazione.

La maggiore accuratezza nella produzione del singolo componente realizzato in manifattura è nota, ma il legno, essendo un materiale naturale, impone la gestione di parametri diversi di tipo estetico, meccanico e fisico, che variano a seconda delle condizioni ambientali.

Un primo vantaggio nell'utilizzo del BIM è la possibilità di ottenere quantità e volumi direttamente dal modello.

Un secondo vantaggio è la grande disponibilità di dati di un modello BIM, che consente maggiore precisione richiesta dalla linea di produzione, e la possibilità di fornire dati riguardanti ad esempio l'imballaggio, direttamente nel modello.

A questi importanti benefici si contrappone però la mancanza di interoperabilità, tra le linee di produzione ed i modelli BIM. In alcune interviste<sup>5</sup> viene vista come una delle maggiori criticità per il BIM nel settore.

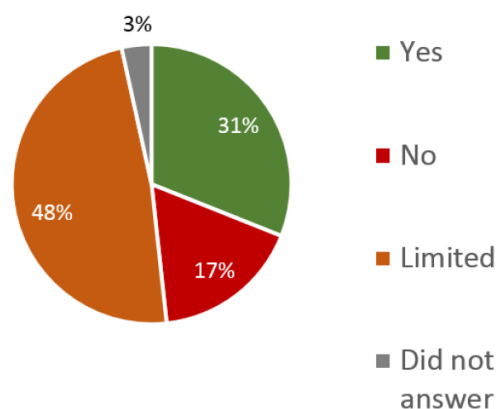


Immagine 2.2: risultati dell'intervista in cui veniva chiesto agli intervistati se vi fosse un buono scambio di informazioni fra le parti coinvolte in un progetto.

I sistemi CNC godono di interoperabilità con software di ingegneria meccanica, come ad esempio DS Solidworks, e non verso i software BIM.

Attualmente i modelli devono essere ridisegnati in modo specifico per le linee di produzione, richiedendo software e manodopera con conoscenze in ambito manifatturiero, per poter sfruttare appieno le potenzialità di macchine CNC complesse.

Un'integrazione di protocolli standard con le esistenti applicazioni BIM ed i sistemi CNC porterebbe quindi grandi vantaggi al settore.

### **2.3.3 Consegna, assemblaggio, costruzione**

Le tecnologie BIM esistenti permettono già di affrontare questi temi, anche se maggiormente dal punto di vista della sicurezza. Lo scambio di dati con software di project planning è già possibile, ma andrebbe ampliata la programmazione e visualizzazione dei vari stadi di costruzione, anche per quanto riguarda la movimentazione di carichi nell'area di cantiere.

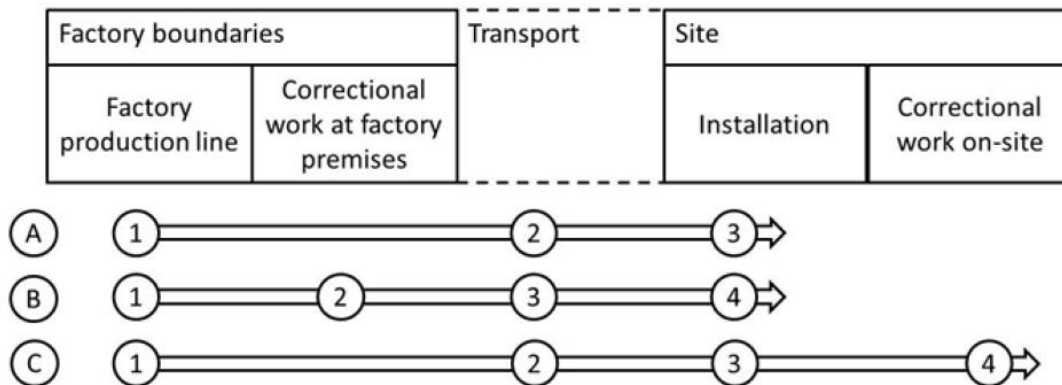
Il processo di costruzione degli edifici in legno soffre infatti ancora di una certa inefficienza in temi di management ed uso di risorse<sup>6</sup>.

Nelle costruzioni in legno tutti i prodotti impiegati possono essere connessi ad uno specifico produttore, e questo consente una migliore programmazione delle scadenze, caratteristiche che potrebbero essere implementate all'interno del modello stesso, migliorandone la loro gestione all'interno dell'ambiente BIM.

Anche l'installazione in sito ha ancora molte potenzialità di sviluppo. Questa fase dovrebbe essere limitata alla connessione fra elementi ed alle finiture esterne, utilizzando metodi di connessione standard, ripetibili ed anch'essi prefabbricati, per incrementare la velocità del processo, anziché dover contare sulla capacità delle maestranze di risolvere questioni tecnologiche in cantiere<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Ruuska, Antti, Tarja Häkkinen (2016). "Efficiency in the delivery of multi-story timber buildings". *Energy Procedia*, vol. 96, 190-201.



*Immagine 2.3: le risorse necessarie (manodopera, tempo, costo) crescono da A verso C, crescendo il lavoro necessario fuori dalla manifattura, che può causare problemi imprevisti e necessità di correzioni. È quindi da preferire un processo di tipo A.*

### 2.3.4 Performance strutturali

La verifica delle performance strutturali è un requisito fondamentale per le costruzioni, ma è un problema non tipico della manifattura. Inoltre il legno, essendo un materiale naturale, aumenta le complessità del calcolo, dovendo computare anche proprietà come il contenuto d'umidità, la direzione della fibratura o tener conto del corretto stoccaggio del materiale.

L'adozione dell'Eurocodice 5 (EC5) ha portato il legno alla verifica attraverso il metodo degli Stati Limite, garantendo un adeguato approccio analitico e buona trasparenza nel calcolo, al pari di acciaio e calcestruzzo. Nonostante la complessità di calcolo simile, eccetto per le connessioni, il legno mostra delle criticità dovute alla mancanza di dati storici, di performance e di tools di calcolo, che ha portato a coefficienti di sicurezza per il legno altamente conservativi.

Le connessioni in legno possono risultare più problematiche perché creano dei problemi a livello computazionale, soprattutto quelle resistenti a momento.

I software BIM esistenti integrano delle opzioni per l'analisi strutturale, utili per studi preliminari ed indicazioni di massima sul comportamento della struttura.

Non è però pensabile trasferire la complessità di software di analisi strutturale all'interno dell'ambiente BIM, ma piuttosto è consigliabile sviluppare plug-in che consentano una maggiore interoperabilità, verso software di calcolo strutturali, ma anche di verifica al fuoco.

La principale problematica nel procedere su questa strada è che parte dei prodotti per le costruzioni in legno tendono ad essere differenti per ogni singolo produttore, di cui seguono direttive specifiche. Gli stessi produttori offrono a volte software di verifica specifici dei componenti di cui sono proprietari.

Finché i software saranno legati ai singoli produttori difficilmente si potrà raggiungere la flessibilità del design e l'innovazione tecnologica attesa.

La soluzione immediata potrebbe essere quella di sviluppare linee guide standard che i produttori possano seguire, dando seguito a quanto fatto con gli Eurocodici sviluppando anche con uno standard BIM comune.

Nonostante uno spiccato avanzamento negli ultimi anni dei software BIM per le costruzioni in legno, risultano essere molto arretrati rispetto quelli per acciaio e calcestruzzo<sup>5</sup>.

La mancanza di software BIM non è una criticità, quanto invece la mancanza di questi standard che rende difficile l'implementazione degli elementi nei software e l'interoperabilità fra questi<sup>6</sup>.

## **2.4 PROBLEMI E POTENZIALITÀ NELL'UTILIZZO DELLE TECNOLOGIE BIM ATTUALMENTE ESISTENTI NELLE COSTRUZIONI PREFABBRICATE**

Replicando le stesse categorizzazioni del punto precedente, vengono di seguito indicati i vantaggi nell'utilizzo delle tecnologie BIM attualmente disponibili per le costruzioni in legno prefabbricate.

- Flessibilità del design:
  - Parametrizzazione dei componenti;
  - Comportamento intelligente dei componenti, con la capacità di integrare nuove relazioni tra oggetti diversi;
  - Possibilità di sviluppare librerie di componenti contenenti molte più informazioni delle librerie CAD;
- Processo di prefabbricazione:
  - Materiali e quantità possono essere computati direttamente dal modello 3D;
- Consegna, assemblaggio, costruzione:
  - Modellazione e visualizzazione delle fasi costruttive;
  - Possibilità di integrazione con software di project planning;
- Performance strutturali:



- Tools di analisi strutturale sono in grado di fornire un'approssimazione delle performance strutturali.

Il processo di design però è ancora in fase di evoluzione, causando a volte inefficienze, e di conseguenza lavoro aggiuntivo. La sensazione è quella di lavorare su prodotti in via di sviluppo, che si trovano a stadi diversi di avanzamento.

Per ottenere il massimo vantaggio dall'utilizzo del BIM, è importante capire come database di componenti BIM possano essere implementate efficientemente e rapidamente, e come fornire alle piccole e medie imprese delle linee guida comuni per la loro realizzazione.

Successivamente utilizzare queste linee guida per realizzare uno standard BIM per i componenti della manifattura basati sugli esistenti software, per permettere anche alle piccole e medie imprese di usufruirne<sup>5</sup>.

Attualmente, il grande numero di aziende che optano per un modello "chiuso", rendono difficile la realizzazione di queste strutture, e impedendone i conseguenti benefici.

Le prime azione da compiere, a livello istituzionale ed accademico per avviare l'innovazione nel settore sono:

- Sviluppare uno standard per le industrie, con linee guida ed esempi (manuali, abachi);
- Realizzare librerie di componenti editabili, per facilitare il design;
- Realizzare materiale educativo specifico per il settore delle costruzioni in legno.

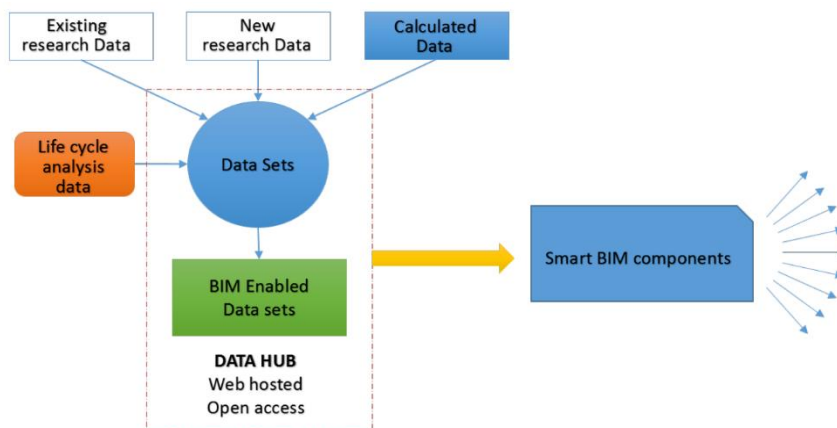


Immagine 2.4: Rappresentazione schematica dello sviluppo di un dataset, in cui riveste una certa importanza anche l'acquisizione di nuovi dati sui componenti in legno, oltre che sull'implementazione di elementi BIM.

## 2.5 APPLICAZIONI SPERIMENTALI

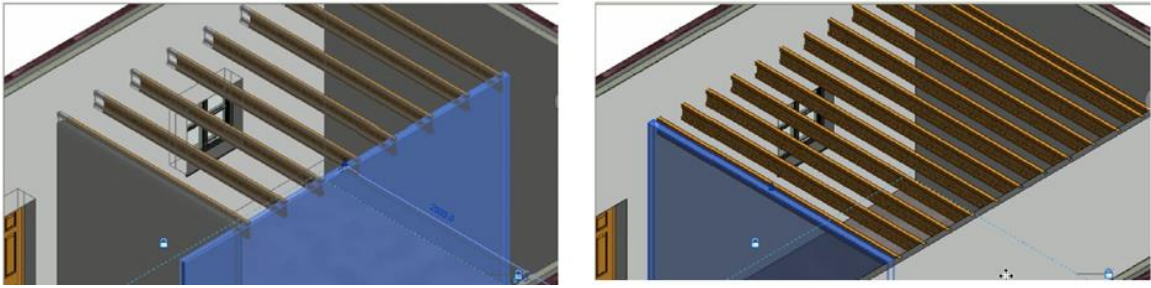
*Studio pilota per una libreria di componenti BIM per le costruzioni prefabbricate in legno*<sup>5</sup>

Alla Southampton Solent University è stato condotto uno studio pilota per dimostrare le potenzialità di una libreria di componenti BIM<sup>7</sup>.

Il caso studio si basava su un sistema proprietario di connessione (JJI Joists) per coperture piane e solai domestici.

Sulla base dei carichi ammissibile per coperture e solai, il produttore ha fornito i corretti valori di campata. Questi sono stati programmati all'interno dei rispettivi componenti BIM adattivi. Le limitazioni massime e minime sono state anch'esse incluse. Il lavoro futuro si concentrerà sull'inserire informazioni sul costo e le performance ambientali.

<sup>7</sup> Beck, D. (2015). *Design and Development of Standardised BIM Components for the Offsite Timber Manufacturing Industry*, Master's Thesis, Southampton Solent University



*Immagine 2.5: nell'immagine a sinistra il passo è automaticamente calcolato in base alla campata, nell'immagine a destra il passo viene automaticamente adattato alla variazione della lunghezza della campata.*

*Automated Code Compliance (ACC) e Multi-Dimensional Data Fitting (MDDF) in ambiente BIM<sup>8</sup>*

L'Automated Code Compliance è un processo di checking che permette il design di un elemento solo se soddisfa particolari requisiti imposti.

Il Multi-Dimensional Data Fitting è un processo matematico che consente di ridurre problemi a più variabili ad un'unica equazione algebrica.

L'utilità di questi processi è la possibilità di poterli integrare all'interno di componenti BIM intelligenti.

Il processo ACC è stato in questo caso applicato in una classica connessione strutturale in legno: l'ancoraggio del rivestimento di una parete in legno tramite una vite assiale.

---

<sup>8</sup> Patlakas, Panagiotis, Andrew Livingstone, Robert Hairstans (2017). "An Automated Code Compliance system within a BIM environment". *ShoCK! – Sharing of Computable Knowledge! - Proceedings of the 35th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Roma, Italy, 20th-22nd September 2017*, eds. Antonio Fioravanti et al., vol. 1, 153-160.

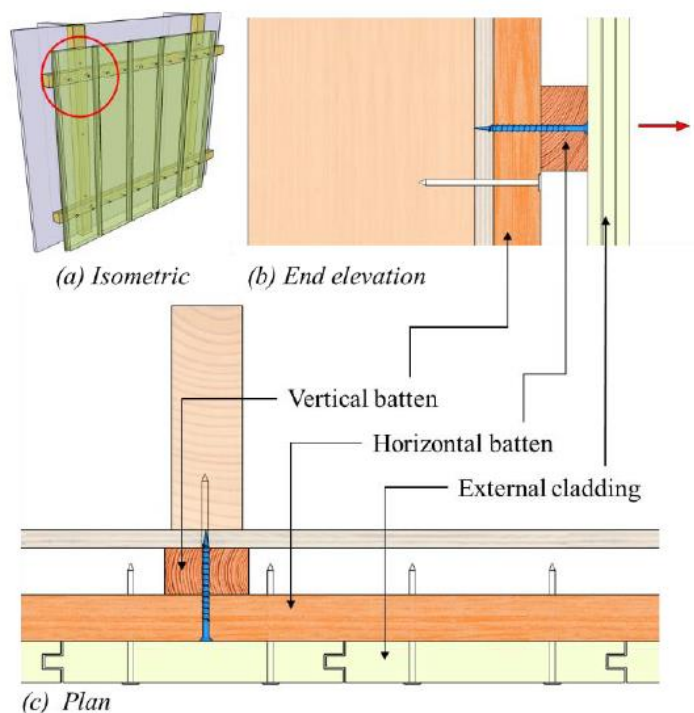


Immagine 2.6: rappresentazione della connessione verificata

Malgrado l'apparente semplicità del sistema, questo risulta essere dal punto di vista matematico un problema ad otto variabili, risolvibile ponendo particolari condizioni al contorno. Esse sono state scelte cercando di riflettere le reali condizioni del sistema.

Il MDDF è stato quindi eseguito mediante un applicativo sviluppato in MATLAB, che consente di ottenere l'equazione algebrica ridotta eseguendo dieci iterazioni di due variabili per ogni esecuzione, mantenendo le altre fissate, per un totale di sette iterazioni, ottenendo un database di dati delle dimensioni di 0.8 gigabyte, per una sola connessione avvitata.

		Minimum	Maximum
Thread point side penetration	$t_{pen}$	21 mm	70 mm
Screw outer thread diameter	$d_o$	3.5 mm	6 mm
Fixing head factor (multiplier)	$k_h$	1	4
Pointside withdrawal strength	$f_{ax.k}$	4.5 N/mm <sup>2</sup>	15 N/mm <sup>2</sup>
Head side pull-through	$f_{h.k}$	4.5 N/mm <sup>2</sup>	15 N/mm <sup>2</sup>
Member timber density	$\rho_{k_m}$	290 kg/m <sup>3</sup>	460 kg/m <sup>3</sup>
Associated density for $f_{h.k}$	$\rho_{hss}$	290 kg/m <sup>3</sup>	460 kg/m <sup>3</sup>
Associated density for $f_{ax.k}$	$\rho_{pss}$	290 kg/m <sup>3</sup>	460 kg/m <sup>3</sup>

Immagine 2.7: condizioni al contorno imposte per limitare e cercare di riflettere in modo reale il problema.

Per verificare la corrispondenza di questa equazione algebrica con le verifiche imposte dall'Eurocodice 5 (EC5) sono state svolte sia validazioni sperimentali che validazioni teoriche.

La validazione teorica è stata eseguita verificando la corrispondenza matematica dell'equazione algebrica ottenuta con l'equazione originale dell'EC5 e la sua corrispondenza con il database costruito, risultata con un ottimo goodness-of-fit (GoF) sull'intero database (GoF<sub>100</sub>) dello 0.0032%.

La validazione sperimentale è stata eseguita all'Edinburgh Napier University, mediante test di resistenza allo sfilamento su vari tipi di viti.

Il grafico mostra come la corrispondenza tra l'equazione algebrica ottenuta e l'equazione dell'EC5 sia quasi perfetta, mentre i dati sperimentali ottenuti siano distribuiti entro il 30% dall'equazione.

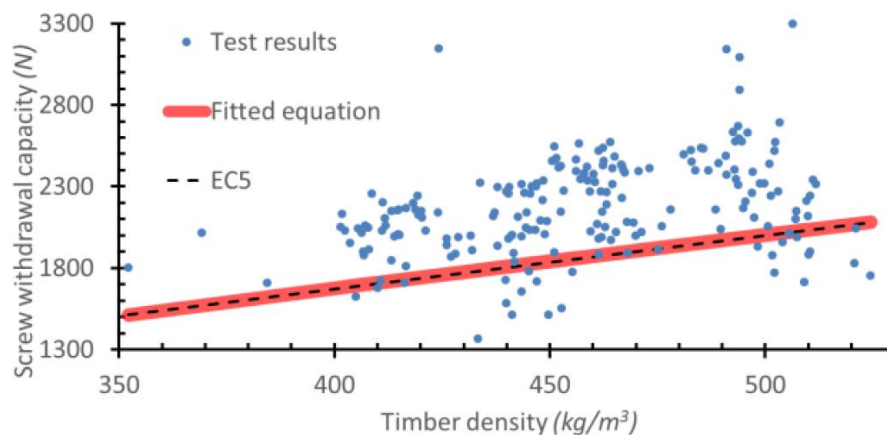


Immagine 2.8: comparazione dei risultati ottenuti dai test sperimentali con l'equazione di verifica.

L'equazione è stata successivamente inserita all'interno del componente BIM, allo scopo di abilitare l'ACC di un componente strutturale, alla variazione di sole geometrie o proprietà dei materiali.

Il lavoro ha mostrato le potenzialità dell'ACC per le connessioni in legno attraverso l'MDDF, che verrà sviluppato anche per problemi con un maggior numero di variabili.

## 2.6 CONCLUSIONI

In sostanza il mercato delle costruzioni prefabbricate in legno risulta essere molto frammentato: moltissime piccole e medie imprese che adottano soluzioni di tipo *closed silo*, non favoriscono lo sviluppo di soluzioni interscambiabili. Per questo il BIM fatica a raggiungere un ruolo chiave nello sviluppo del settore, nonostante le sue potenzialità siano altissime.

L'implementazione di standard BIM per l'interoperabilità tra la parte di modellazione, analisi strutturale e manifatturiera può portare ad una crescita significativa del settore, preservando la varietà di soluzioni presenti sul mercato.

Dei tentativi di sviluppare componenti intelligenti attraverso l'ACC sono stati effettuati con successo, dimostrando le ampie potenzialità di design del sistema. Resta ancora aperto il dibattito, se sia effettivamente vantaggioso portare la verifica strutturale delle connessioni all'interno dell'ambiente BIM o se sia, con gli strumenti attuali, più vantaggioso utilizzare questo sistema per incrementare l'interoperabilità fra piattaforme.

---

## VERIFICA DI ELEMENTI LIGNEI

---

In questo capitolo verranno introdotte le proprietà del legno come materiale da costruzione, la metodologia per le principali verifiche ed una panoramica sulle principali verifiche dei pannelli tipo X-LAM.

### 3.1 IL LEGNO STRUTTURALE

Le prestazioni meccaniche del legno sono connesse all'origine naturale del materiale. L'organizzazione microscopica del legno, costituito da cellule con pareti portanti ma vuote al loro interno, gli conferisce elevati valori di resistenza con un peso contenuto, ma anche una marcata anisotropia, che si traduce in differenze dei parametri meccanici in funzione della direzione considerata.

Come si può vedere in *Tabella 3.1*, presenta una buona efficienza in termini di resistenza, valutata attraverso il rapporto fra  $f$  resistenza a compressione e  $\rho$  densità del materiale, paragonabile a quella dell'acciaio e ben sei volte superiore a quella del calcestruzzo. Altrettanto significativo è il rapporto tra  $E$  modulo di elasticità in direzione parallela alle fibre ed  $f$  resistenza a compressione, che assume un valore di un terzo di quello del calcestruzzo e paragonabile a quello dell'acciaio. Questi valori danno un'idea generale delle potenzialità e delle problematiche che assumeranno le verifiche per il legno, paragonabili a quelle per l'acciaio. Il legno infatti ha le stesse problematiche dell'acciaio nei riguardi delle deformazioni e della stabilità, aspetti che devono essere quindi sempre tenuti sotto controllo.

I valori ricavati per il legno netto (piccoli campioni ricavati appositamente senza difetti) sono molto diversi da quelli per il legno strutturale, dovendo tener conto

della distribuzione dei nodi all'interno dell'elemento, della forte influenza dell'umidità su resistenza e deformazioni, della velocità di applicazione dei carichi e della loro periodicità, aspetti che devono essere attentamente valutati.

Tabella 3.1: la tabella mostra il rapporto fra  $f$  (resistenza a compressione) e  $\rho$  (massa volumica) ed il rapporto fra  $E$  (modulo elastico) e  $f$ .

<b>Materiale</b>	$f/\rho$	$E/f$
Legno netto	~ 180	~ 147
Legno massiccio (C24)	~ 63	~ 480
Legno lamellare (GL36)	~ 70	~ 400
Acciaio	~ 55	~ 480
Calcestruzzo	~ 10	~ 1200

Le costruzioni in legno, nonostante l'opinione comune, godono di una buona resistenza al fuoco. Il legno è un materiale combustibile, ma brucia lentamente e con una velocità nota, creando una superficie carbonizzata, sotto la quale il materiale incombusto rimane efficiente. Il crollo di una struttura in legno avviene per riduzione della sezione resistente in modo lento e controllato, al contrario dell'acciaio in cui il fuoco determina una perdita di resistenza rapida e difficilmente controllabile.

### 3.1.1 Legno massiccio

Gli elementi strutturali di legno massiccio a sezione rettangolare vengono classificati in base alla resistenza come indicato nella norma UNI EN 14081. Ad essi viene assegnata una classe di resistenza mediante classificazione "a vista" in funzione dei difetti, oppure "a macchina" in funzione della densità e del modulo elastico rilevati.

Le classi di resistenza per legni di conifera e di pioppo sono indicate con la lettera "C", mentre le classi di resistenza per legno di latifoglie sono indicate con la lettera "D", entrambe seguite dal numero indicante la classe cui appartengono.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> In accordo con la normativa UNI-EN 338.



### 3.1.2 Legno lamellare incollato

Il legno lamellare incollato deve essere prodotto secondo la norma UNI EN 14080. L'assegnazione delle classi di resistenza può essere effettuata in base alle proprietà delle lamelle componenti o in base alle prove sperimentali.<sup>2</sup>

Le classi di resistenza per il legno lamellare di conifera sono indicate dalla sigla "GL", seguita dal numero indicante la classe cui appartengono.

Questo tipo di elementi sono composti da lamelle incollate con la fibratura posta in parallelo. Se tutte le lamelle appartengono alla stessa categoria, il legno lamellare viene definito *omogeneo*, in caso contrario si definisce *combinato*.

Il legno lamellare incollato ha il vantaggio di poter superare le limitazioni dimensionali e di forma del legno massiccio. Inoltre il legno lamellare è costituito da frazioni di legno di conifera, che rende possibile una selezione degli elementi e quindi una riduzione dei difetti presenti naturalmente nel legno, rispetto al legno massiccio.

### 3.1.3 Pannelli a tavole incrociate tipo X-LAM

Una delle soluzioni più interessanti degli ultimi anni nel campo del legno strutturale è costituita dal "compensato di tavole"<sup>3</sup>, un elemento piano costituito da strati di tavole incrociati e incollati, a formare una lastra piena dotata di stabilità dimensionale.

Sono stati utilizzati per anni in assenza di normative specifiche, rifacendosi alle disposizioni per prodotti di carattere innovativo<sup>4</sup>, consentendo ai produttori la marcatura CE dei propri prodotti tramite ETA.

Vengono inseriti nelle NTC 2018 con la dicitura "pannelli di tavole incollate a strati incrociati".

Parallelamente a questi prodotti si sono sviluppati anche sistemi costruttivi diversi, definiti da singole aziende.

Uno dei più noti è il SOFIE (sistema costruttivo Fiemme) che si è posto l'obiettivo di definire le prestazioni e potenzialità di questo sistema costruttivo, caratterizzato da elevate prestazioni meccaniche, basso consumo energetico, ottimi livelli di sicurezza al fuoco e al sisma, confort acustico e durabilità.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> In accordo con la norma UNI-EN 1194

<sup>3</sup> Zan Bruno, (2015). *Calcolo e verifica delle strutture di legno: Travi, solai, pareti, collegamenti e resistenza al fuoco*, Palermo, Flaccovio Editore

<sup>4</sup> Come da disposizioni del p.to C del § 11.1 delle NTC 2008

Rispetto al legno massiccio, i pannelli di questo tipo possono raggiungere dimensioni relativamente grandi e variabili, possono lavorare come piastre (per carichi paralleli al piano del pannello) e come lastre (per carichi perpendicolari al piano del pannello), hanno una minore variabilità delle proprietà meccaniche, dovute alla selezione del materiale, come per il legno lamellare incollato.

Essendo commercializzati da diversi produttori si trovano spesso differenze sostanziali tra i vari prodotti. Esistono in commercio pannelli dotati di omologazione e certificazione del materiale per uso strutturale, da cui ricavare il profilo resistente dell'elemento, ma anche pannelli da cui queste grandezze dovranno essere ricavate, per il pannello, dal profilo del legno massiccio utilizzato ed in questo caso le verifiche dovranno essere condotte come elemento di legno massiccio confezionato a strati in modo non omogeneo.

## 3.2 PROPRIETÀ DEL LEGNO STRUTTURALE

In questo paragrafo seguiremo le verifiche indicate nelle NTC 2008.

### 3.2.1 Classi di servizio

Per poter desumere i valori di calcolo del legno, a partire dai valori caratteristici, gli elementi devono essere assegnati ad una delle tre classi di servizio riportate in *Tabella 3.2*.

*Tabella 3.2: Classi di servizio per le costruzioni in legno.*

Classe di servizio	Descrizione
1	Caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente, a una temperatura di 20 °C e un'umidità dell'aria circostante che non superi il 65%, se non per poche settimane l'anno
2	Caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20 °C e un'umidità dell'aria circostante che non superi l'85%, se non per poche settimane l'anno
3	Caratterizzata da un'umidità più elevata della classe di servizio 2

Alla classe di servizio 1 appartengono generalmente gli elementi lignei protetti dalle intemperie, posti all'interno degli edifici.

Alla classe di servizio 2 appartengono generalmente gli elementi lignei protetti almeno parzialmente dalle intemperie, posti all'esterno degli edifici.

Alla classe di servizio 3 appartengono tutti gli elementi lignei che non rientrano nelle due categorie precedenti, per i quali non sono disponibili dati attendibili o generalmente per quelli esposti alle intemperie.

### 3.2.2 Proprietà meccaniche di calcolo

Il legno è un materiale dallo spiccato comportamento igroscopico: con l'aumento dell'umidità esterna l'acqua penetra al suo interno, indebolendo i legami della parete cellulare. All'aumento dell'umidità del legno si riducono quindi i valori di resistenza.

Le proprietà di riferimento si basano su valori di umidità del legno del 12%.

Anche la durata del carico ha influenza sulla resistenza del legno, a causa del comportamento viscoso del materiale.

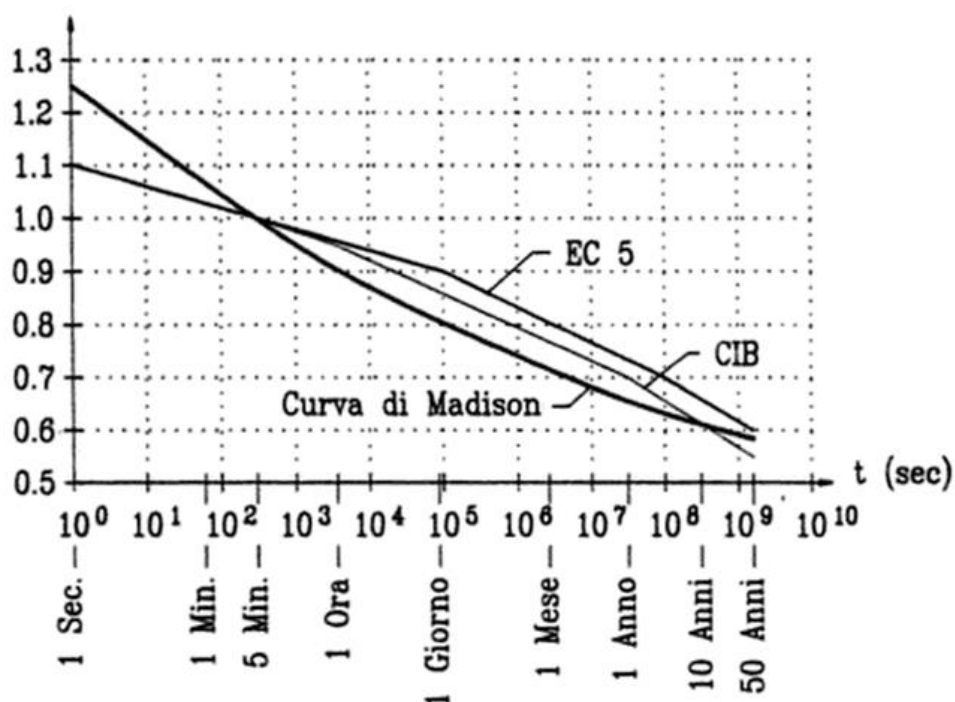


Immagine 3.1: Curva di Madison che indica la relazione tra tensione di rottura a flessione e tempo.

Nel caso di azioni permanenti le attuali normative indicano di adottare valori ridotti a circa il 60% dei valori ricavati da prove sperimentali in laboratorio. Il fattore 0,6 deriva da prove effettuate nel 1950 presso il Forest Products Laboratory di Madison della durata di sette anni. Questi risultati si dimostrano ancora attuali ed applicabili anche ad altri tipi di sollecitazioni.

Tabella 3.3: Valori del coefficiente correttivo della resistenza  $k_{mod}$

Materiale	Classe di servizio	Classe di durata del carico				
		Permanente	Lunga	Media	Breve	Istantanea
Legno massiccio,	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Legno lamellare incollato (Pannelli tipo XLAM)	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

In Tabella 3.3 sono riportati i valori del coefficiente correttivo  $k_{mod}$  da utilizzare nel calcolo delle proprietà meccaniche di design  $X_d$  a partire dal valore caratteristico  $X_k$ , che tiene conto dei valori di umidità e di durata del carico. I valori di  $\gamma_M$  (coefficiente parziale di sicurezza) sono riportati in Tabella x.4.

$$X_d = \frac{k_{mod} X_k}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

Tabella 3.4: Coefficienti parziali di sicurezza

Stati limite ultimi - S.L.U.		$\gamma_M$
Combinazioni fondamentali	Legno massiccio (pannelli XLAM)	1,50
	Legno lamellare	1,45
	Unioni	1,50
Combinazioni eccezionali		1,00

Nel corso degli anni i coefficienti hanno assunto valori molto diversi da quelli riportati. Per il legno massiccio e lamellare le NTC 2005 indicavano il valore  $\gamma_M=1,35$  mentre la norma UNI CNR 206/2007 indica per il legno massiccio il valore di  $\gamma_M=1,30$  e per il legno lamellare di  $\gamma_M=1,25$ , così come la normativa a livello europeo.<sup>5</sup>

### 3.3 RESISTENZE DI CALCOLO

Effettuando una prova a trazione compressione su di un provino di legno netto parallelamente alle fibre, si può notare che la rottura a trazione avviene per un valore tra due e tre volte superiore alla rottura a compressione. La rottura a trazione è però di tipo fragile per sfilamento delle fibre, mentre quella a compressione avviene in modo duttile per instabilità delle fibre.<sup>3</sup>

Essendo il legno un materiale anisotropo è necessario individuare diverse resistenze in base al tipo di sollecitazione, a seconda della direzione delle tensioni rispetto alla fibratura:

- $f_{m,k}$  resistenza caratteristica a flessione
- $f_{t,0,k}$  resistenza caratteristica a trazione parallela alla fibratura
- $f_{t,90,k}$  resistenza caratteristica a trazione perpendicolare alla fibratura
- $f_{c,0,k}$  resistenza caratteristica a compressione parallela alla fibratura
- $f_{c,90,k}$  resistenza a compressione perpendicolare alla fibratura
- $f_{v,k}$  resistenza caratteristica a taglio.

<sup>5</sup> Come indicato nella Tabella 2.3 del § 2.4.1 dell'EC5 – CEN EN 1995-1

Le resistenze di calcolo sono definite dalla relazione:

$$f_d = \frac{k_{mod} f_k}{\gamma_M} \quad (3.2)$$

### 3.4 PRINCIPALI<sup>6</sup> VERIFICHE DI RESISTENZA AGLI STATI LIMITE ULTIMI

A differenza dell'acciaio e del calcestruzzo armato, le verifiche di resistenza per il legno vanno eseguite con riferimento alle tensioni unitarie e non alle sollecitazioni sull'intera sezione.

Il modello di calcolo prevede il mantenimento delle sezioni piane e la linearità tra tensioni e deformazioni fino a rottura.

#### *Trazione parallela alle fibre*

Il legno privo di divetti presenta un'elevata resistenza a trazione, dovuta alla forma allungata delle fibre legnose, con comportamento lineare fino alla rottura di tipo fragile. Tuttavia, il legno strutturale, risulta fortemente condizionato dalla presenza di nodi e difetti, quindi si dovrà individuare la tensione a rottura, determinata da prove sperimentali su legno strutturale, con lato maggiore della sezione trasversale pari a 150 mm per il legno massiccio e 600 mm per il legno lamellare.<sup>7</sup>

I valori di resistenza caratteristica a trazione  $f_{t,0,k}$  nel caso di sezioni con dimensione minore di quelle del provino possono essere incrementati mediante il coefficiente moltiplicativo  $k_h$  così definito:

- elementi di legno massiccio, sottoposti a trazione parallela alla fibratura che presentino il lato maggiore  $h$  della sezione trasversale inferiore a 150 mm:

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{150}{h} \right)^{0,2} ; 1,3 \right\} \quad (3.3)$$

- elementi di legno massiccio, sottoposti a trazione parallela alla fibratura che presentino il lato maggiore  $h$  della sezione trasversale inferiore a 600 mm:

---

<sup>6</sup> Verranno espone le verifiche di resistenza principali. Le verifiche secondarie verranno introdotte nel testo se necessario. Per tutte le verifiche secondarie si rimanda al documento CNR-DT 206/2007

<sup>7</sup> Come indicato al § 11.7.1.1 delle NTC 2008

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{600}{h} \right)^{0,1} ; 1,1 \right\} \quad (3.4)$$

Per la verifica a trazione parallela alla fibratura di un elemento strutturale deve essere verificata la seguente relazione:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (3.5)$$

con tensione di calcolo a trazione parallela alla fibratura:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} \quad (3.6)$$

dove

- $N_{Ed}$  trazione di calcolo sollecitante con asse parallelo alla fibratura
- $A$  area perpendicolare all'asse di sollecitazione.

La resistenza di calcolo a trazione parallela alla fibratura:

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \frac{k_h f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.7)$$

In un elemento strutturale sollecitato a trazione è raro che si giunga al collasso per rottura delle fibre a trazione, in quanto solitamente è preceduto dal cedimento in corrispondenza dei collegamenti, in cui troviamo una riduzione della sezione resistente per la presenza di fori.

#### *Trazione perpendicolare alle fibre*

Le NTC 2008 per la trazione perpendicolare alle fibre non indicano verifiche precise, ma solo di fare riferimento a normative di comprovata validità.

Questo tipo di sollecitazione è la più pericolosa per il legno, in quanto porta a rottura di tipo fragile e i valori di resistenza sono i più bassi.

La verifica da utilizzare è la seguente:

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{vol} f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (3.8)$$

in cui  $\sigma_{t,90,d}$  è la tensione di calcolo a trazione perpendicolare alla fibratura, e  $f_{t,90,d}$  è la resistenza di calcolo a trazione perpendicolare alla fibratura, calcolate rispettivamente come le equazioni al punto (x.6) e (x.7) ma nella direzione indicata. Effettuando prove di trazione perpendicolare alle fibre, si è notato che esiste una dipendenza della resistenza a questo tipo di sollecitazione con il volume. Questo è

giustificato dal fatto che ad un maggior volume sollecitato corrisponde una maggiore probabilità di presenza di difetti, che innescano questo tipo di rottura. Il coefficiente  $k_{vol}$  riduce la resistenza a trazione in funzione del maggior volume sollecitato:

$$k_{vol} = (V_0/V)^{0,2} \leq 1 \quad (3.9)$$

in cui  $V_0$  è il volume di riferimento, pari a 0,01 m<sup>3</sup> e  $V$  il volume uniformemente sollecitato, espresso in m<sup>3</sup>.

#### *Compressione parallela alla fibratura*

La verifica a compressione parallela alla fibratura, per elementi tozzi non soggetti ad instabilità è soddisfatta dalla relazione:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (3.10)$$

in cui:

- $\sigma_{c,0,d}$  è la tensione di calcolo a compressione parallela alla fibratura
- $f_{c,0,d}$  è la resistenza di calcolo a compressione parallela alla fibratura che risulta essere:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.11)$$

#### *Compressione perpendicolare alla fibratura*

I meccanismi resistenti in questo tipo di sollecitazione sono la resistenza delle fibre allo schiacciamento laterale e l'effetto di confinamento, dovuto alla presenza di superfici laterali non sollecitate nella zona adiacente alla zona di applicazione del carico. I valori di resistenza per questo tipo di sollecitazione risultano essere circa un quinto di quelli a compressione parallela alla fibratura.

La verifica di resistenza per compressione perpendicolare alla fibratura si intende soddisfatta se:

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} \leq 1 \quad (3.12)$$

in cui  $f_{c,90,d}$  è calcolato come al punto (x.11) ma nella direzione indicata, mentre  $\sigma_{c,90,d}$  viene calcolato se necessario tenendo conto dell'effetto di confinamento in questo modo:



$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot l_{ef}} \quad (3.13)$$

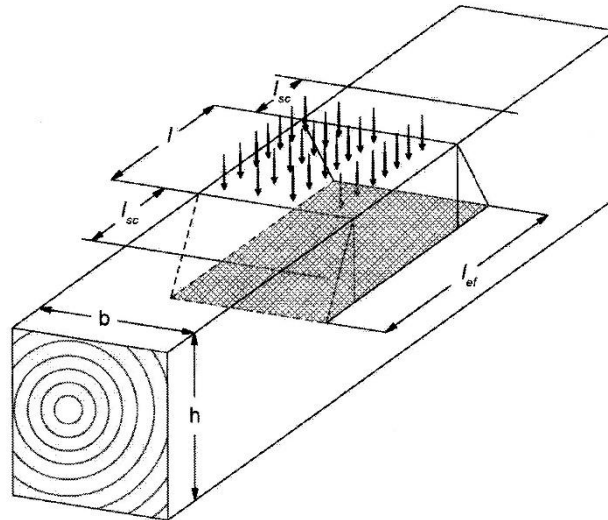


Immagine 3.2: rappresentazione di  $l_{ef}$  per l'effetto di confinamento.

in cui  $l_{ef}$  rappresenta la lunghezza efficace di carico.<sup>8</sup>

### Flessione

Devono essere soddisfatte entrambe le seguenti condizioni:

$$\frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (3.14)$$

le cui grandezze sono così definite:

- coefficiente di redistribuzione delle tensioni e disomogeneità del materiale:  
 $k_m$  0,7 per sezioni trasversali rettangolari  
 $k_m$  1,0 per altre sezioni trasversali
- tensioni di calcolo a flessione, ricavate dalle relazioni di Navier:

$$\sigma_{m,x,d} = \frac{M_{x,d}}{W_x} \quad \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} \quad (3.15)$$

- resistenze di calcolo a flessione le cui grandezze sono definite come l'equazione (3.7):

$$f_{m,x,d} = k_{mod} \frac{k_{h,x} f_{m,x,k}}{\gamma_M} \quad f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{k_{h,y} f_{m,y,k}}{\gamma_M} \quad (3.16)$$

<sup>8</sup> Per la trattazione di questo coefficiente si rimanda al § 6.5.1.6 della norma CNR-DT 206/2007

*Tensoflessione*

Per la verifica di resistenza nel caso di sforzo normale di trazione accompagnato da sollecitazione attorno ai due assi principali dell'elemento devono essere verificate entrambe le seguenti condizioni, il cui significato delle grandezze è esposto nei paragrafi precedenti:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (3.17)$$

*Pressoflessione*

Per la verifica di resistenza nel caso di sforzo normale di compressione accompagnato da sollecitazione attorno ai due assi principali dell'elemento devono essere verificate entrambe le seguenti condizioni, il cui significato delle grandezze è esposto nei paragrafi precedenti:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (3.18)$$

È interessante notare che nella verifica a pressoflessione la componente riguardante la sollecitazione di compressione è elevata al quadrato, mentre nella verifica a tensoflessione risulta essere al primo grado.

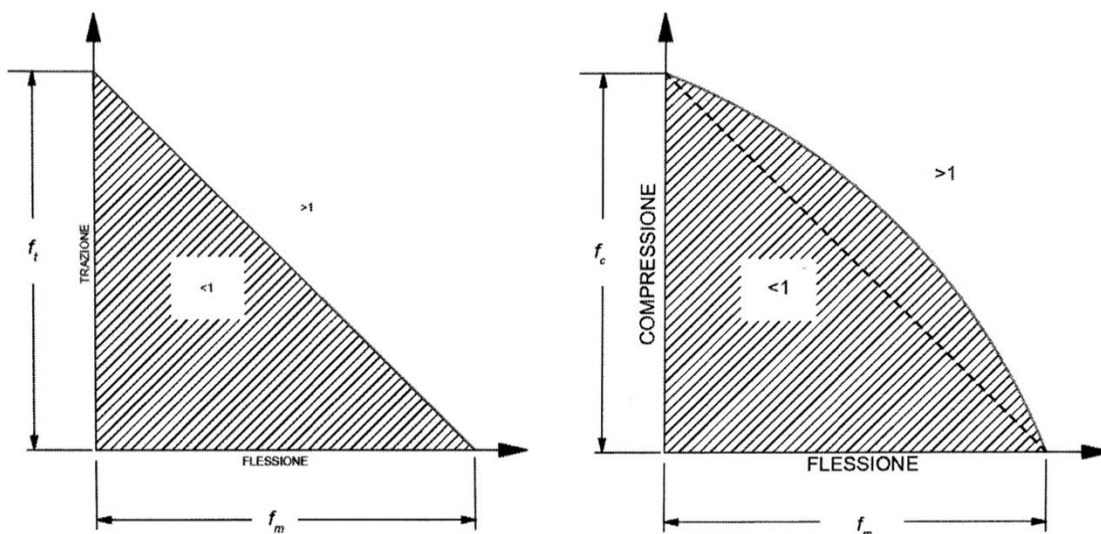


Immagine 3.3: confronto fra i domini di resistenza per tensoflessione (sinistra) e pressoflessione (destra).

Ciò definisce l'estensione oltre la retta tratteggiata del dominio di resistenza, in quanto la sollecitazione di compressione, relativamente alla resistenza, risulta

essere meno pericolosa della sollecitazione di trazione, in quanto non risente della riduzione della resistenza dovuta alla presenza dei nodi.

### Taglio

La resistenza a taglio per uso strutturale risulta ridotta rispetto al legno netto, a causa delle fessure presenti. La presenza di nodi risulta essere invece un elemento di rinforzo, venendosi a costituire una specie di legame che si oppone allo scorrimento dei vari strati.<sup>3</sup>

La verifica a taglio deve soddisfare la seguente condizione:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (3.19)$$

in cui:

- $f_{v,d}$  corrispondente alla resistenza di calcolo a taglio così definita:

$$f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (3.20)$$

- $\tau_d$  tensione tangenziale di calcolo, valutata secondo la teoria di Jourawaski:

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S_x}{J \cdot b} \quad (3.21)$$

dove:

- $V_d$  forza di taglio
- $S_x$  momento statico della parte di sezione considerata
- $J$  momento d'inerzia baricentrico
- $B$  larghezza della sezione

La massima tensione a taglio per una sezione rettangolare risulta quindi essere:

$$\tau_{d,max} = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot b \cdot h} \quad (3.22)$$

### 3.5 PRINCIPALI<sup>9</sup> VERIFICHE DI STABILITÀ

#### *Elementi compressi*

Nel caso di asta soggetta a solo sforzo normale deve essere verificata la seguente relazione:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{crit,c} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (3.23)$$

dove  $k_{crit,c}$  rappresenta il coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità di colonna, valutato nel piano in cui assume valore minimo. Viene calcolato in funzione della snellezza relativa di  $\lambda_{rel,c}$  colonna che vale:

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}} \quad (3.24)$$

in cui  $\lambda$  è la snellezza dell'elemento strutturale, valutata nel piano in cui assume valore minimo.

Se  $\lambda_{rel,c} \leq 0,3$  si pone  $k_{crit,c} = 1$  altrimenti:

$$k_{crit,c} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} \quad \text{con } k = 0,5 \cdot (1 + \beta_0 \cdot (\lambda_{rel,c} - 0,3)) + \lambda_{rel,c}^2 \quad (3.25)$$

Il coefficiente di imperfezione  $\beta_0$  vale 0,2 per il legno massiccio e 0,1 per il legno lamellare, se gli elementi rientrano nei limiti di rettilineità.<sup>10</sup>

#### *Elementi pressoinflessi*

Per la verifica alle travi pressoinflesse con flessione agente in un solo piano vale la seguente condizione:<sup>11</sup>

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{crit,c} f_{c,0,d}} + \left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,c} f_{m,y,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (3.26)$$

<sup>9</sup> Verranno espone le verifiche di instabilità principali. Le verifiche secondarie verranno introdotte nel testo se necessario. Per tutte le verifiche secondarie si rimanda al documento CNR-DT 206/2007

<sup>10</sup> Definiti al § 3.1.5 del CNR-DT 206/2007

<sup>11</sup> I coefficienti sono definiti per esteso al § 6.5.2.3 del CNR-DT 206/2007

È interessante notare come la componente riguardante la flessione sia elevata al quadrato in quanto, nella sovrapposizione degli effetti, è ritenuta più pericolosa la componente riguardante l'instabilità di colonna.

### 3.6 PRINCIPALI VERIFICHE DEI PANNELLI A TAVOLE INCROCIATE TIPO X-LAM

Nelle verifiche dei pannelli X-LAM deve essere tenuto conto della struttura a strati dell'elemento, considerando quindi i valori efficaci delle aree e dei momenti d'inerzia delle sezioni trasversali.

#### *Flessione nei pannelli di solaio*

La composizione a strati del pannello, disposti ortogonalmente fra di loro, impone la valutazione del momento d'inerzia nella direzione longitudinale o trasversale al pannello.

La direzione *longitudinale* è la direzione della fibratura delle tavole esterne che compongono il pannello.

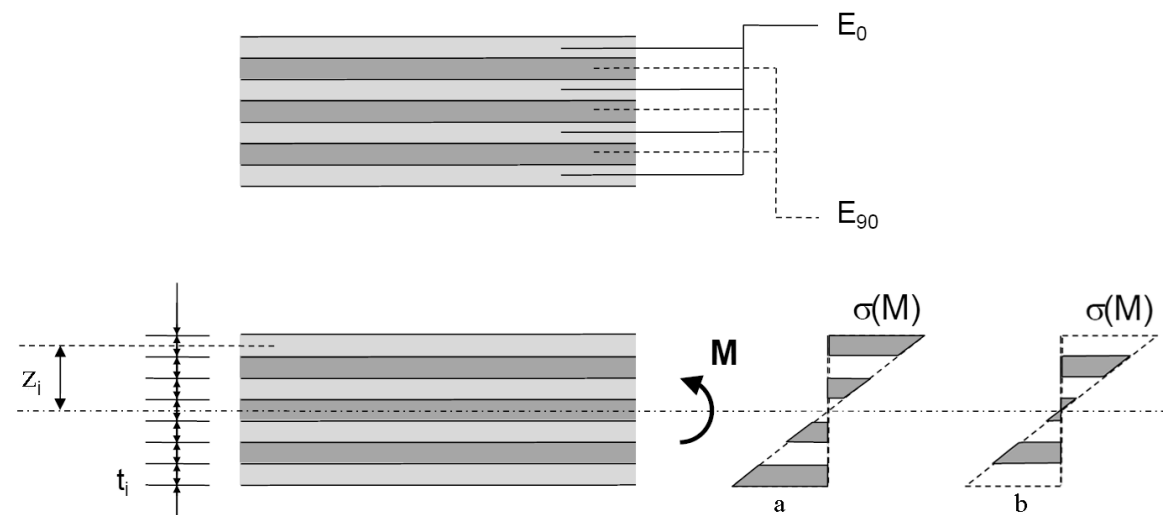


Immagine 3.4: Tensioni di flessione secondo le due direzioni: "a" longitudinale, "b" trasversale<sup>12</sup>.

Il calcolo della rigidezza flessionale deve quindi considerare la grande differenza tra i moduli elastici  $E_{90}$  ed  $E_0$ , caratterizzati da un rapporto  $E_{90}/E_0 \approx 1/30$ , che permetterebbe quindi di trascurare gli strati disposti trasversalmente.

Volendo conteggiare tutti gli strati di larghezza  $b$ , attraverso l'impiego di un coefficiente di omogeneizzazione dello strato  $i$ -esimo  $n_i = E_i/E_0$  la rigidezza flessionale della sezione risulta:

$$K_{xlam} = E_0 \cdot J_{xlam} = E_0 \cdot b \cdot \sum \left[ n_i \left( \frac{t_i^3}{12} + t_i \cdot z_i^2 \right) \right] \quad (3.27)$$

La massima tensione per flessione lungo una direzione viene calcolata attraverso la relazione di Navier:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{K_{xlam}} \cdot \frac{h_{eff}}{2} \cdot E_0 \quad (3.28)$$

in cui

- $M_d$  momento flettente di calcolo
- $h_{eff}$  spessore efficace del pannello per sezione inflessa

#### *Verifica di resistenza a flessione*

La verifica avviene utilizzando la forma già vista:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,xlam,d}} \leq 1 \quad (3.29)$$

In caso di flessione biassiale, le due direzioni vanno studiate e verificate separatamente.

La resistenza di calcolo a flessione per il pannello X-LAM si calcola nella forma già vista per l'equazione (3.2), in cui la resistenza caratteristica a flessione del pannello X-LAM  $f_{m,xlam,k}$  è:

$$f_{m,xlam,k} = k_s \cdot f_{m,k} \quad (3.30)$$

in cui

- $f_{m,k}$  resistenza caratteristica a flessione del legno massiccio delle tavole
- $k_s$  coefficiente di sistema per la resistenza a flessione del pannello.  
Il coefficiente  $k_s$  consente di aumentare la resistenza di un elemento strutturale composto da più elementi sollecitati in parallelo, incrementando le resistenze a flessione, a causa di una ridotta incidenza dei nodi sulla resistenza<sup>3</sup> e di una redistribuzione delle tensioni sui componenti più resistenti.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> Bernasconi, Andrea (2011). *Il calcolo dell'XLAM Basi, normative, progettazione, applicazione*. Web 11/01/2018. Accessibile a < <http://www.promolegno.com/tecnologia/statica-calcolo> >.

*Taglio nei pannelli di solaio*

Nella verifica a taglio dei pannelli di solaio non è possibile trascurare le tensioni degli strati con fibratura trasversale, in quanto essi sono essenziali per la trasmissione della sollecitazione di taglio fra gli strati disposti parallelamente.

Il calcolo della distribuzione delle tensioni di taglio è dato dalla legge di variabilità di Jourawski:

$$\tau_d = \frac{V_d S_{xlam}}{J_{xlam} \cdot b} \quad (3.31)$$

in cui

- $V_d$  forza di taglio di calcolo
- $b$  larghezza della sezione
- $S_{xlam}$  momento statico di parte della sezione calcolato analogamente alle grandezze viste per l'equazione (x.27):

$$S_{xlam} = b \cdot \sum n_i \cdot t_i \cdot z_i \quad (3.32)$$

Le sollecitazioni a taglio negli strati longitudinali sono contrastati dalla resistenza a taglio del legno  $f_{v,k}$  mentre negli strati trasversali la resistenza a taglio contrasta il meccanismo di collasso per il quale le tensioni principali a 45° innescano una sorta di rotazione delle fibre.<sup>3</sup>

In questo caso si parla di *rolling shear* (taglio per rotolamento delle fibre) e si assume una resistenza pari al doppio della resistenza a trazione in direzione perpendicolare alle fibre  $f_{vr,k} = 2 \cdot f_{t,90,k}$ .

*Verifica di resistenza a taglio*

La verifica a taglio deve quindi soddisfare entrambe le condizioni:

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,xlam,d}} \leq 1 \qquad \frac{\tau_{vr,d}}{f_{vr,xlam,d}} \leq 1 \quad (3.33)$$

in cui:

$$f_{v,xlam,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_s f_{v,k}}{\gamma_M} \qquad f_{vr,xlam,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_s \cdot (2 \cdot f_{t,90,k})}{\gamma_M} \quad (3.34)$$

Verifica a taglio nei pannelli di parete

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.

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.<sup>12</sup>

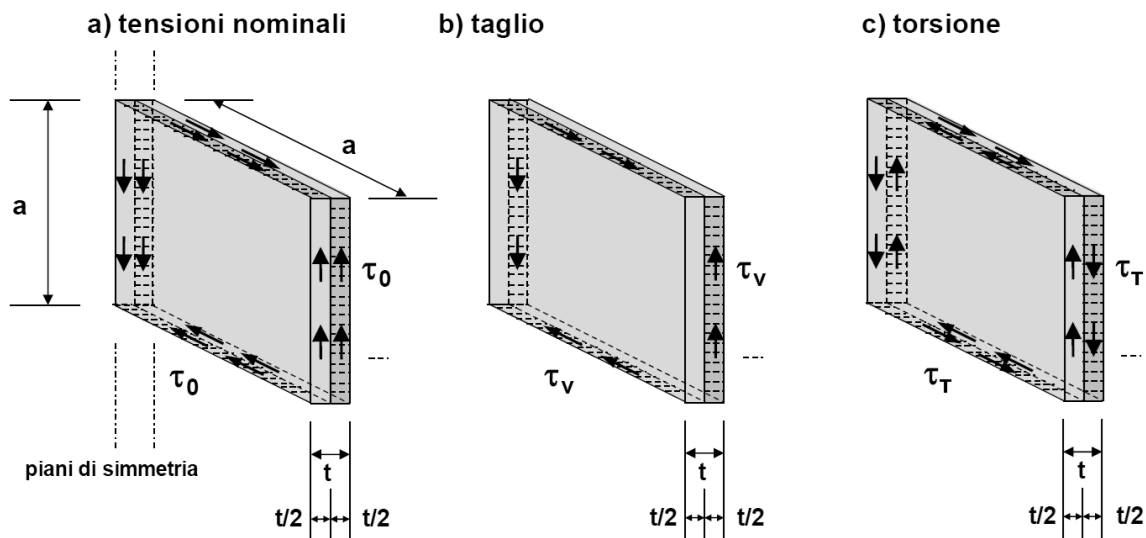


Immagine 3.5: Caso generale della sollecitazione a taglio

La tensione nominale di taglio per l'elemento ideale e monolitico di spessore  $t$  e larghezza  $a$  risulta:

$$\tau_0 = \frac{V_{x,y}}{t \cdot a} \quad (3.35)$$

Sovrapponendo i casi b) e c) si ricavano le tensioni e i meccanismi di resistenza per il pannello reale a due strati:

- Taglio: la tensione a taglio  $\tau_V$  e lo sforzo di taglio  $V_{x,y}$  risultano:

$$\tau_V = \frac{V_{x,y}}{t/2 \cdot a} \quad V_{x,y} = \tau_V \cdot \frac{t}{2} \cdot a = \tau_0 \cdot t \cdot a \quad (3.36)$$

- Torsione: il momento torcente  $M_T$  e la tensione a torsione  $\tau_T$  risultano:



$$\tau_T = \frac{M_T}{W_p} = \frac{\tau_0 \cdot t \cdot a^2}{a^3/3} = 3 \cdot \tau_0 \cdot \frac{t}{a} \quad M_T = V_{x,y} \cdot a = \tau_0 \cdot t \cdot a^2 \quad (3.37)$$

Il pannello non è però composto da elementi ideali, ma da elementi reali con un numero finito di strati e in cui i piani di simmetria indicati nell'*Immagine 3.5* non sono sempre presenti.

Come riferimento per la definizione degli spessori possono essere utilizzate le superfici incollate.

Gli spessori dei singoli strati devono essere trasformati in spessori ideali  $t^*$  che serviranno da base per il calcolo delle tensioni di taglio e torsione effettive.<sup>12</sup>

Gli spessori ideali sono così definiti 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;
- per gli strati interni: il valore minimo degli spessori degli strati adiacenti alla superficie incollata considerata.

Lo spessore ideale totale della lastra sarà:

$$t_{tot}^* = \sum_1^n t_i^* \quad (3.38)$$

La tensione di taglio ideale di riferimento calcolata sullo spessore ideale del pannello risultano:<sup>3</sup>

$$t_0^* = \frac{V_{x,y}}{a \cdot t_{tot}^*} \quad (3.39)$$

Si possono quindi eseguire le verifiche di resistenza per il pannello X-LAM per i due meccanismi utilizzando le tensioni definite nel modello ideale a due strati:<sup>3</sup>

- Verifica a taglio:

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,xlam,d}} = \frac{2 \cdot \tau_0^*}{f_{v,xlam,d}} \leq 1 \quad (3.40)$$

In cui  $f_{v,xlam,d} = f_{v,0,k} \cdot k_s$  con il coefficiente di sistema definito come per l'equazione (x.30)

- Verifica a torsione:

$$\frac{\tau_{T,d}}{f_{T,xlam,d}} = \frac{3 \cdot \tau_0^* \cdot t_{tot}^*/a}{f_{T,xlam,d}} \leq 1 \quad (3.41)$$

In cui  $f_{T,xlam,d}$  resistenza a torsione, il cui valore caratteristico è spesso indicato nelle omologazioni dei vari prodotti come  $f_{T,xlam,d} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ .

Il modello qui esposto, risultato dalla ricerca scientifica condotta presso il Politecnico di Granz, è coerente con le ipotesi di base di comportamento del materiale e può quindi essere utilizzato in assenza di omologazioni specifiche. Per i prodotti X-LAM dotati di omologazione si dovrà fare riferimento alla indicazioni riportate nelle distinte tecniche.<sup>3</sup>

#### *Forze assiali nei pannelli di parete*

Considerando la differenza fra i moduli E degli strati orientati ortogonalmente fra loro, è possibile trascurare gli strati trasversali ed eseguire il calcolo considerando solo gli strati disposti lungo la direzione delle sollecitazioni.

Tuttavia volendo considerare tutti gli strati, in modo analogo a quanto fatto per l'equazione (x.27), la superficie della sezione omogeneizzata risulta:

$$A_{xlam} = \sum n_i A_i = b \cdot \sum \frac{E_i}{E_0} \cdot t_i \quad (3.42)$$

Le verifiche per forze assiali di compressione e di trazione rispettivamente sono:

$$\frac{\sigma_{c,d}}{f_{c,xlam,d}} \leq 1 \qquad \frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,xlam,d}} \leq 1 \quad (3.43)$$

#### *Stabilità nei pannelli di parete*

In caso di forze di compressione sollecitanti il pannello di parete lungo il proprio piano, si può verificare instabilità per sbandamento laterale. Inoltre in caso di carichi trasversali, il momento flettente sollecitante la parete aumenta il rischio di sbandamento.

Le verifiche sono della stessa forma di quelle viste per l'elemento omogeneo al punto (x.26), riviste inserendo le grandezze proprie dei pannelli X-LAM.

$$\frac{\sigma_{c,d}}{k_{crit,c} \cdot f_{c,xlam,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,xlam,d}} \leq 1 \quad (3.44)$$

in cui le grandezze sono quelle introdotte ai punti precedenti.

---

## IL SISTEMA X-RAD

---

X-Rad è un nuovo sistema di connessione completo per tutte le tipologie di costruzioni in CLT. Si compone di tre elementi: X-One, X-Plate e X-Seal.

Progettato per semplificare le operazioni in cantiere e per sfruttare al meglio le risorse meccaniche del CLT<sup>1</sup>.

Le informazioni presenti nei seguenti paragrafi sono ricavate da materiale tecnico fornito da Rothoblaas.<sup>2</sup>

### 4.1 X-ONE

X-One è il componente principale del sistema X-Rad. Si tratta di un connettore progettato per trasferire sia sollecitazioni di taglio che di trazione, utilizzabile anche per la movimentazione dei pannelli.

---

<sup>1</sup> Brochure X-Rad Rothoblaas. Web 15/02/2017.

Accessibile a < <https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/x-rad> >

<sup>2</sup> Scheda tecnica e certificazioni. Web 15/02/2017.

Accessibile a < <https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/x-rad/x-one> >

### 4.1.1 Caratteristiche dimensionali

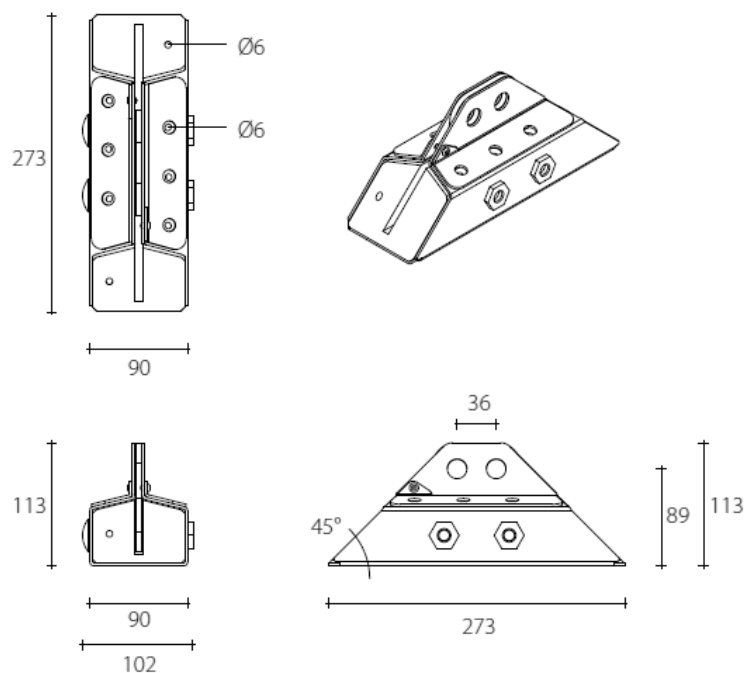


Immagine 4.1: principali dimensioni del connettore X-One (in mm).

Il connettore X-One viene fissato al pannello in CLT mediante sei viti tutto filetto del diametro di 11 mm inserite attraverso prefori orientati, per assicurare la corretta direzione di infissione.

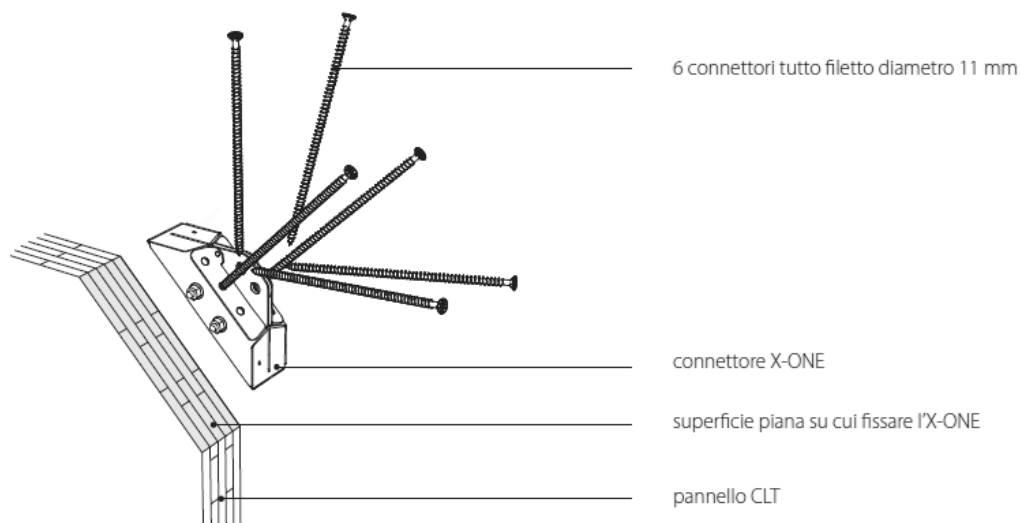


Immagine 4.2: Esploso del sistema di ancoraggio del connettore X-One.

Il taglio per il fissaggio del connettore al pannello CLT viene eseguito sempre a 45° ai vertici delle pareti ed ha una lunghezza di 360.6 mm, indipendentemente dalle dimensioni e dallo spessore del pannello.

Il suo posizionamento è centrale sia rispetto alla lunghezza del taglio che allo spessore del pannello.

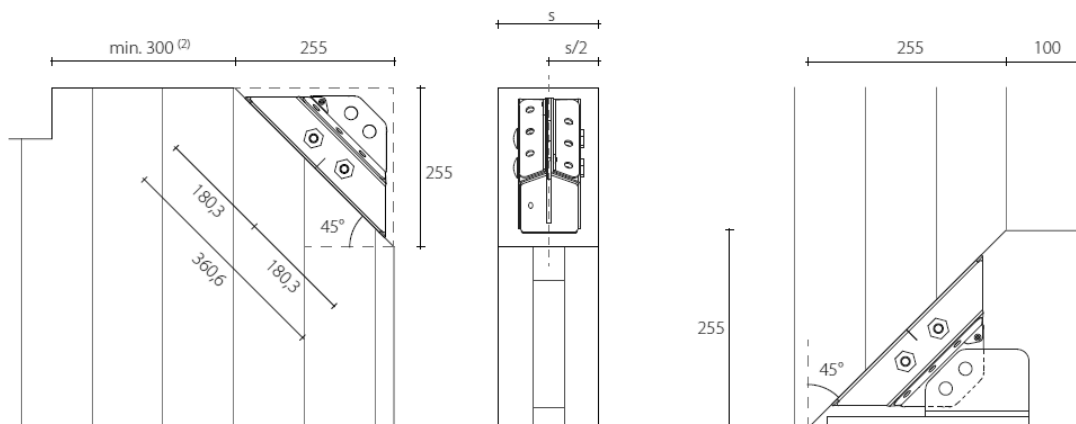


Immagine 4.3: riferimenti e dimensioni per il posizionamento del connettore (in mm).

Per l'interposizione dei pannelli di solaio viene realizzato uno specifico alloggiamento nei pannelli di parete, evitando così il problema della compressione ortogonale delle fibre. Questo consente la trasmissione diretta dei carichi verticali tra i pannelli, in zone concentrate alle loro estremità.

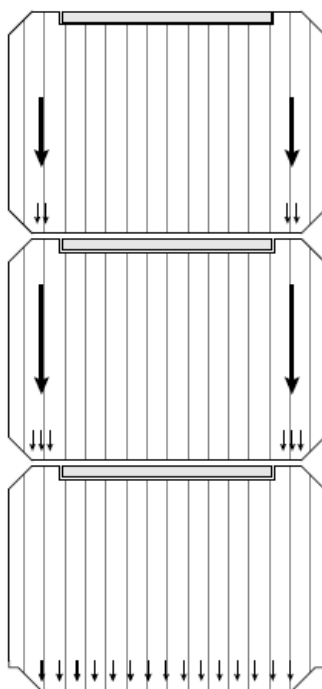


Immagine 4.4: schema di sovrapposizione di pannelli di parete.

## 4.2 X-PLATE

X-Plate è una gamma di piastre in acciaio, realizzate per permettere l'assemblaggio di pareti dotate di sistema X-Rad in cantiere.

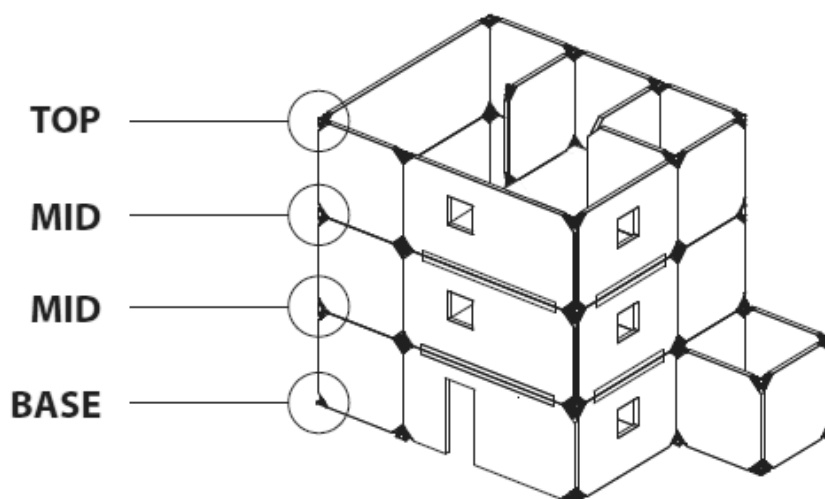
Questo componente consente il montaggio dei pannelli attraverso il solo serraggio di bulloni.

È stata prevista una gamma di piastre che consente di rispondere alle svariate esigenze di cantiere, dall'attacco a terra dei pannelli al fissaggio degli stessi in copertura.

Il sistema consente di incrementare il grado di prefabbricazione, oltre a rendere più preciso l'assemblaggio.

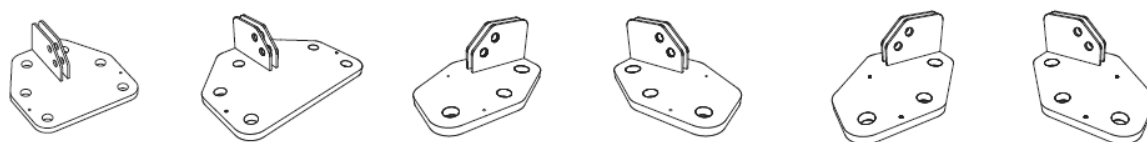
Le piastre X-Plate possono essere impiegate su pannelli con spessori compresi tra 100 mm e 200 mm.

Sono categorizzate principalmente dalla loro collocazione sul livello dell'edificio e dalla tipologia di nodo da connettere.



*Immagine 4.5: differenziazione delle piastre in base al livello di collocamento.*

Per ogni livello di impiego sono state definite delle tipologie di piastre che siano in grado di rispondere ai tipi standard di collegamenti fra pareti CLT. Per il livello Base esistono due famiglie di piastre, la prima utilizza acciaio con spessori compresi tra 100 mm e 130 mm, la seconda tra 130 mm e 200 mm.



*Immagine 4.6: Tipologie di piastre per il livello Base.*

Per quanto riguarda i nodi dei livelli Mid e Top sono previste famiglie di piastre realizzate con tre spessori standard: 100 mm, 120 mm, 140 mm, suddivise poi in base alla tipologia di nodo.

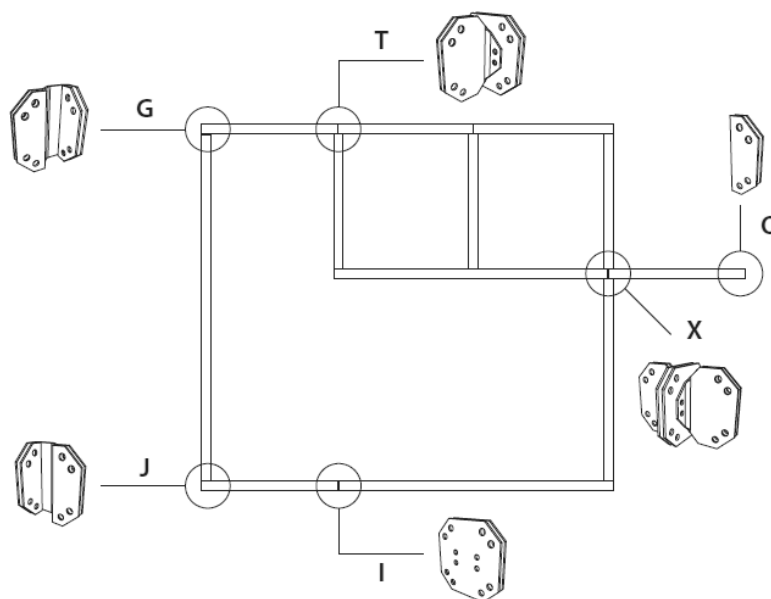


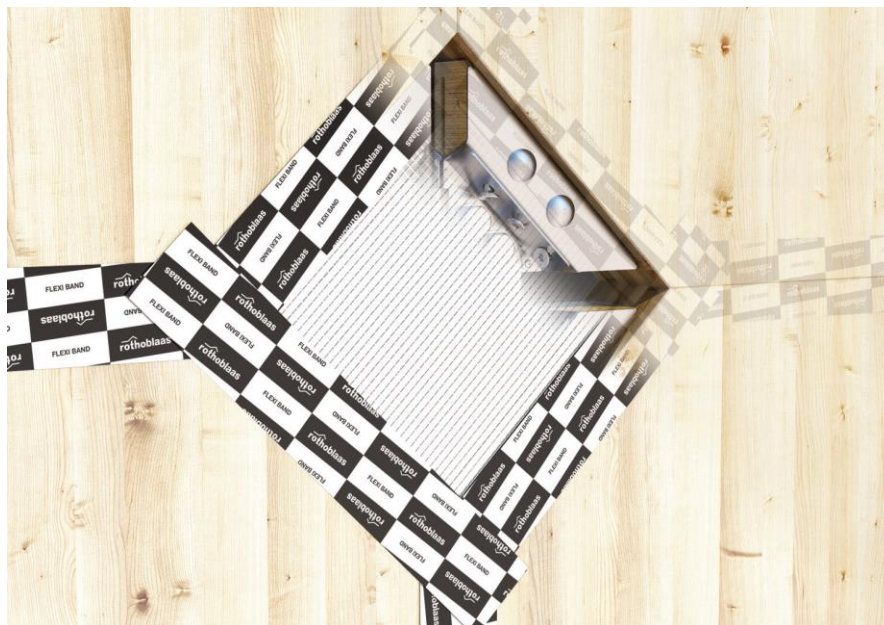
Immagine 4.7: Tipologie di piastre previste in base al nodo da collegare per i livelli Mid e Top.

A corredo del sistema esistono accessori che permettono il collegamento di pareti con spessori non standard o fra pareti con diversi spessori, in pianta ed in elevazione.

### 4.3 X-SEAL

X-Seal è un componente realizzato per garantire la tenuta all'aria ed al vento del sistema X-Rad. Si tratta di una chiusura presagomata, realizzata in lana di roccia e rivestita in alluminio, che si adatta alla morfologia dei componenti di connessione strutturale.

Il suo utilizzo in combinazione con nastri acrilici e membrane autoadesive garantisce l'ermeticità del sistema X-Rad.



*Immagine 4.8: esempio di applicazione di un componente X-Seal nel sistema X-Rad.*

Per il componente X-Seal sono state eseguite analisi per verificarne il comportamento termoigrometrico, acustico e di resistenza al fuoco.

#### **4.4 INGEGNERIA STRUTTURALE**

I contenuti esposti in questo paragrafo sono tratti dalla relazione tecnica redatta dall'azienda Rothoblaas s.r.l. allo scopo di approfondire gli aspetti strutturali del nuovo tipo di connessione. Nel documento viene esposto un criterio di verifica del dispositivo X-One e delle viti tutto filetto che lo collegano al pannello CLT, ricavato a partire da varie prove di laboratorio ed analisi agli elementi finiti.

Le prestazioni e caratteristiche riportate sono altresì contenute nella Valutazione Tecnica Europea ETA-15/0632.

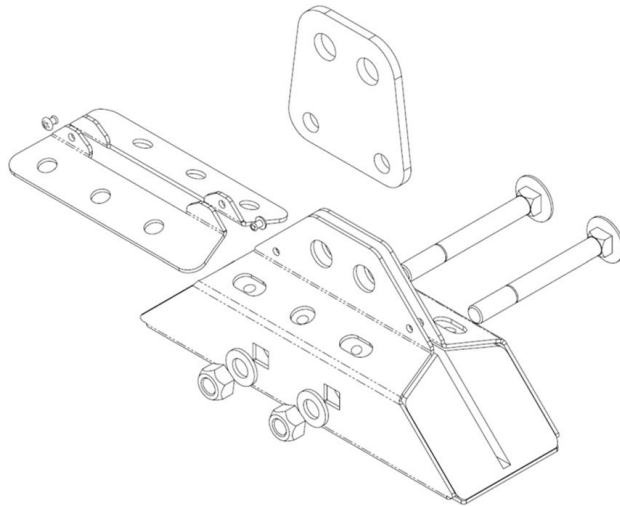
##### **4.4.1 Componenti elementari**

Il sistema di connessione X-Rad è composto da tre elementi principali:

- Il connettore X-One, composto dai seguenti elementi:
  - un box esterno che contiene l'inserto in legno, costituito da una lamiera piegata sollecitata principalmente a rifollamento in corrispondenza dei bulloni di collegamento alla piastra interna;

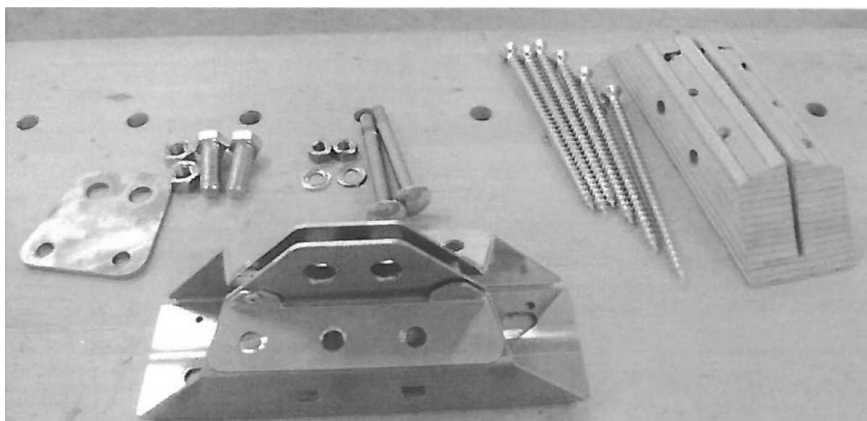


- un inserto in legno LVL sollecitato per compressione ortogonale alle fibre ed a rifollamento dai bulloni di collegamento interni;
- una piastra di rinforzo interna, collegata al box esterno mediante bulloni;
- due bulloni  $\Phi$  (diametro) 12 mm che collegano la piastra interna all'inserto il legno LVL, creando una connessione legno-acciaio-legno;
- due piastre di rinforzo, inserite in corrispondenza dei punti di infissione delle viti tutto filetto;



*Immagine 4.9: esploso del connettore X-One.*

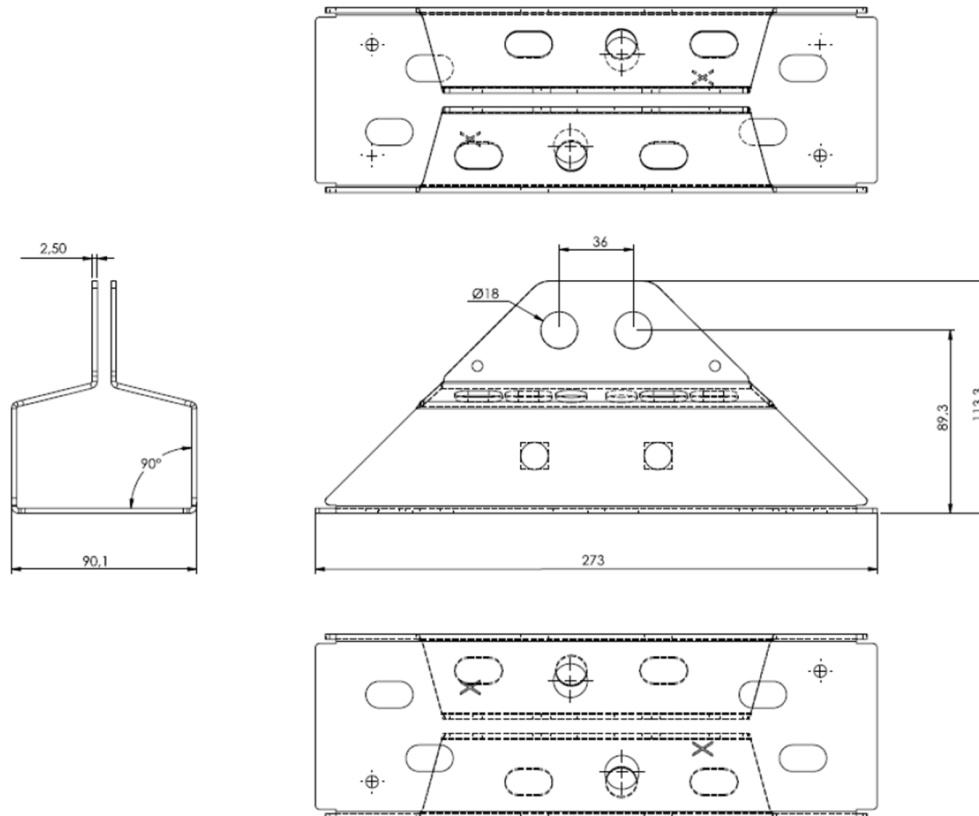
- Sei viti tutto filetto VGS, sollecitate assialmente ed a taglio, attuano la connessione tra il pannello CLT e l'inserto in legno LVL;
- Piastre X-Plate che consentono il collegamento a terra del connettore X-One o il collegamento reciproco fra connettori; vengono collegate ad ogni X-One mediante due bulloni  $\Phi$  16 mm.



*Immagine 4.10: principali componenti del sistema di connessione.*

*Box esterno*

È realizzato mediante una lamiera piegata in acciaio DX51D dello spessore di 2.5 mm, con le caratteristiche geometriche esposte in figura.



*Immagine 4.11: caratteristiche geometriche del box esterno (in mm).*

Sul box è presente anche una coppia di lamiere aggiuntive, posizionate in corrispondenza dei fori di infissione delle viti tutto filetto, allo scopo di rinforzare la piastra ed evitare il punzonamento della piastra con conseguente penetrazione delle viti.

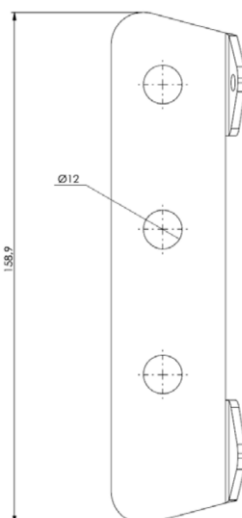


Immagine 4.12: caratteristiche dimensionali delle lamiere aggiuntive (in mm).

#### Inserto in legno LVL

È un elemento sagomato in modo tale da poter essere alloggiato all'interno del box. Costituito da legno LVL dispone di una fresata centrale per permettere l'alloggiamento della piastra di rinforzo interna, di sei fori pre-orientati per l'alloggiamento e la guida delle viti tutto filetto VGS e di due fori per le viti HBS di posizionamento.

L'inserto è realizzato in legno microlamellare (LVL) con densità caratteristica  $\rho_k \geq 680 \text{ kg/m}^3$ .

#### Piastra interna

È un elemento in acciaio DX51D dello spessore di 6 mm, con le caratteristiche geometriche esposte in figura.

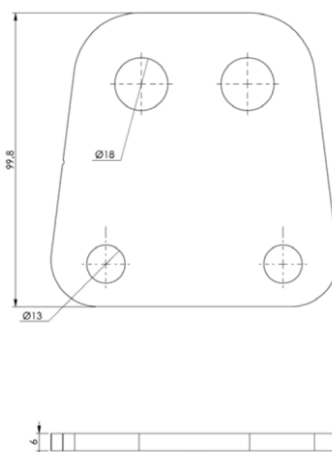


Immagine 4.13: caratteristiche dimensionali della piastra interna di rinforzo (in mm).

### *Bulloni $\Phi$ 12 mm*

I bulloni  $\Phi$  12 mm che collegano il box esterno, il legno LVL e la piastra interna sono di tipo 8.8 M12x110 mm a testa tonda, quindi con una resistenza a trazione di almeno 600 MPa ed una lunghezza di 110 mm.

### *Viti VGS tutto filetto*

Possono essere utilizzate viti tutto filetto del diametro di 9 mm e 11 mm.

Le viti  $\Phi$  11 mm hanno una resistenza caratteristica a trazione  $f_{tens,k} = 38.0$  KN. La profondità di infissione delle viti VGS nel CLT è infatti sufficiente a mobilitare la resistenza del gambo a trazione. Il box e la lamella di rinforzo consentono infatti una ripartizione delle sollecitazioni su una superficie maggiore, evitando meccanismi di punzonamento della piastra, consentendo di giungere a rottura per raggiungimento della resistenza a trazione del gambo della vite VGS.

Nel caso di sollecitazioni di compressione il meccanismo resistente è quello del filetto della vite. Sperimentalmente è stato ricavato un valore di resistenza a estrazione del filetto nell'LVL di  $f_{comp,k} = 35.0$  KN.

## **4.4.2 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio**

L'acciaio utilizzato per il box esterno di spessore 2.5 mm e per la piastra interna di spessore 6 mm è di tipo DX51D. Viene prodotto in accordo con le norme:

- EN 10346:2009 - Prodotti piani di acciaio rivestiti per immersione a caldo in continuo – Condizioni tecniche di fornitura;
- EN 10143:2006 - Lamiere sottili e nastri di acciaio con rivestimento applicato per immersione a caldo in continuo - Tolleranze sulla dimensione e sulla forma.

Le caratteristiche minime dell'acciaio da utilizzare sono quindi quelle indicate in Tabella 6 della norma EN 10346:2009, che indica per quel tipo di acciaio una resistenza a trazione compresa tra 270 MPa e 500 MPa.

Per le resistenze da utilizzare in fase di calcolo si considerano, a favore di sicurezza, quelle dell'acciaio S275<sup>3</sup>, risultate comunque inferiori alle resistenze ricavate dalle prove sperimentali su lamiere metalliche.

---

<sup>3</sup> Norma UNI-EN 10025

### 4.4.3 Prove sperimentali

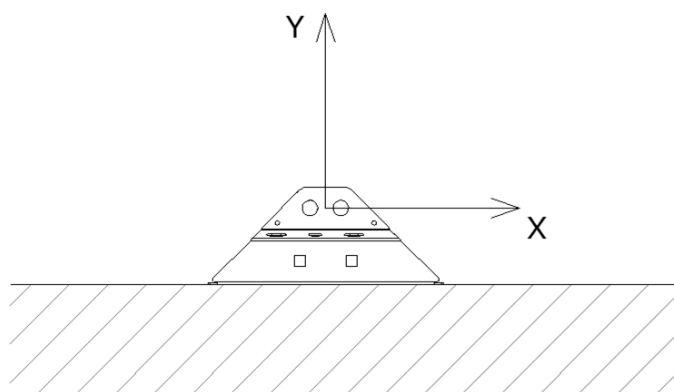
Sul sistema X-Rad sono state eseguite tre campagne di prove sperimentali nelle seguenti sedi:

- Lignum Test Center dell'Università di Graz (TU-GRAZ) presso cui sono state eseguite prove monotone<sup>4</sup>;
- Istituto per la valorizzazione del legno e delle specie arboree di San Michele A.A. (CNR-IVALSA) presso cui sono state eseguite prove cicliche<sup>5</sup>;
- Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento presso cui sono state eseguite prove sul sistema parete connessione.

#### 4.4.3.1 Prove eseguite presso il Lignum Test Center

In questa sede sono state eseguite prove monotone sia in configurazione di trazione che in configurazione di taglio.

Le prove sono state condotte lungo le due direzioni principali del sistema di riferimento locale del connettore.



*Immagine 4.14: sistema di riferimento locale del connettore.*

---

<sup>4</sup> In conformità alla norma UNI-EN 26891:1991

<sup>5</sup> In conformità alla norma UNI-EN 12512:2006

Prove lungo Y

In figura viene mostrato il setup di prova.

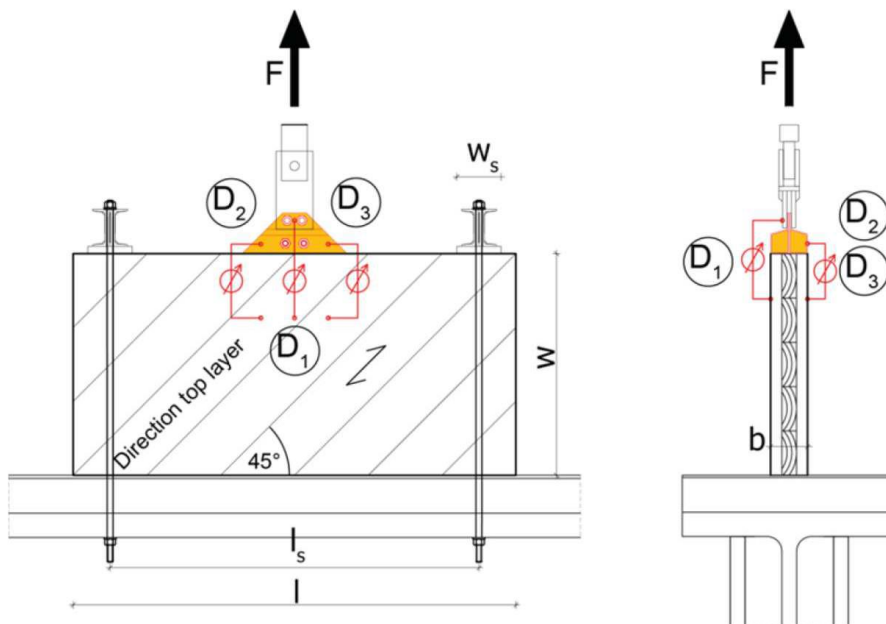


Immagine 4.15: schema del setup di prova.

Dal report di prova si ricavano le curve forza spostamento per le prove lungo Y.

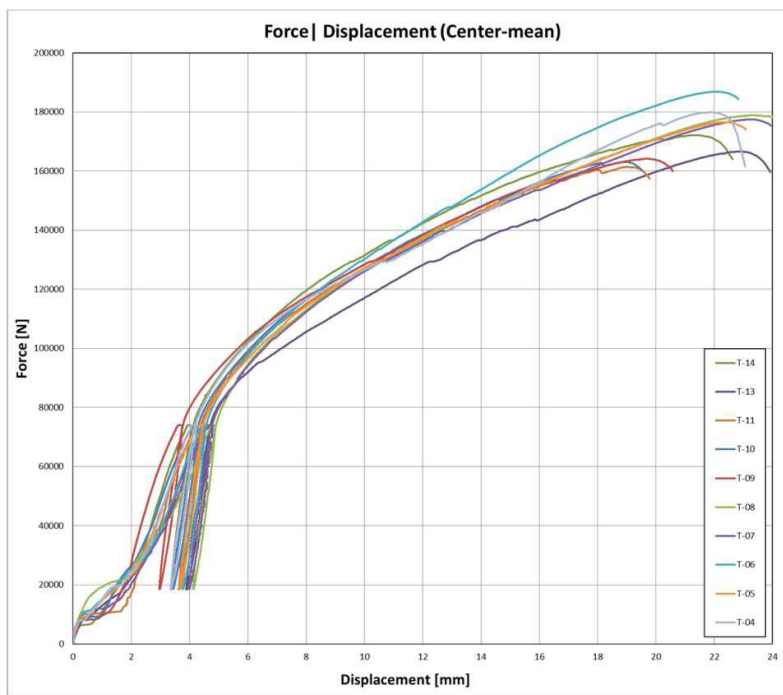
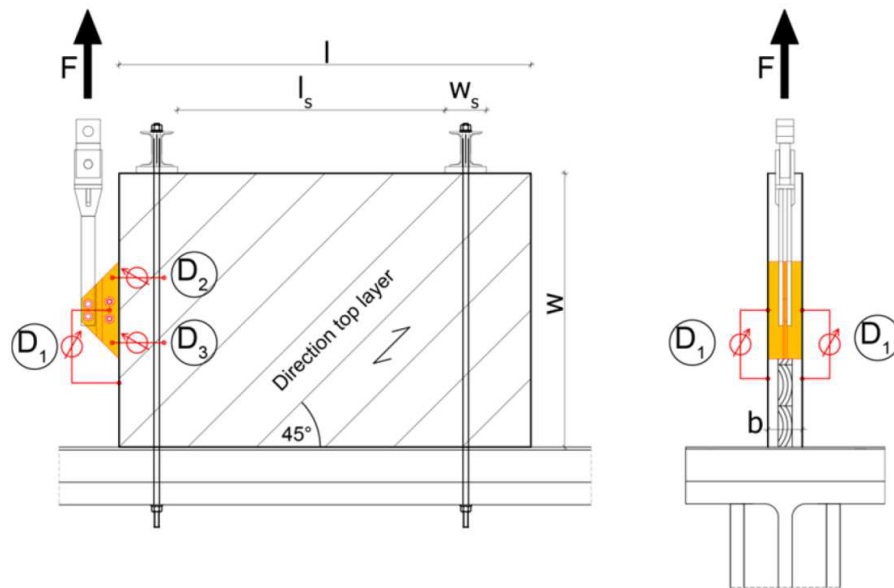


Immagine 4.16: curve forza-spostamento per le prove lungo Y.

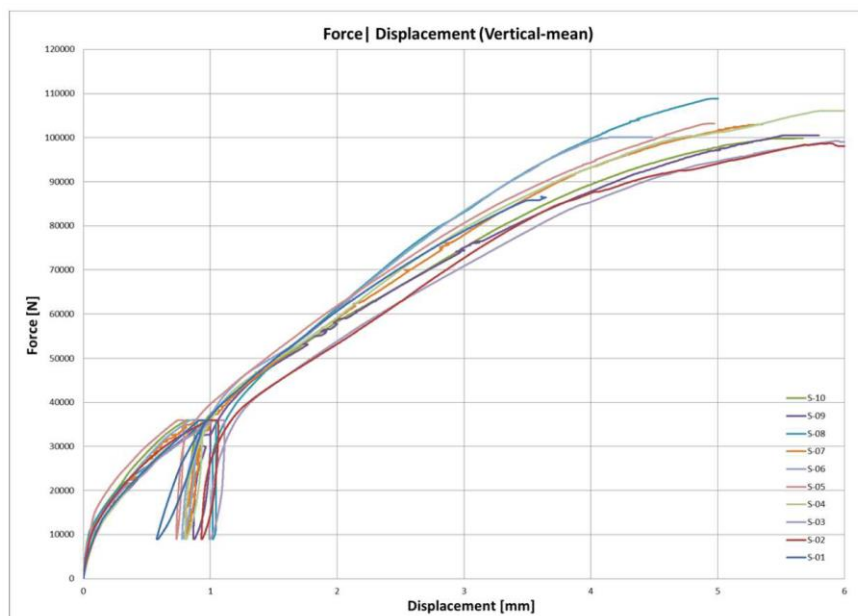
*Prove monotone lungo X*

In figura viene mostrato il setup di prova.



*Immagine 4.17: schema del setup di prova.*

Dal report di prova si ricavano le curve forza spostamento per le prove lungo X.



*Immagine 4.18: curve forza-spostamento per le prove lungo X.*

#### 4.4.3.2 Prove eseguite presso il CNR-INVALSA

Oltre alle prove cicliche descritte sono state eseguite prove di estrazione di diversi tipi di viti tutto filetto VGS inserite su diversi tipi di legni duri per poter determinare la combinazione vite-legno ottimale per l'uso all'interno del sistema.

##### *Prove cicliche lungo Y*

Il setup di prova è della stessa tipologia di quello utilizzato per le prove monotone.

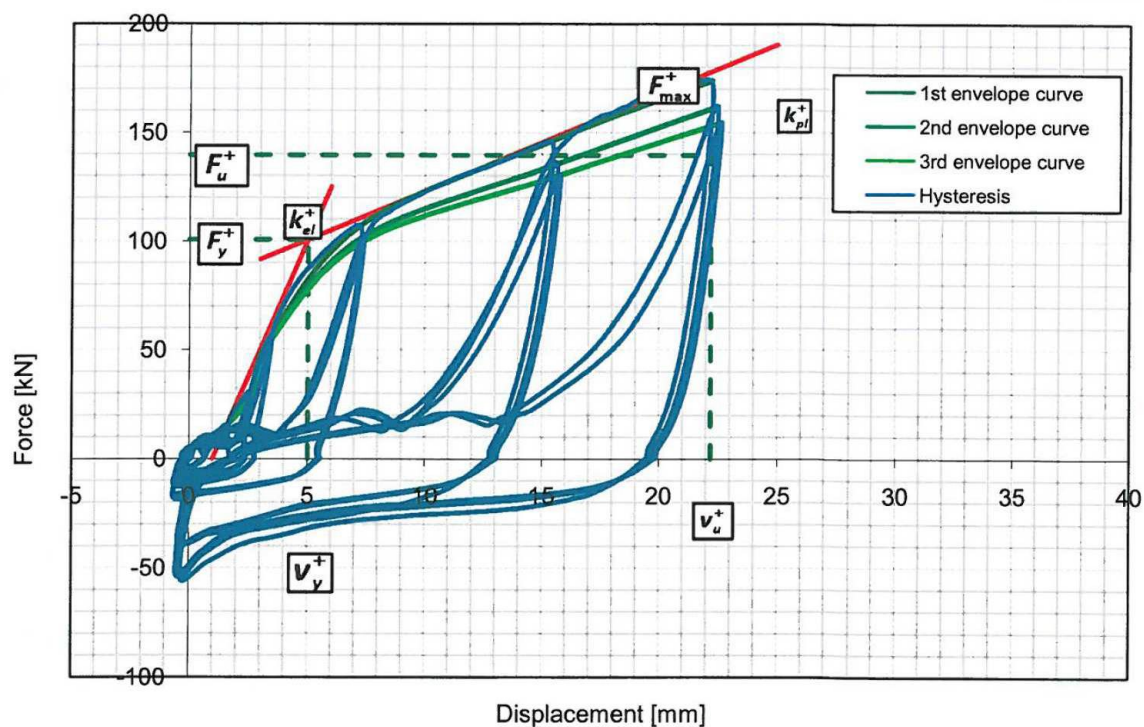


Immagine 4.19: curve forza-spostamento di una delle prove cicliche lungo Y.

##### *Prove cicliche lungo X*

Il setup di prova è della stessa tipologia di quello utilizzato per le prove monotone.



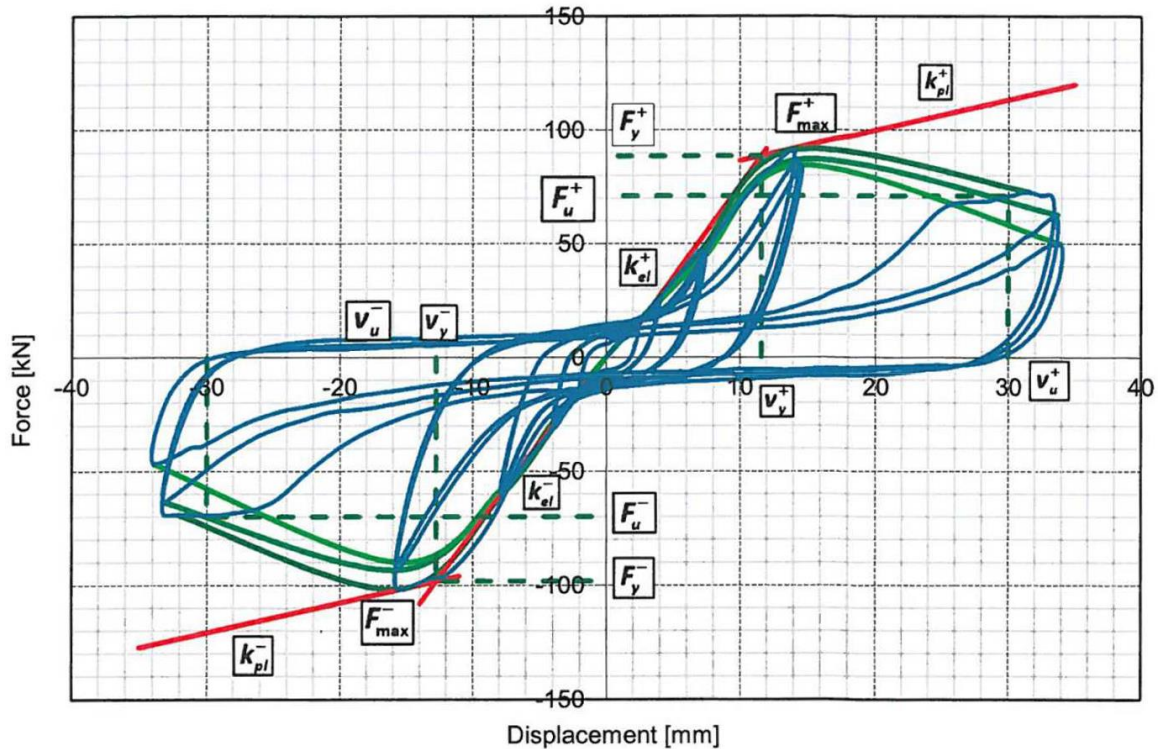


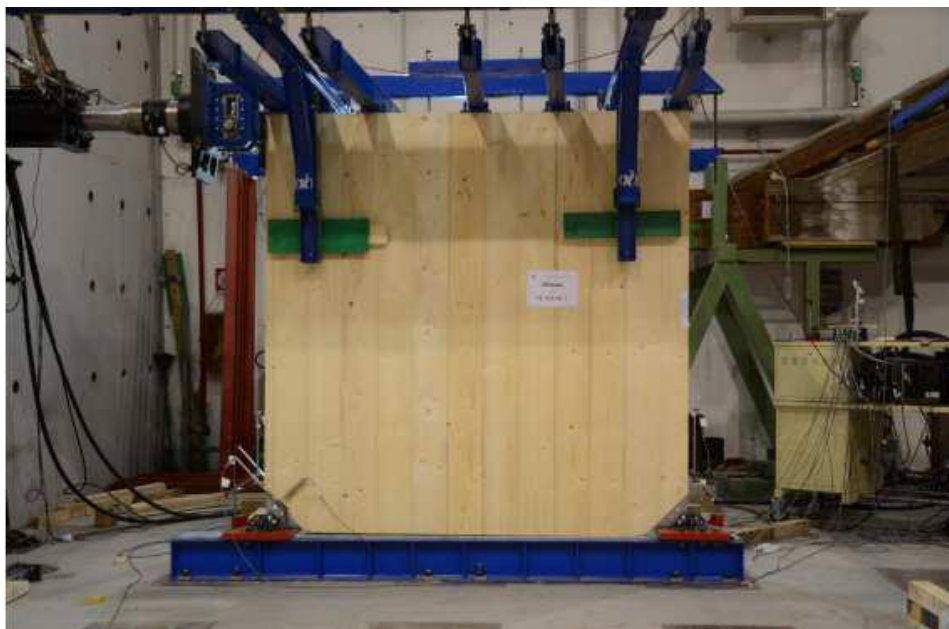
Immagine 4.20: curve forza-spostamento di una delle prove cicliche lungo X.

#### 4.4.3.3 Prove eseguite presso l'Università degli Studi di Trento

I test eseguiti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento hanno riguardato due diverse configurazioni: la prima comprendeva un solo elemento in CLT connesso a terra, la seconda un sistema di quattro elementi in CLT connessi mediante sistema X-Rad.

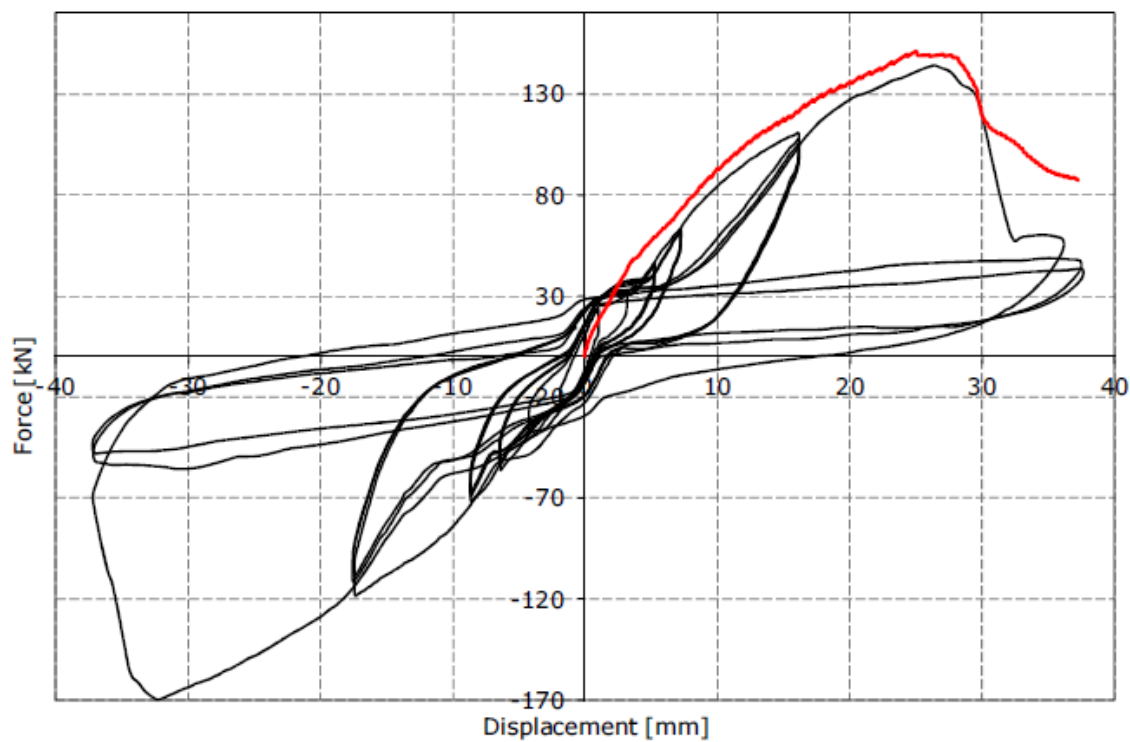
##### *Prove sul pannello singolo*

Il setup di prova corrispondeva ad una parete in CLT delle dimensioni di 250x250 cm, vincolata agli angoli alla base del pannello mediante due X-Rad. In sommità è stato applicato uno spostamento mediante un martinetto idraulico. Il carico sulla parete è stato applicato mediante un sistema di leve in grado di mantenere costante il carico verticale durante l'esecuzione della prova.



*Immagine 4.21: schema del setup di prova.*

Di seguito si riporta un grafico contenente le curve forza-spostamento per prova monotona (in rosso) e ciclica (in nero).

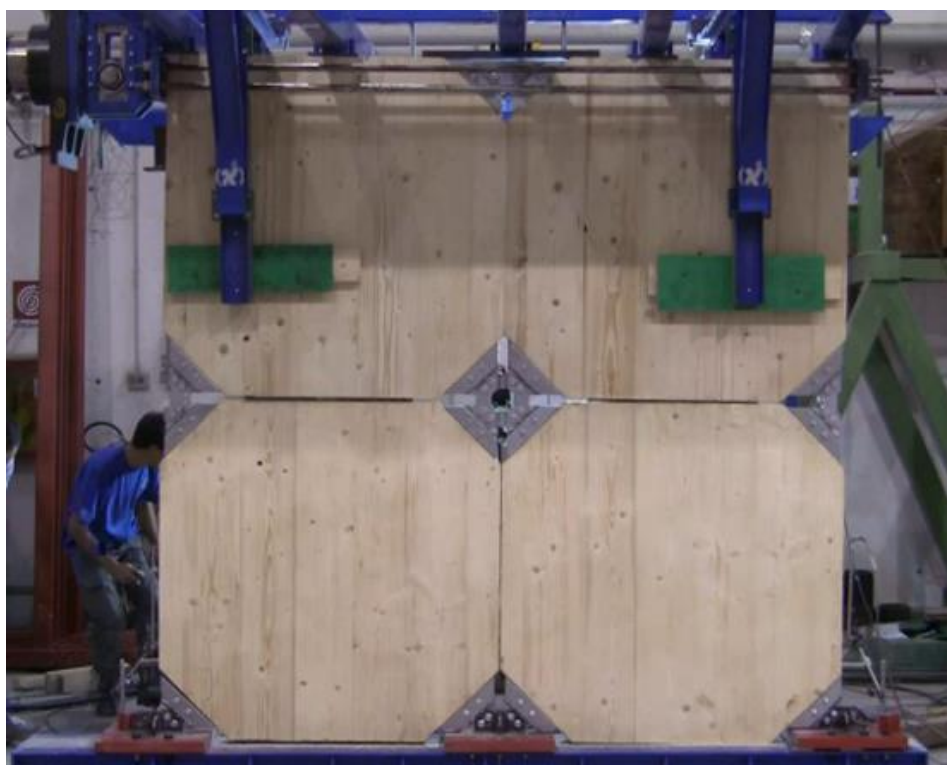


*Immagine 4.22: curve forza-spostamento per prova monotona e ciclica.*

*Prove sul pannello composto*

Il sistema è costituito da quattro pareti CLT delle dimensioni di 125x125 cm l'una, collegate reciprocamente e a terra attraverso il sistema X-Rad.

I carichi e gli spostamenti sono stati applicati come per la prova precedente.



*Immagine 4.23: schema del setup di prova.*

#### **4.4.4 Analisi FEM**

È stata condotta una campagna di simulazioni FEM, allo scopo di comprendere meglio i fenomeni che influenzano il comportamento globale della connessione, e di indagare il comportamento dell'X-Rad per direzioni di sollecitazione diverse da quelle oggetto di prove sperimentali.

La taratura del modello FEM è stata effettuata sulla base dei test condotti presso il centro CNR-IVALSA nelle direzioni X e Y.

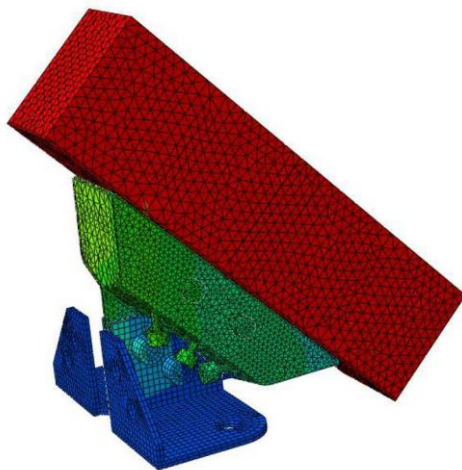


Immagine 4.24: modello FEM della connessione.

Sul modello sono state eseguite undici analisi push-over, lungo le direzioni rappresentate in figura.

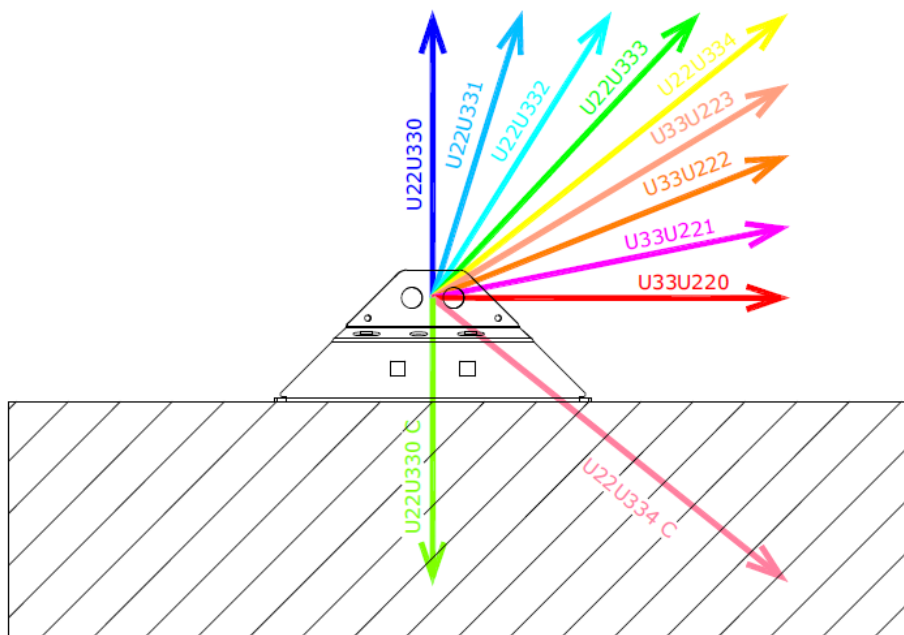


Immagine 4.25: vettori spostamento applicati al modello FEM.

Dalle analisi push-over sono state ricavate le curve di capacità per ogni direzione di sollecitazione. Le curve di capacità sono state linearizzate attraverso delle bilatere.

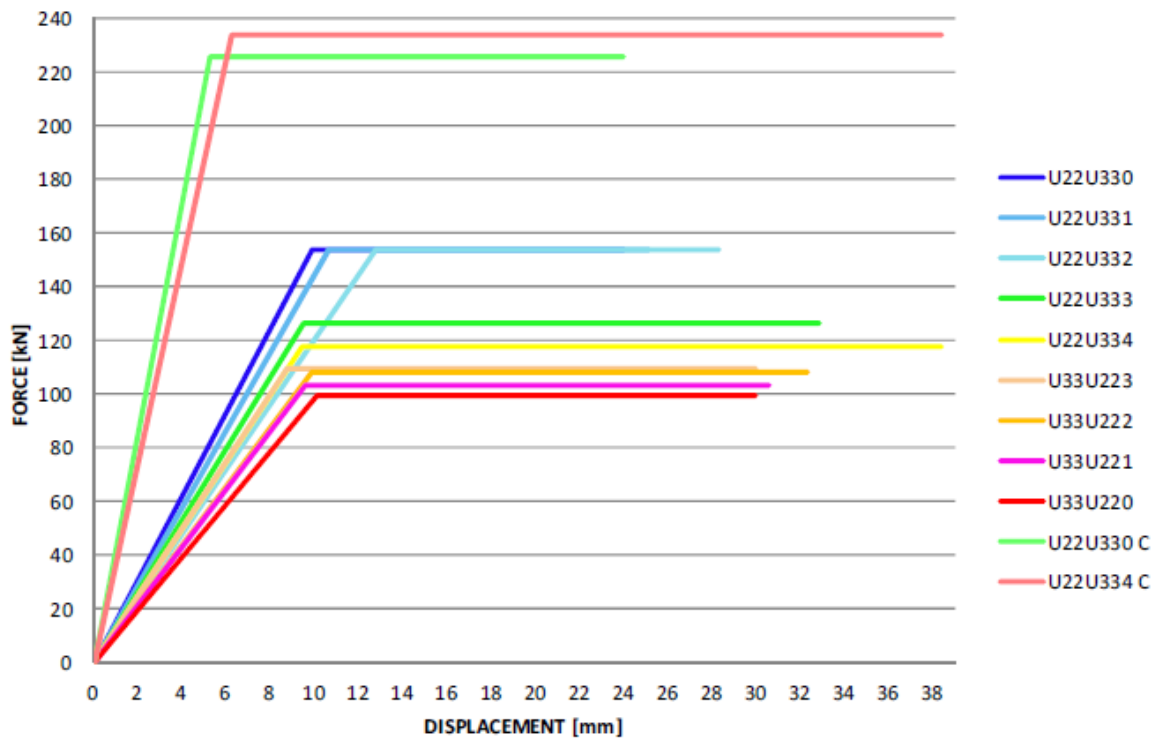


Immagine 4.26: bilatere per ogni direzione di sollecitazione.

Dal modello FEM sono quindi state ricavate le coppie con i valori di resistenza massima X e Y nel sistema di riferimento locale dell'X-One per ogni direzione di sollecitazione.

	Fx [kN]	Fy [kN]
U22U330	0,00	166,22
U22U331	13,19	161,43
U22U332	29,93	149,79
U22U333	51,52	126,24
U22U334	80,86	97,02
U33U223	90,24	77,24
U33U222	99,83	60,83
U33U221	103,92	38,76
U33U220	104,99	0,00
U22U334 C	110,55	-205,82
U22U330 C	0,00	-247,26

Immagine 4.27: valori di resistenza massima per ogni direzione di sollecitazione.

Dalle seguenti coppie è stato ricavato il dominio di interazione nel piano x-y.

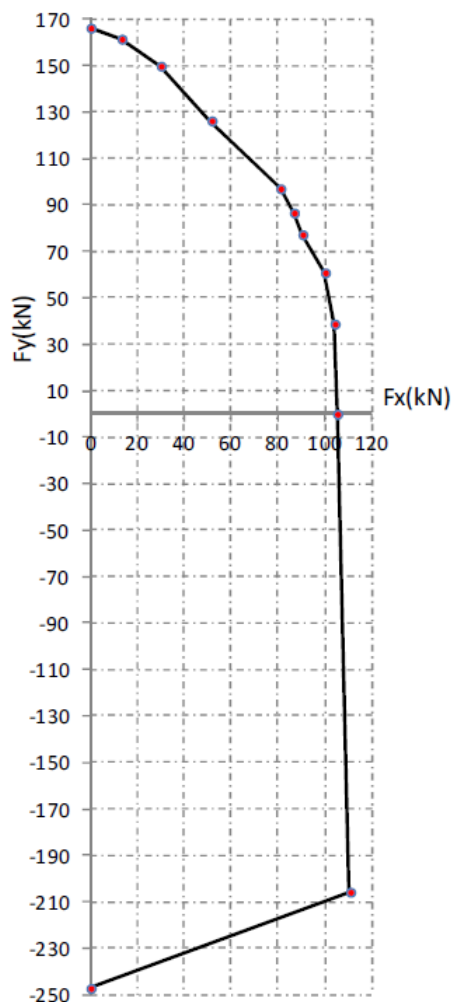


Immagine 4.28: dominio di interazione taglio-trazione ricavato dal modello FEM.

#### 4.4.5 Analisi delle condizioni di sollecitazione

A partire dai dati ottenuti dalle simulazioni FEM e dalle indagini sperimentali si è cercato di caratterizzare il comportamento della connessione nelle varie direzioni di sollecitazione.

##### 4.4.5.1 Definizioni delle sollecitazioni

L'azienda Rothoblaas ha adottato un sistema di riferimento convenzionale per le sollecitazioni sull'X-One, definito in questo modo:

- Trazione: è una forza diretta lungo l'asse Z (nel piano x-z del pannello) nel verso positivo, tende a sollecitare a trazione le viti tutto filetto;
- Compressione: è una forza diretta lungo l'asse Z nel verso negativo, tende a sollecitare a compressione le viti tutto filetto;

- Taglio-Trazione: è una forza diretta lungo l'asse X nel verso positivo, tende a sollecitare a trazione le viti tutto filetto;
- Taglio-Compressione: è una forza diretta lungo l'asse X nel verso negativo, tende a sollecitare a compressione le viti tutto filetto.

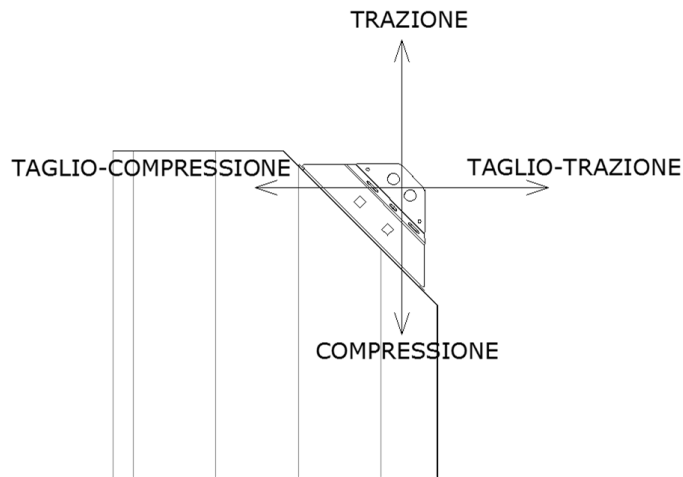


Immagine 4.29: definizione delle sollecitazioni principali nel piano del pannello.

Dall'immagine si può notare come le sollecitazioni di trazione e taglio-trazione impongano la stessa tipologia di sollecitazione al connettore.

La stessa considerazione può essere fatta per le sollecitazioni di compressione e taglio-compressione.

Oltre a queste è possibile definire le sollecitazioni nel sistema di riferimento dell'X-One, ovvero quelle testate nelle prove in laboratorio.

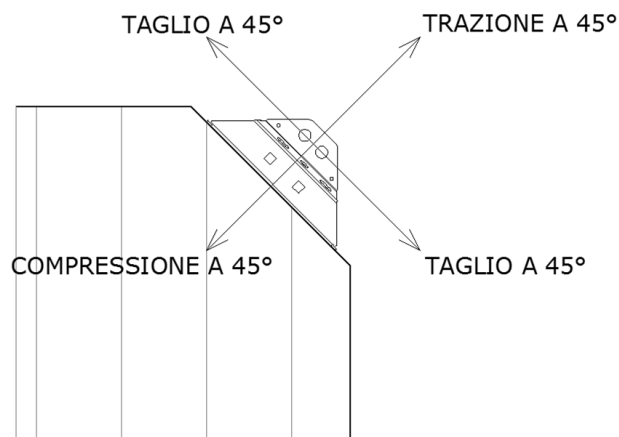


Immagine 4.30: definizione delle sollecitazioni principali nel sistema di riferimento dell'X-One.

Misurando gli angoli a partire dall'asse X positivo nel piano del pannello x-z, le sollecitazioni sono definite in questo modo.

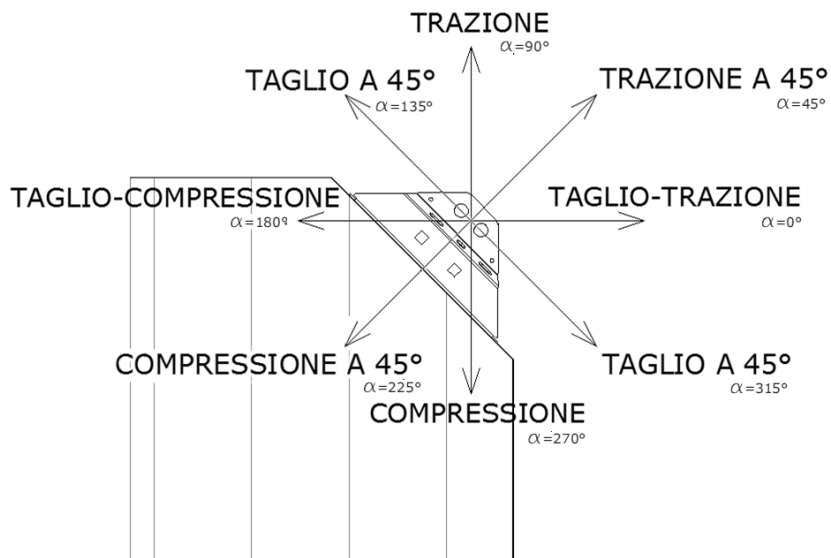


Immagine 4.31: definizione completa delle sollecitazioni.

#### 4.4.5.2 Modalità di rottura della connessione

Si riporta un'immagine del connettore X-One in condizioni iniziali.



Immagine 4.32: connettore X-One in condizioni standard.

Si vanno ora ad analizzare le possibili modalità di rottura della connessione X-Rad in base alla tipologia di connessione:

- connessione legno-legno per mezzo di viti tutto-filetto VGS:
  - rottura a taglio delle viti;
  - rottura per estrazione del filetto delle viti dal pannello CLT;
  - rottura per estrazione del filetto delle viti dall'inserto LVL;
- connessione bullonata legno-acciaio-legno fra la piastra interna al connettore e l'inserto il legno LVL:
  - rottura lato legno della connessione a taglio;
  - rottura della piastra per rifollamento da parte dei bulloni;



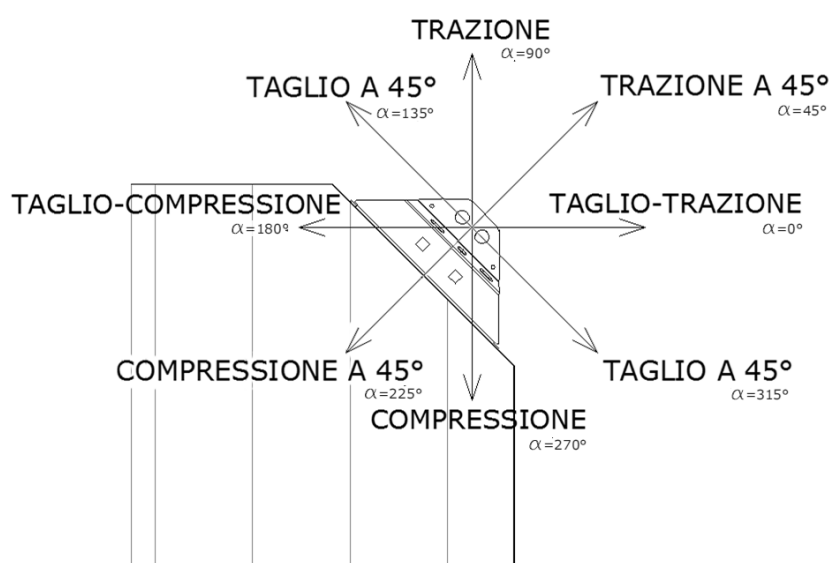
- connessione bullonata acciaio-acciaio tra il boz metallico, la piastra interna e la piastra esterna:
  - rottura per rifollamento in corrispondenza dei bulloni;
  - rottura per "block-tearing".

La fase di studio del sistema X-Rad ha consentito di conferire sovreresistenza ad alcuni componenti, allo scopo di indirizzare i meccanismi di rottura verso questi tipi:

- tranciamento delle viti tutto filetto VGS nella connessione legno-legno.
- "block tearing" del box metallico e della piastra interna nella connessione box metallico-piastra interna e box metallico-piastra esterna.

È importante definire i meccanismi di rottura per ogni direzione di sollecitazione, in quanto in base al tipo di rottura, lato legno o lato acciaio, andrà utilizzato l'opportuno coefficiente di sicurezza.

Si riporta la *Immagine 4.30* da cui si ricavano le direzioni di sollecitazione.



*Immagine 4.33: definizione completa delle sollecitazioni.*

*Taglio-trazione,  $\alpha=0^\circ$*

La rottura avviene per tranciamento (rottura a trazione) delle viti VGS. Il meccanismo di collasso è quindi lato acciaio.

*Trazione a 45°,  $\alpha=45^\circ$*

La rottura avviene per block tearing delle piastre sui bulloni  $\Phi$  16 mm. Si ha quindi la rottura contemporanea della piastra interna e del box metallico. Il meccanismo di rottura è quindi lato acciaio. Si sono verificate anche rotture a trazione di una coppia di viti VGS.



*Immagine 4.34: meccanismo di rottura per block tearing contemporaneo di box metallico e piastra interna.*

*Trazione,  $\alpha=90^\circ$*

Le sollecitazioni sulla connessione sono dello stesso tipo di quelle a taglio-trazione, valgono quindi le stesse considerazioni con un meccanismo di rottura lato acciaio.

*Taglio a 45°,  $\alpha=135^\circ$  e  $\alpha=315^\circ$*

La rottura avviene per tranciamento delle viti sottoposte a taglio. Il meccanismo di rottura è quindi lato acciaio.

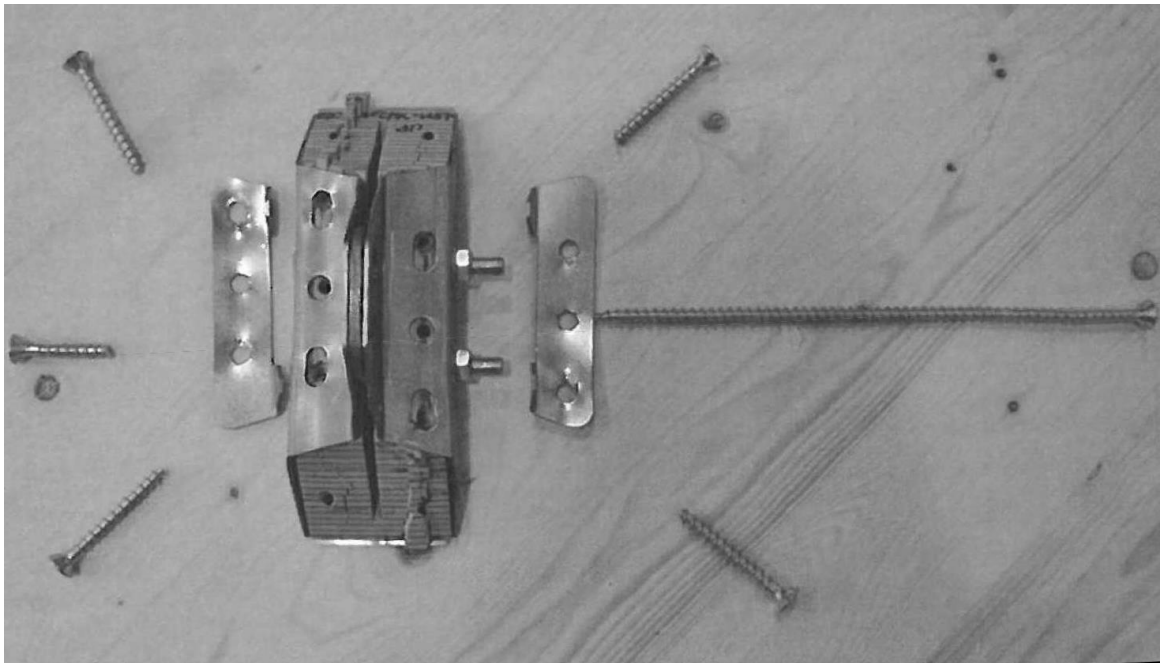


Immagine 4.35: rottura per taglio a  $45^\circ$  con tranciamento delle viti VGS.

*Taglio-compressione,  $\alpha=180^\circ$*

Il meccanismo di rottura non è univocamente definito ma variabile da prova a prova. Possono essere di questo tipo:

- rottura a trazione delle viti tese (quindi con meccanismo di tranciamento lato acciaio);
- rottura per estrazione del filetto sulle viti (quindi con meccanismo lato legno);
- rottura per estrazione di un cuneo di legno, accompagnata da effetti di splitting sul pannello CLT (quindi con meccanismo lato legno).

Essendo il coefficiente di sicurezza del legno maggiormente limitante, si assume a favore di sicurezza una rottura lato legno.

*Compressione a  $45^\circ$ ,  $\alpha=225^\circ$*

La rottura avviene per compressione del legno, o eventualmente per estrazione del filetto delle viti dall'inserto in legno LVL. In ogni caso il meccanismo di rottura è lato legno.

*Compressione,  $\alpha=270^\circ$*

Le sollecitazioni sulla connessione sono dello stesso tipo di quelle a taglio-coppressione, valgono quindi le stesse considerazioni con un meccanismo di rottura lato legno.

#### 4.4.5.3 Calcolo a rottura della connessione

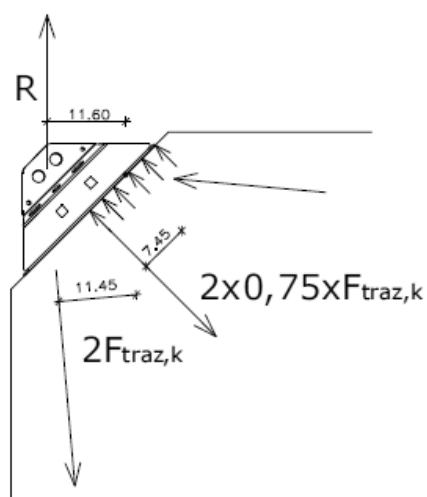
Nel seguente paragrafo vengono riprese le modalità di rottura per ogni direzione di sollecitazione esposte precedentemente, analizzando analiticamente i dati ottenuti dalle indagini sperimentali.

I calcoli sono stati eseguiti in conformità al teorema statico dell'analisi limite, che permette di eseguire una sottostima del carico di collasso della connessione.

La configurazione di equilibrio può essere dedotta a partire dai risultati delle analisi sperimentali, permettendo di eseguire un calcolo mirato in base alle modalità di rottura sperimentali.

*Taglio-trazione,  $\alpha=0^\circ$*

Lo schema limite utilizzato per il calcolo a rottura per tranciamento delle viti è riportato in figura.



*Immagine 4.36: schema utilizzato per il taglio-trazione.*

La resistenza ultima caratteristica risulta essere  $R_{u,k}=111,6$  KN.

Trazione a  $45^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$

Sono possibili due modalità di rottura, uno lato viti con il tranciamento di una coppia di viti VGS e una per block tearing delle piastre collegate ai bulloni  $\Phi 16$  mm.

Per quanto riguarda la rottura lato viti, lo schema limite utilizzato è rappresentato in figura.

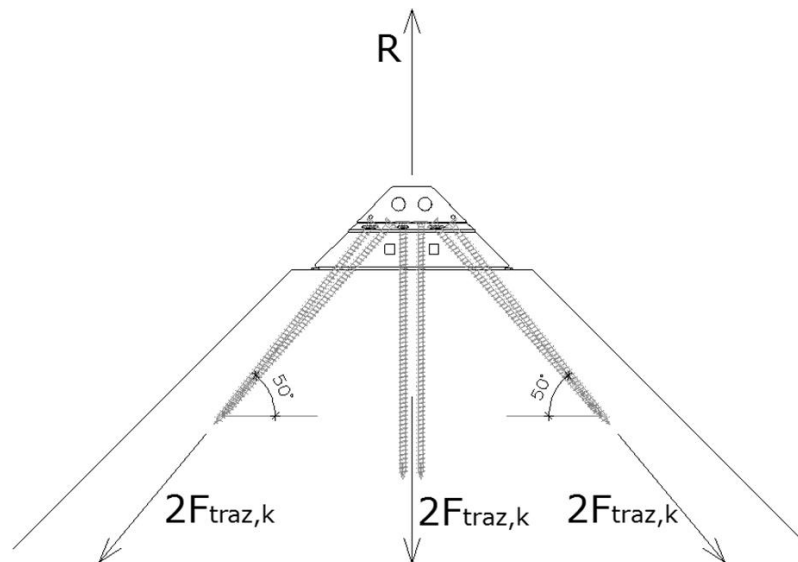


Immagine 4.37: schema utilizzato per la rottura delle viti per la trazione a  $45^\circ$ .

Come si può notare una coppia di viti risulta essere parallela alla forza, mentre altre due coppie risultano avere un'angolazione di circa  $50^\circ$ .

La resistenza ultima caratteristica risulta essere  $R_{u,k}=192,4$  KN.

Per la rottura lato acciaio per fenomeno di block tearing si è fatto riferimento all'EC3<sup>6</sup> (Eurocodice 3).

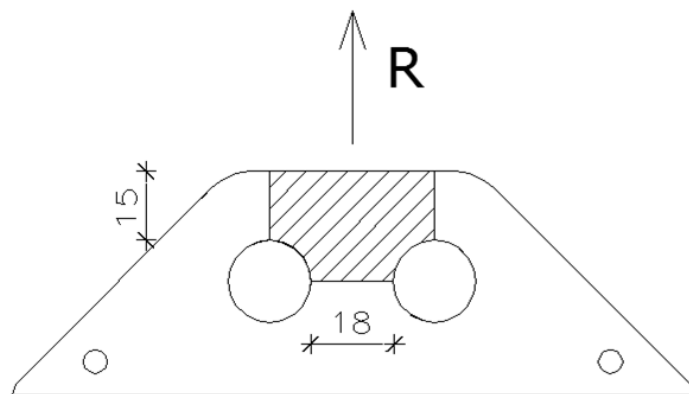


Immagine 4.38: schema utilizzato per block tearing per la trazione a 45°.

La resistenza caratteristica, applicando gli opportuni coefficienti ed i coefficienti di sicurezza previsti dalla normativa, si ottiene una resistenza ultima caratteristica di  $R_{u,k}=114,8$  KN.

La resistenza della connessione risulterà essere quindi la minore fra le due tipologie, quindi quella per block tearing.

Taglio a 45°,  $\alpha=135^\circ$  e  $\alpha=315^\circ$

Dalle prove sperimentali risulta una rottura lato viti. Per completezza si riporta lo schema utilizzato anche per la rottura lato acciaio.

Per la rottura lato viti è stato utilizzato il seguente schema.

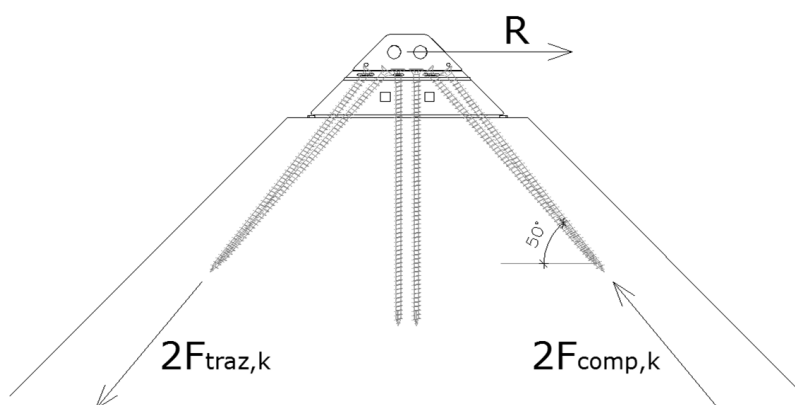


Immagine 4.39: schema utilizzato per la rottura lato viti per il taglio a 45°.

<sup>6</sup> § 3.10.2 della UNI-EN 1993-1-1

Si ipotizza che le viti a sinistra lavorino a trazione, le viti di destra a compressione. La coppia di viti centrali lavorerebbe a taglio ma la loro resistenza viene trascurata a favore di sicurezza, considerando che il lavoro a taglio risulterebbe commensurabile per spostamenti molto maggiori di quello che la resistenza delle coppie di viti laterali è in grado di offrire.

La resistenza ultima risulta essere  $R_{u,k}=93,9$  KN.

Per la rottura lato acciaio si è fatto riferimento all'EC3 come in precedenza, utilizzando il seguente schema.

La resistenza ricavata inserendo gli opportuni coefficienti risulta essere  $R_{u,k}=96.91$  KN.

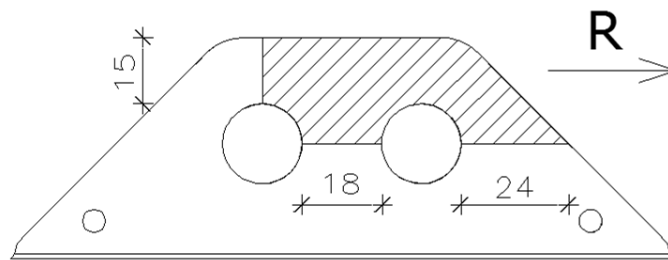


Immagine 4.40: schema utilizzato per il block tearing per il taglio a 45°.

La resistenza della connessione sarà quindi la minore fra le due, quindi quella lato viti, coerentemente con i risultati sperimentali.

Taglio-compressione,  $\alpha=180^\circ$

Lo schema adottato è esposto in figura.

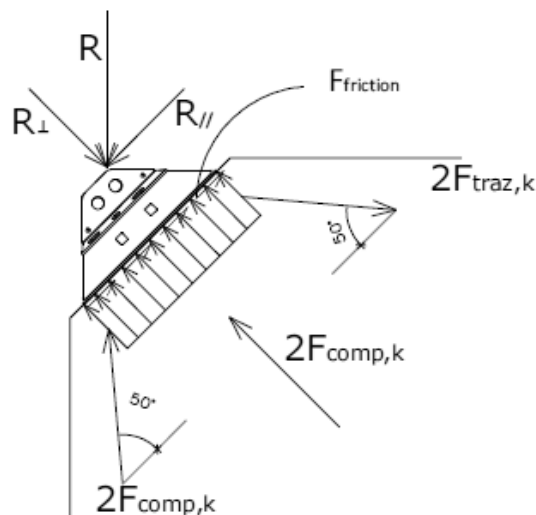


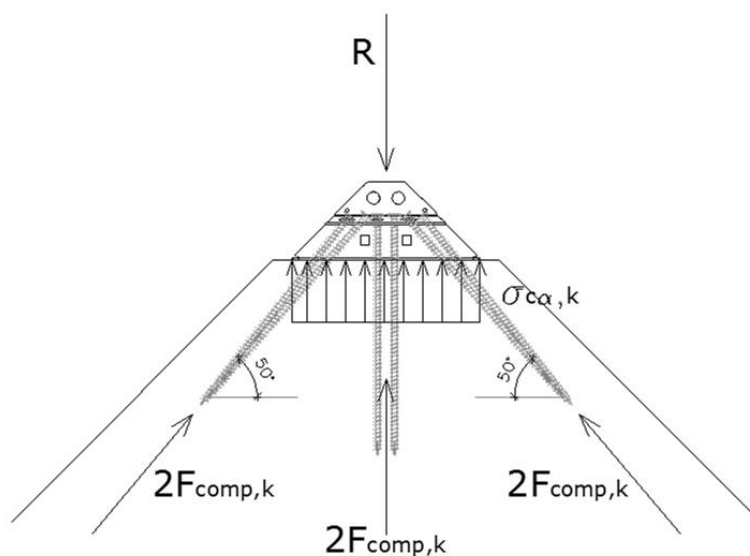
Immagine 4.41: schema utilizzato per taglio-compressione.

Dallo schema si evince una resistenza di  $R_{u,k}= 165,9$  KN.

*Compressione a  $45^\circ$ ,  $\alpha=225^\circ$*

È stato utilizzato il seguente schema ultimo.

La resistenza ricavata dallo schema adottato risulta essere  $R_{u,k}= 279,6$  KN.



*Immagine 4.42: schema utilizzato per la compressione a  $45^\circ$ .*

#### 4.4.6 Definizione di un criterio di resistenza

Nel paragrafo precedente sono state definite le configurazioni geometriche per le principali direzioni di sollecitazione. Nel presente paragrafo verrà elaborato un criterio di resistenza per coprire tutto lo spettro di  $360^\circ$ .

##### 4.4.6.1 Costruzione del dominio di rottura

Il dominio di rottura è una figura piana appartenente al piano di tutte le possibili coppie di parametri della sollecitazione (in questo caso V-N). I punti che si trovano all'interno della figura chiusa rappresentano stati di sollecitazione che la connessione è in grado di sopportare. Il perimetro della figura rappresenta quindi la frontiera di rottura, oltre la quale si verifica la rottura.

Per il sistema X-Rad sono stati definiti tre domini di rottura ottenuti attraverso tre metodi diversi.



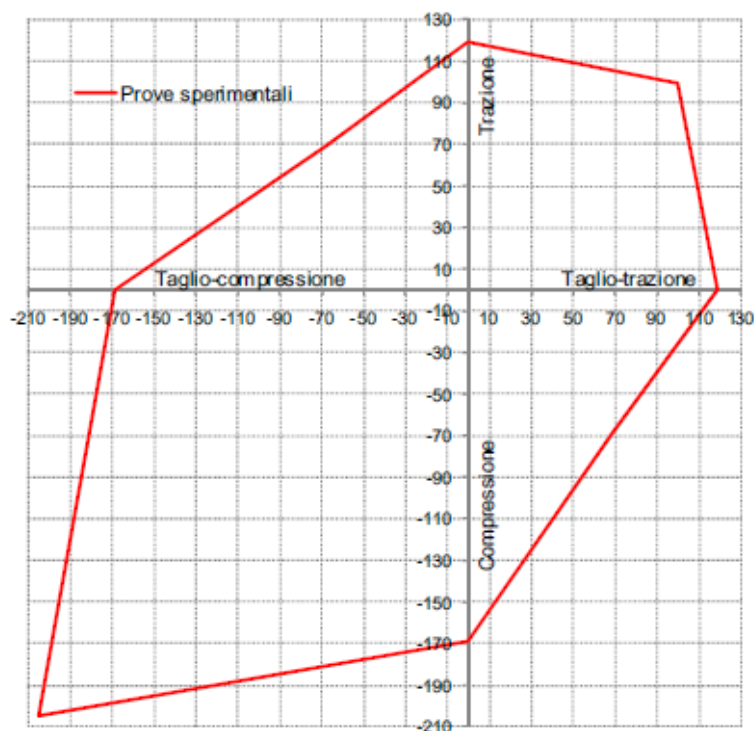
*Dominio basato sulle resistenze sperimentali*

Sulla base delle resistenze sperimentali elaborate precedentemente è possibile ricavare il dominio di rottura sperimentale inserendo i punti nel piano e collegandoli attraverso rette. Si ottiene così il dominio di interazione taglio-trazione/compressione rappresentato dalle rette che ne costituiscono la frontiera.

Coordinate dei punti del dominio di rottura sperimentale				
Sollecitazione sull'X-Rad	Angolo	R [kN]	Coordinate	
			V [kN]	N [kN]
taglio-trazione	0°	119,0	119,0	0,0
trazione a 45°	45°	141,0	99,7	99,7
trazione pura	90°	119,0	0,0	119,0
taglio a 45°	135°	97,0	-68,6	68,6
taglio-compressione	180°	168,9	-168,9	0,0
compressione a 45°	225°	289,7	-204,8	-204,8
compressione pura	270°	168,9	0,0	-168,9
taglio a 45°	315°	97,0	68,6	-68,6
taglio-trazione	360°	119,0	119,0	0,0

*Immagine 4.43: punti del dominio di rottura sperimentale.*

Si ottiene il seguente dominio di rottura sperimentale.

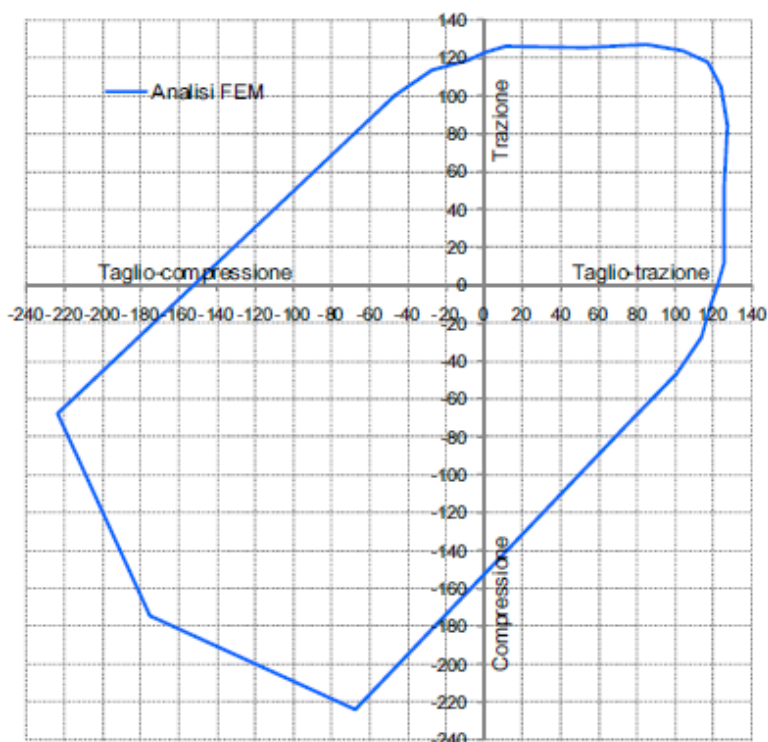


*Immagine 4.44: dominio di rottura sperimentale.*

A partire dal dominio di rottura si può effettuare una verifica grafica della connessione. Se il punto rappresentante i parametri della sollecitazione della connessione giace all'interno della figura la connessione risulta verificata.

*Dominio basato sulle resistenze FEM*

A partire dalle conclusioni ricavate dal §4.4.3, in particolare in riferimento all'Immagine 4.27, è stato sufficiente ruotare e specchiare il diagramma precedentemente ottenuto per ottenere il dominio di resistenza basato sulle simulazioni FEM.



*Immagine 4.45: dominio di rottura basato su resistenze FEM.*

*Confronto fra dati sperimentali e modellazioni FEM*

Osservando la sovrapposizione dei due domini di resistenza è possibile ricavarne alcune considerazioni.

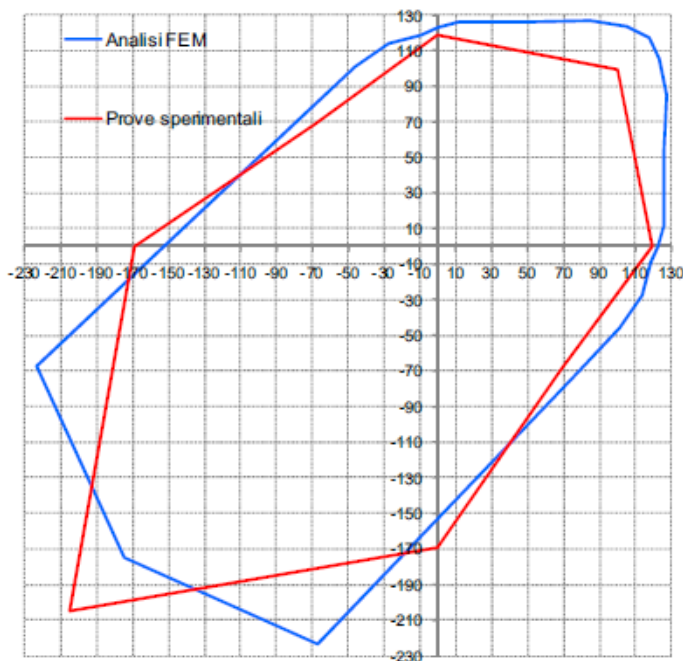


Immagine 4.46: confronto fra domini di resistenza sperimentale e FEM

Le simulazioni eseguite attraverso modelli FEM hanno permesso di indagare il comportamento della connessione per direzioni di sollecitazione difficilmente riproducibili in laboratorio. Questo allo scopo di poter indagare anche le zone del dominio non coperte da dati sperimentali.

Per quanto riguarda la parte di piano che rappresenta le sollecitazioni preponderanti a trazione (primo quadrante) si nota che i risultati delle prove sperimentali sono sempre contenuti all'interno del dominio di resistenza FEM. La scelta di collegare linearmente i punti ottenuti sperimentalmente si può ritenere corretta e viene assunta a favore di sicurezza.

Per quanto riguarda la parte di piano che rappresenta le sollecitazioni preponderanti a compressione (sostanzialmente il terzo quadrante) devono essere fatte alcune considerazioni, visto l'andamento divergente, rispetto al modello FEM utilizzato:

- la sollecitazione di compressione a  $45^\circ$  (secondo lo schema esposto nell'Immagine 4.30), vede il trasferimento della sollecitazione sia attraverso le viti tutto filetto VGS, sia attraverso la base dell'X-One sul pannello CLT. Una situazione di questo tipo risulta complessa da modellare fedelmente in ambiente FEM;
- le sollecitazioni di taglio-compressione e compressione vedono il trasferimento di parte della forza di taglio fra la base dell'X-One e il pannello CLT attraverso la forza di attrito, che non è stata presa in

considerazione nel modello FEM, sottostimando quindi la resistenza della connessione.

La prova eseguita per l'angolo di 197° mostra che l'andamento lineare utilizzato per interpolare i dati sperimentali è molto a favore di sicurezza.

La scelta di utilizzare l'andamento lineare a partire dai dati sperimentali può essere quindi assunta corretta a favore di sicurezza.

*Dominio basato sulle resistenze di calcolo a rottura*

Le resistenze analitiche ricavate precedentemente utilizzate per la costruzione del dominio sono le seguenti.

Sollecitazione sull'X-Rad	Angolo	R [kN]	Coordinate	
			V [kN]	N [kN]
taglio-trazione	0°	111,6	111,6	0,0
trazione a 45°	45°	133,6	94,4	94,4
trazione pura	90°	111,6	0,0	111,6
taglio a 45°	135°	93,9	-66,4	66,4
taglio-compressione	180°	165,9	-165,9	0,0
compressione a 45°	225°	279,6	-197,7	-197,7
compressione pura	270°	165,9	0,0	-165,9
taglio a 45°	315°	93,9	66,4	-66,4
taglio-trazione	360°	111,6	111,6	0,0

*Immagine 4.47: resistenze analitiche ricavate dal calcolo a rottura.*

Il dominio ricavato per interpolazione lineare dei dati è il seguente.

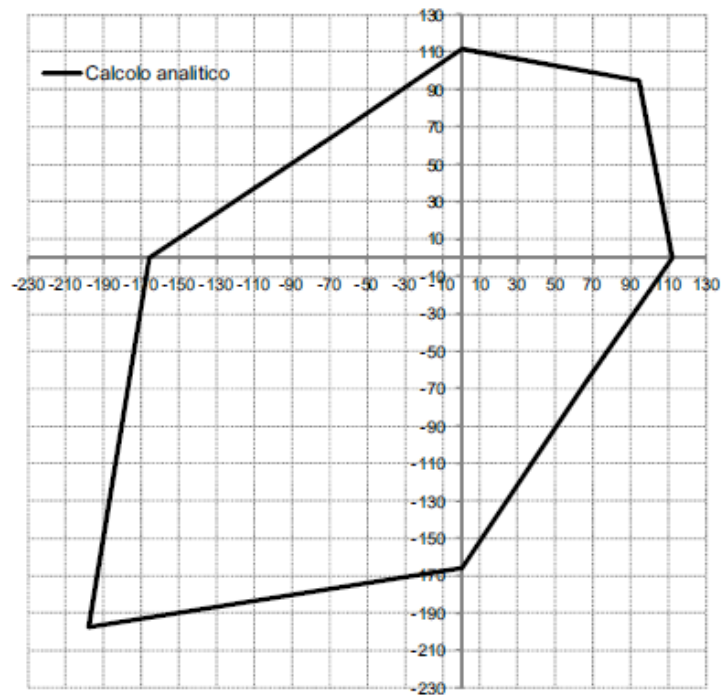


Immagine 4.48: dominio di resistenza basato su resistenze analitiche.

#### Confronto fra dati sperimentali e resistenze di calcolo a rottura

La sovrapposizione dei due domini di resistenza mostra come il dominio di resistenza ottenuto da calcolo analitico sia sempre a favore di sicurezza.

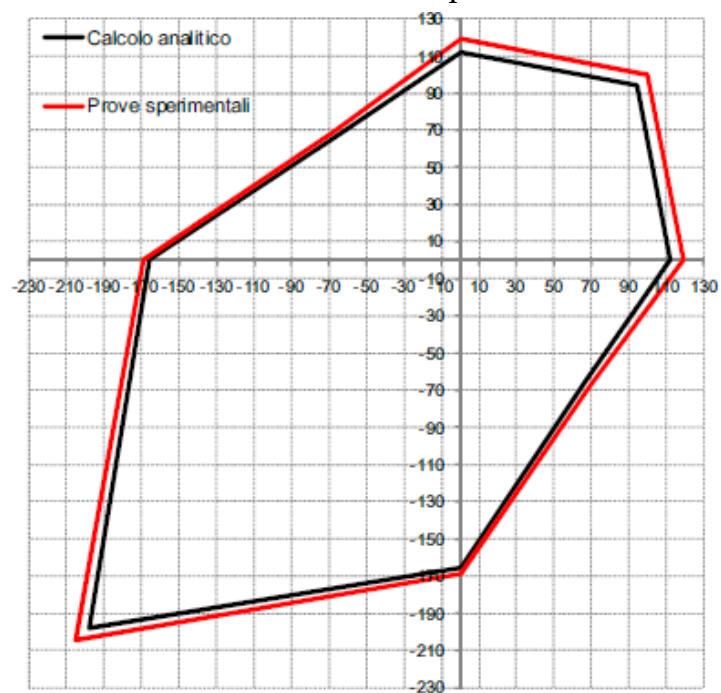


Immagine 4.49: confronto fra dominio di resistenza sperimentale e analitico.

#### 4.4.6.2 Interpretazione grafica del dominio

Nell'immagine è stato sovrapposto al dominio caratteristico di resistenza un'immagine del sistema X-Rad, per meglio comprendere a quali sollecitazioni corrispondono i punti del dominio. Sono presenti a titolo esemplificativo due stati di sollecitazione.

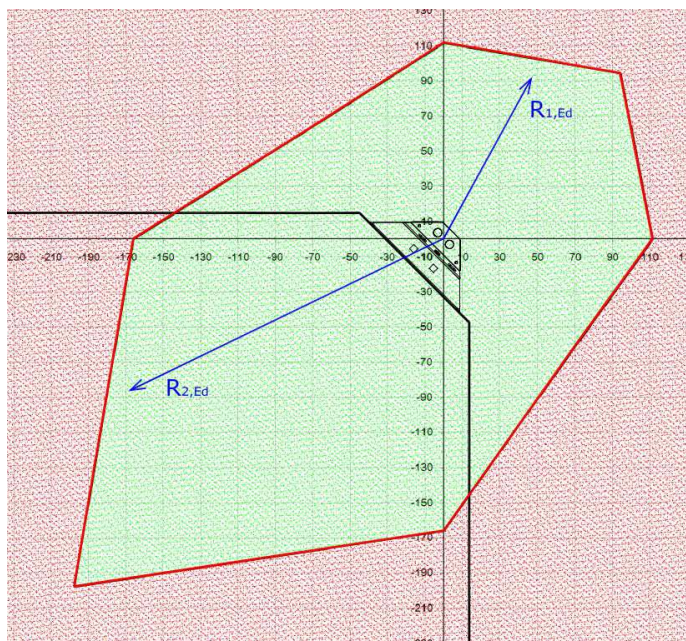


Immagine 4.50: dominio di resistenza caratteristico sovrapposto al connettore.

#### 4.4.7 Coefficienti di sicurezza

Per poter eseguire le verifiche allo Stato Limite Ultimo è necessario passare dal dominio caratteristico al dominio di rottura di progetto. Questo passaggio avviene in modalità diverse a seconda se coinvolga una connessione in legno, come la connessione legno-legno attraverso viti tutto filetto VGS, oppure una connessione bullonata, come quella fra piastre o la rottura per trazione delle viti.

##### Rottura lato legno

In questo caso si applicano le formulazioni previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni come esposto nel § 3, dall'equazione (3.1)

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

Il coefficiente  $\gamma_M$  da utilizzare è di 1,5 per la normativa italiana<sup>7</sup>, di 1,3 per la normativa europea<sup>8</sup> in caso di strutture non dissipative e di 1,0 per la normativa europea in caso di strutture dissipative.

#### Rottura lato acciaio

Per l'acciaio si applicano le formulazioni previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni<sup>9</sup> e dall'Eurocodice 3.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

In questo caso i coefficienti  $\gamma_M$  utilizzare sono di 1,05 per la resistenza delle sezioni tese e di 1,25 per la resistenza delle sezioni in generale.

Nella tabella seguente sono riepilogati i coefficienti da utilizzare per ogni modalità di rottura della connessione.

Modalità di rottura				
Sollecitazione sull'X-Rad	Angolo	Rottura	$\gamma_M$	$k_{mod}$
taglio-trazione	0°	Trazione delle viti (lato acciaio)	$\gamma_{M2}=1,25$	-
trazione a 45°	45°	Block tearing della piastra interna sui fori $\Phi 16$	$\gamma_{M0}=1,05$ ; $\gamma_{M2}=1,25$	-
trazione pura	90°	Trazione delle viti (lato acciaio)	$\gamma_{M2}=1,25$	-
taglio a 45°	135°	Trazione delle viti (lato acciaio)	$\gamma_{M2}=1,25$	-
taglio-compressione	180°	Rottura lato legno - estrazione del filetto delle viti	$\gamma_{M,legno}=1,5$ (1,3 secondo EC5)	1,0
compressione a 45°	225°	Rottura a compressione lato legno	$\gamma_{M,legno}=1,5$ (1,3 secondo EC5)	1,0
compressione pura	270°	Rottura lato legno - estrazione del filetto delle viti	$\gamma_{M,legno}=1,5$ (1,3 secondo EC5)	1,0
taglio a 45°	315°	Trazione delle viti (lato acciaio)	$\gamma_{M2}=1,25$	-
taglio-trazione	360°	Trazione delle viti (lato acciaio)	$\gamma_{M2}=1,25$	-

Immagine 4.51: tabella riepilogativa dei coefficienti di sicurezza.

#### 4.4.8 Campo di utilizzo della connessione

Il sistema X-Rad funge da connessione fra pareti strutturali in CLT, allo scopo di prevenirne il ribaltamento in caso di azioni orizzontali.

Le forze verticali sono trasmesse principalmente per contatto fra pannelli CLT sovrapposti, senza gravare sulla connessione.

L'utilizzo del sistema X-Rad in presenza di carichi che richiedano l'utilizzo di un coefficiente  $k_{mod} \leq 1$  richiede una rivalutazione del dominio di progetto, a causa di

<sup>7</sup> Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14-01-2008

<sup>8</sup> Eurocodice 5 EN 1995-1-1 ed Eurocodice 8 EN 1998-1-1

<sup>9</sup> § 4.2.8.1.1 del D.M. 14-01-2008 e § 2.2 Eurocodice 3 UNI EN 1993-1-8

una possibile variazione delle gerarchie di resistenza. In questo caso è possibile trattare tutte le connessioni come lato legno, utilizzando i coefficienti corretti.

#### 4.4.9 Dominio di rottura caratteristico

Si riportano i tre domini di resistenza caratteristici ricavati in precedenza.

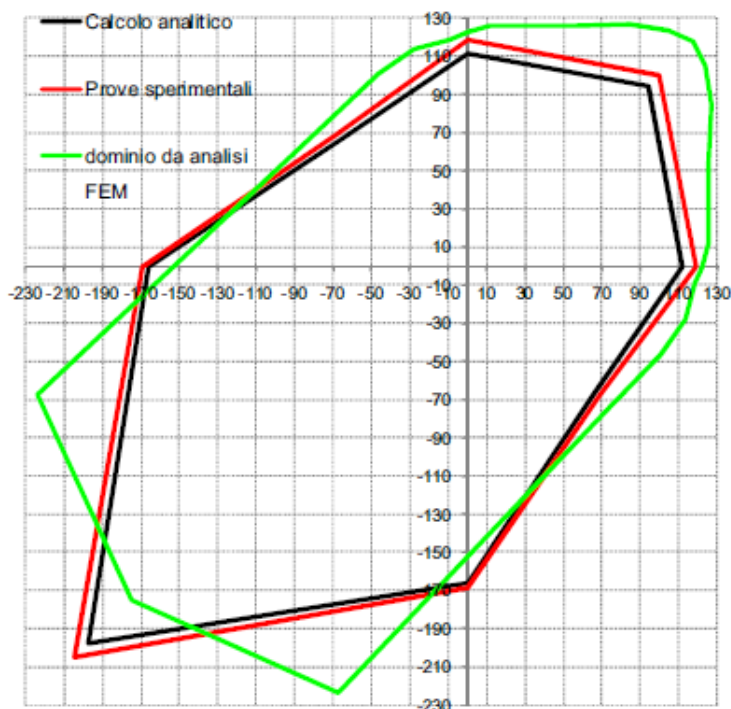


Immagine 4.52: sovrapposizione dei tre domini di resistenza ricavati precedentemente.

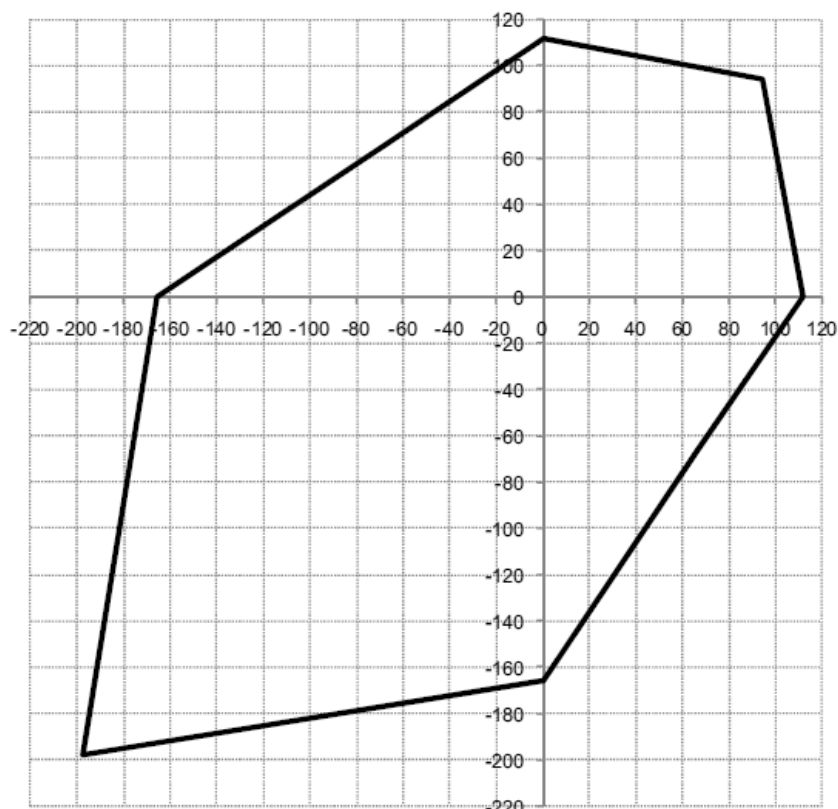
I punti del dominio caratteristico sono i seguenti.

Sollecitazione sull'X-Rad	Angolo	$R_k$ [kN]	Coordinate	
			$V_k$ [kN]	$N_k$ [kN]
taglio-trazione	0°	111,6	111,6	0,0
trazione a 45°	45°	141,0	99,7	99,7
trazione pura	90°	111,6	0,0	111,6
taglio a 45°	135°	97,0	-68,6	68,6
taglio-compressione	180°	165,9	-165,9	0,0
compressione a 45°	225°	279,6	-197,7	-197,7
compressione pura	270°	165,9	0,0	-165,9
taglio a 45°	315°	97,0	68,6	-68,6
taglio-trazione	360°	111,6	111,6	0,0

Immagine 4.53: punti del dominio di resistenza caratteristico.



La rappresentazione grafica del dominio caratteristico è la seguente.



*Immagine 4.54: dominio di resistenza caratteristico della connessione.*

#### **4.4.10 Dominio di rottura di progetto**

A partire dal dominio caratteristico esposto precedentemente, applicando gli opportuni coefficienti di sicurezza, vengono ricavati i domini di resistenza di progetto. Si riportano per completezza sia il dominio di progetto calcolato sulla base della normativa italiana<sup>7</sup> ed europea<sup>8</sup>.

Dominio di rottura di progetto - D.M. 14-01-2008						
Sollecitazione sull'X-RAD	Angolo	$\gamma_M$	$k_{mod}$	$R_d$ [kN]	Coordinate	
					$V_d$ [kN]	$N_d$ [kN]
taglio-trazione	0°	1,25	-	89,3	89,3	0,0
trazione a 45°	45°	1,25*	-	112,8	79,8	79,8
trazione pura	90°	1,25	-	89,3	0,0	89,3
taglio a 45°	135°	1,25	-	77,6	-54,9	54,9
taglio-compressione	180°	1,50	1,0	110,6	-110,6	0,0
compressione a 45°	225°	1,50	1,0	186,4	-131,8	-131,8
compressione pura	270°	1,50	1,0	110,6	0,0	-110,6
taglio a 45°	315°	1,25	-	77,6	54,9	-54,9
taglio-trazione	360°	1,25	-	89,3	89,3	0,0

Immagine 4.55: punti del dominio di resistenza di progetto secondo NTC 2008.

Dominio di rottura di progetto - EN 1995-1-1 + EN 1998-1-1						
Sollecitazione sull'X-RAD	Angolo	$\gamma_M$	$k_{mod}$	R [kN]	Coordinate	
					V [kN]	N [kN]
taglio-trazione	0°	1,25	-	89,3	89,3	0,0
trazione a 45°	45°	1,25*	-	112,8	79,8	79,8
trazione pura	90°	1,25	-	89,3	0,0	89,3
taglio a 45°	135°	1,25	-	77,6	-54,9	54,9
taglio-compressione	180°	1,30**	1,1	140,4	-140,4	0,0
compressione a 45°	225°	1,30**	1,1	236,6	-167,3	-167,3
compressione pura	270°	1,30**	1,1	140,4	0,0	-140,4
taglio a 45°	315°	1,25	-	77,6	54,9	-54,9
taglio-trazione	360°	1,25	-	89,3	89,3	0,0

Immagine 4.56: dominio di resistenza di progetto secondo EC5.

\* per il meccanismo resistente lato acciaio (block tearing) si dovrebbero utilizzare entrambi i coefficienti di sicurezza. Avendo considerato la resistenza da ETA<sup>10</sup>, basata su prove sperimentali, non è possibile suddividere la resistenza a block tearing nelle due componenti base (taglio e a trazione). Per questo motivo, a favore di sicurezza, si utilizza un unico coefficiente di sicurezza pari a  $\gamma_{M2}$ . N.B. se la resistenza della connessione fosse stata lato legno, nel caso di utilizzo della norma europea, si sarebbe potuto utilizzare un  $\gamma_M=1,00$ , in quanto la classe di duttilità a trazione a 45°, dichiarata da ETA, è una classe M.

\*\* La EN 1998-1-1, per le connessioni in legno, permette di utilizzare il coefficiente  $\gamma_M=1,00$  relativo alle combinazioni accidentali, solo nel caso in cui la classe di duttilità della connessione fosse M o H. Per classi di duttilità L si deve utilizzare invece il  $\gamma_M=1,30$  relativo alle combinazioni statiche. Per gli angoli 180°, 225° e 270° l'ETA non fornisce

<sup>10</sup> ETA-15/0632

una classe di duttilità, quindi, a favore di sicurezza, si ipotizza una classe di duttilità L con coefficiente  $\gamma_M=1,30$ . La normativa italiana, al contrario, non fa alcun cenno ad una diversificazione del  $\gamma_M$  in funzione della classe di duttilità, quindi si considera  $\gamma_M=1,50$ .

Nell'immagine successiva vengono rappresentati graficamente i due domini di resistenza di progetto e il dominio di resistenza caratteristico. Si può notare come lato legno (sollecitazioni di compressione) vi sia un evidente disparità tra la normativa europea e quella italiana, che risulta penalizzante.

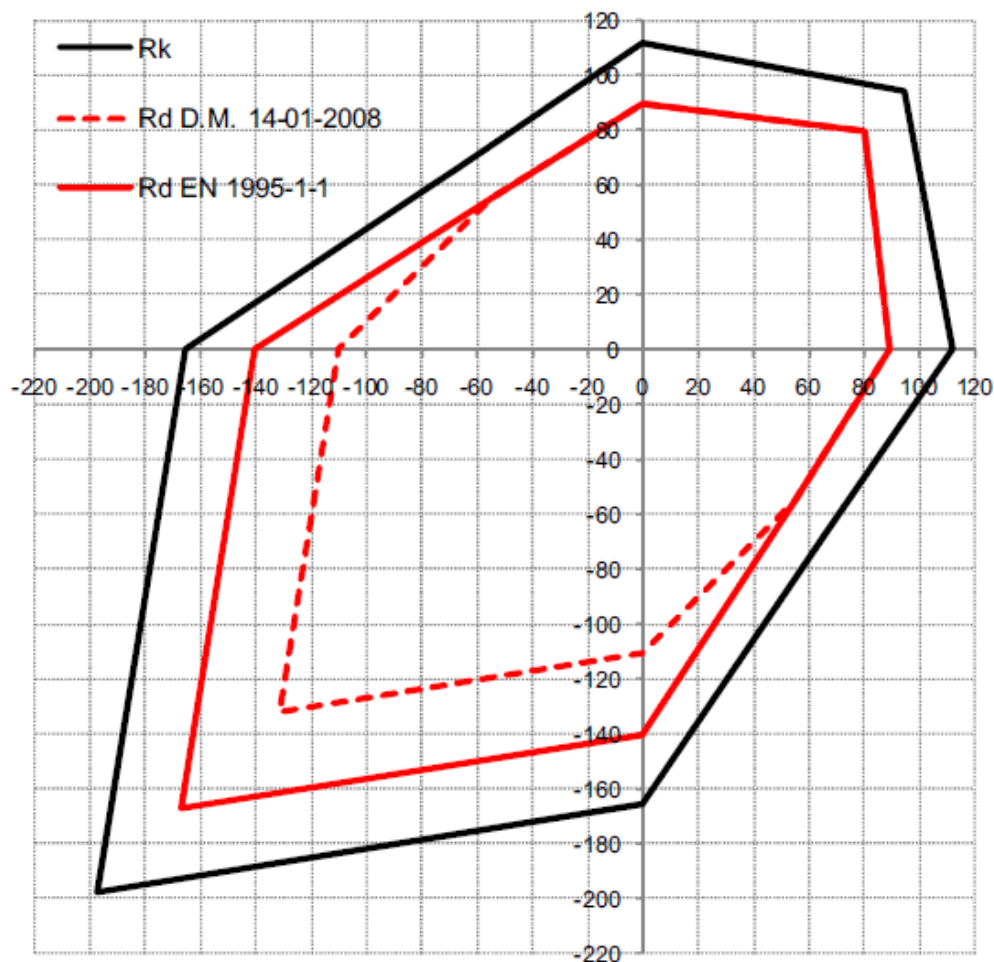


Immagine 4.57: rappresentazione grafica dei domini di resistenza di progetto e caratteristico.

#### 4.4.11 Prescrizioni da Benestare Tecnico Europeo (ETA 15/0632)

Il Benestare Tecnico Europeo fornisce alcune prescrizioni riguardo all'uso del sistema X-Rad:

- X-RAD può essere utilizzato in connessioni tra elementi in CLT;
- X-RAD può essere soggetto ad azioni statiche, quasi statiche o sismiche;

- X-RAD può essere utilizzato nelle classi di servizio 1 o 2<sup>11</sup>.

Fornisce anche alcune prescrizioni riguardanti la progettazione della connessione:

- la progettazione di connessioni X-RAD deve essere condotta sotto la responsabilità di un ingegnere con esperienza nelle costruzioni in legno;
- la progettazione delle opere deve assicurare la protezione delle connessioni, per mantenere le classi di servizio 1 o 2 in accordo con la EN 1995-1-1;
- le connessioni X-RAD devono essere installate correttamente;
- deve essere controllato che non intervengano fenomeni di splitting, in accordo con la EN 1995-1-1.

#### *Fenomeni di splitting*

Durante l'esecuzione delle prove sperimentali si sono verificati fenomeni di splitting in prossimità del carico di rottura della connessione. Ciò ha comportato il distacco di un cuneo di legno in prossimità della coppia di viti più sollecitate con conseguente apertura del pannello CLT.

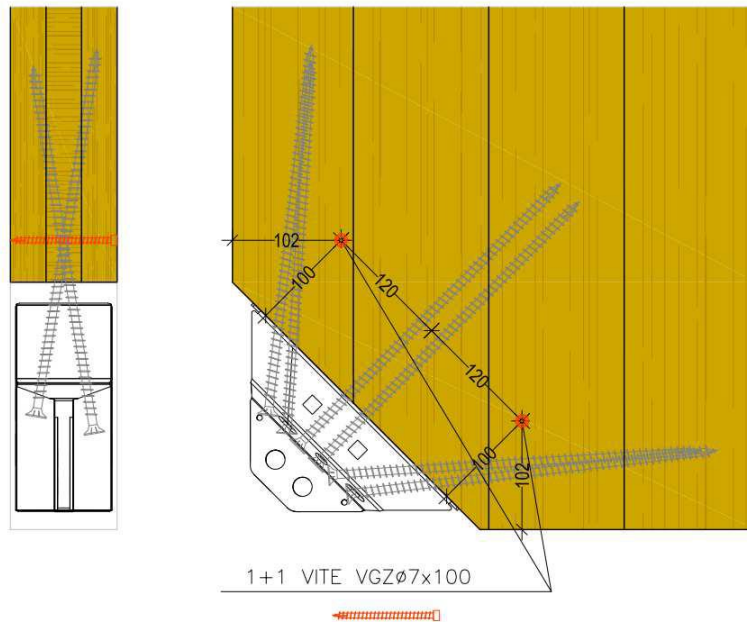
Le resistenze sperimentali sono state quindi determinate in presenza di fenomeni di splitting. Nonostante ciò l'ETA prescrive che nel caso in cui la connessione venga progettata per sfruttare al massimo la sua resistenza vengano inserite due viti perpendicolarmente al piano del pannello per fornire un rinforzo nei confronti di possibili fenomeni di apertura del pannello. Tale prescrizione porterà la connessione a rottura per trazione delle viti, sfruttando al massimo la loro resistenza ed elevando quindi la resistenza ultima.

---

<sup>11</sup> In accordo con la norma EN 1995-1-1

SEZIONE VERTICALE

VISTA LATERALE



*Immagine 4.58: posizionamento delle viti per contrastare il fenomeno di splitting.*



---

## ANALISI STRUTTURALE CON IL SISTEMA X-RAD

---

Il sistema X-Rad si pone come un collegamento per pareti in X-Lam di tipo innovativo, non trovando riscontro nei sistemi di modellazione al momento in uso. Per questo motivo il produttore ha rilasciato una guida alla modellazione FEM del sistema, allo scopo di illustrare un metodo che possa trovare riscontro con i dati sperimentali acquisiti. Tale metodo è stato quindi utilizzato per modellare dapprima una singola parete connessa a terra con sistema X-Rad nei due software commerciali oggetto di studio, successivamente per implementare il caso studio proposto dalla guida Rothoblaas dove possibile, per poterne verificare la corretta possibilità di modellazione e la correttezza dei risultati ottenuti.

### 5.1 MODALITÀ DI MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI PROPOSTA DA ROTHOBLAAS

L'elemento base del modello è costituito da un connettore X-Rad ad ogni angolo del pannello in CLT.

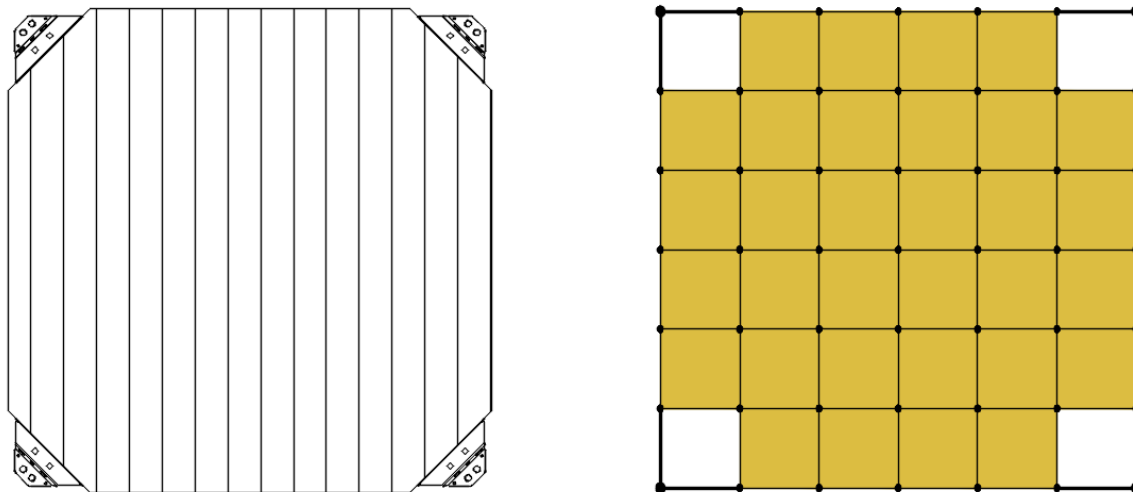


Immagine 5.1: elemento base del modello.

Il connettore viene modellato con due bielle in materiale acciaio con le seguenti caratteristiche:

- sezione quadrata di lato 5.51 mm;
- lunghezza 255 mm;
- modulo elastico dell'acciaio di 210000 MPa.

In questo modo si ottiene una rigidezza finale della connessione pari a 25 kN/mm.

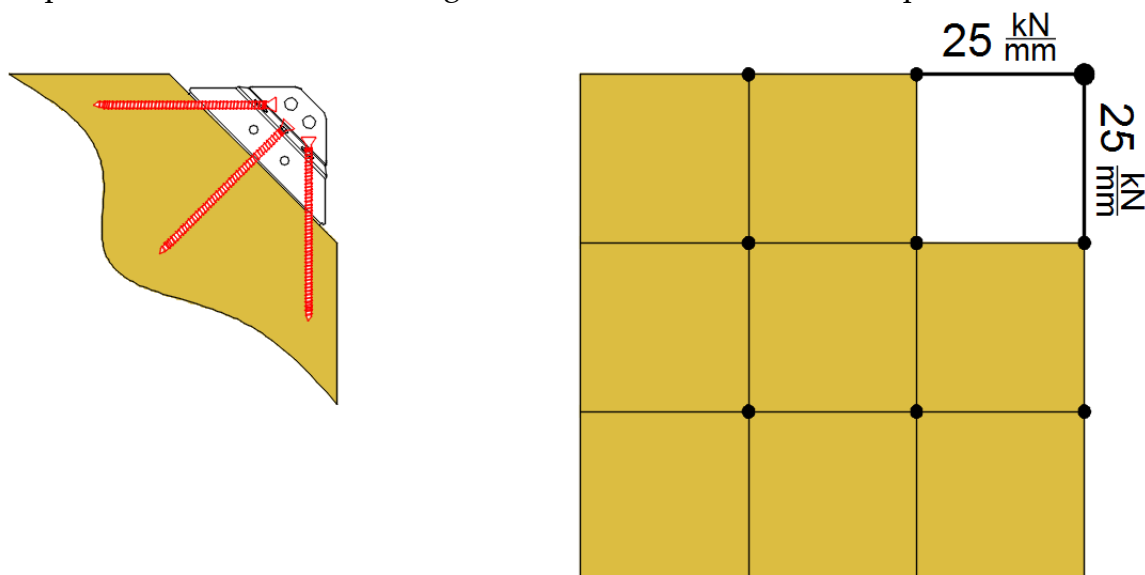


Immagine 5.2: schematizzazione dell'X-One in elementi finiti.

Il pannello viene modellato con elementi di tipo "shell", di materiale isotropo con modulo elastico di 5500 MPa. Questa semplificazione del pannello composto è possibile in quanto la rigidezza del sistema Pannello CLT - X-Rad è governata dalla deformabilità della connessione.



È stato scelto di utilizzare la schematizzazione che comprendesse due elementi di tipo “beam” per il connettore X-One allo scopo di poter associare all’elemento verticale una forza di trazione – compressione e all’elemento orizzontale una forza di taglio.

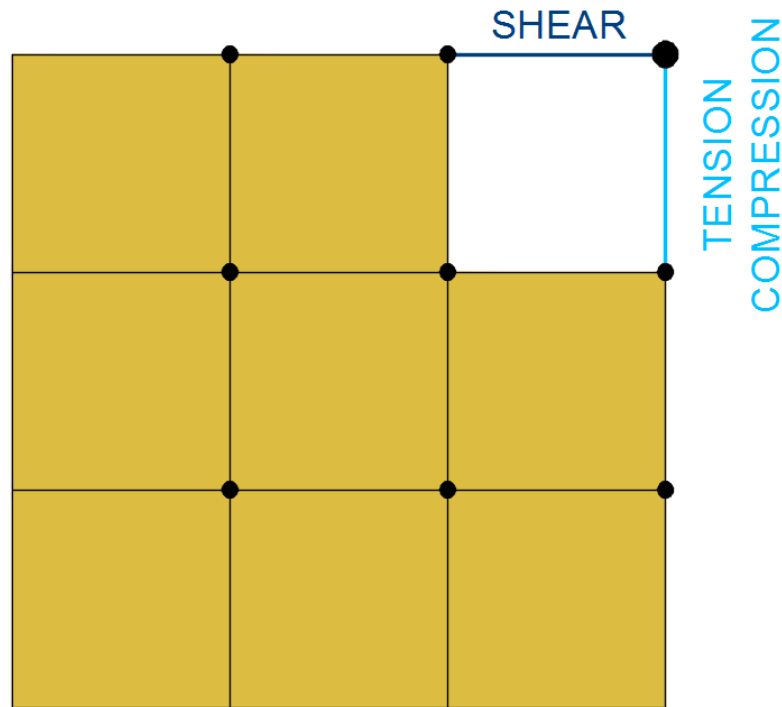


Immagine 5.3: azione associate ai due elementi “beam”.

Per simulare il contatto tra pannello – pannello e tra pannello – fondazione sono state previste delle molle non lineari che hanno rigidità infinita a compressione e nulla a trazione, per simulare un vincolo rispondente solo a compressione.

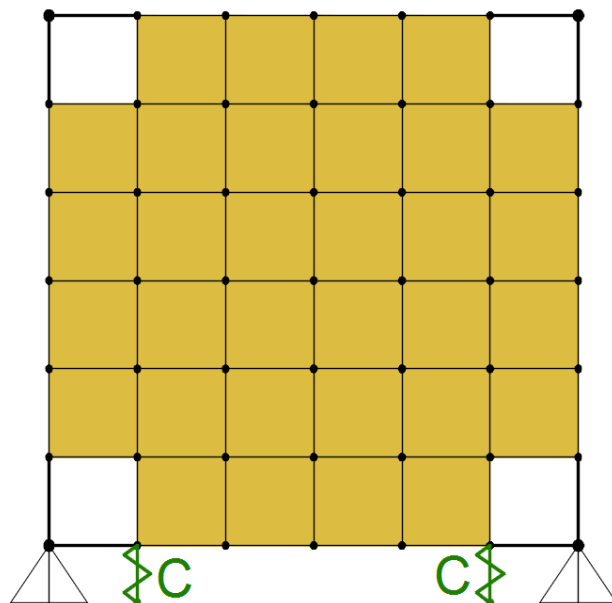


Immagine 5.4: posizionamento delle molle infinitamente rigide a compressione sul pannello.

Le molle vengono posizionate ad ogni estremità del pannello, sia in orizzontale che in verticale.

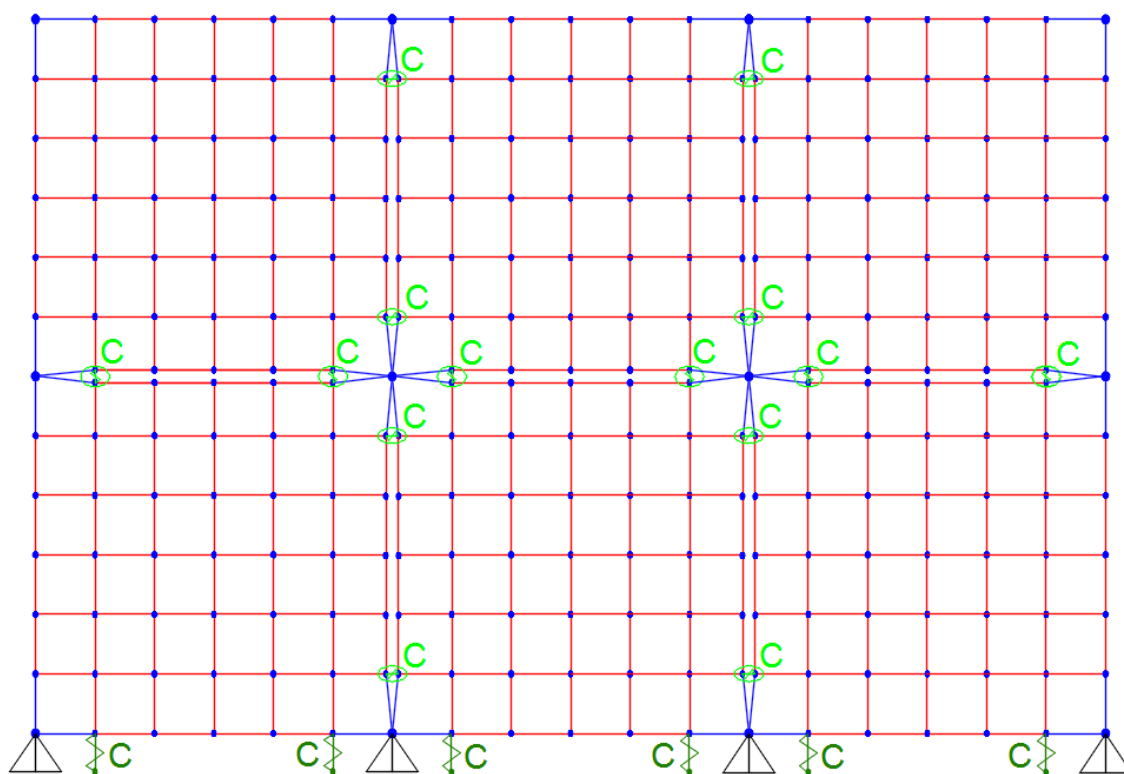


Immagine 5.5: esempio di disposizione delle molle infinitamente rigide a compressione nel sistema di parete.

Per distanziare i pannelli CLT e permettere l'inserimento delle molle orizzontali, verticali, ed impedire la sovrapposizione dei singoli nodi, è necessario introdurre

una leggera inclinazione nelle bielle che simulano il connettore. Tale schematizzazione comporta errori inferiori al 4% in termini di forze sollecitanti su ogni X-Rad, accettabili quindi dal punto di vista ingegneristico<sup>1</sup>.

Per l'utilizzo in sistemi di parete vengono mostrate le quattro configurazioni principali del sistema X-Rad, nel modello ad elementi finiti e la relativa disposizione dei connettori.

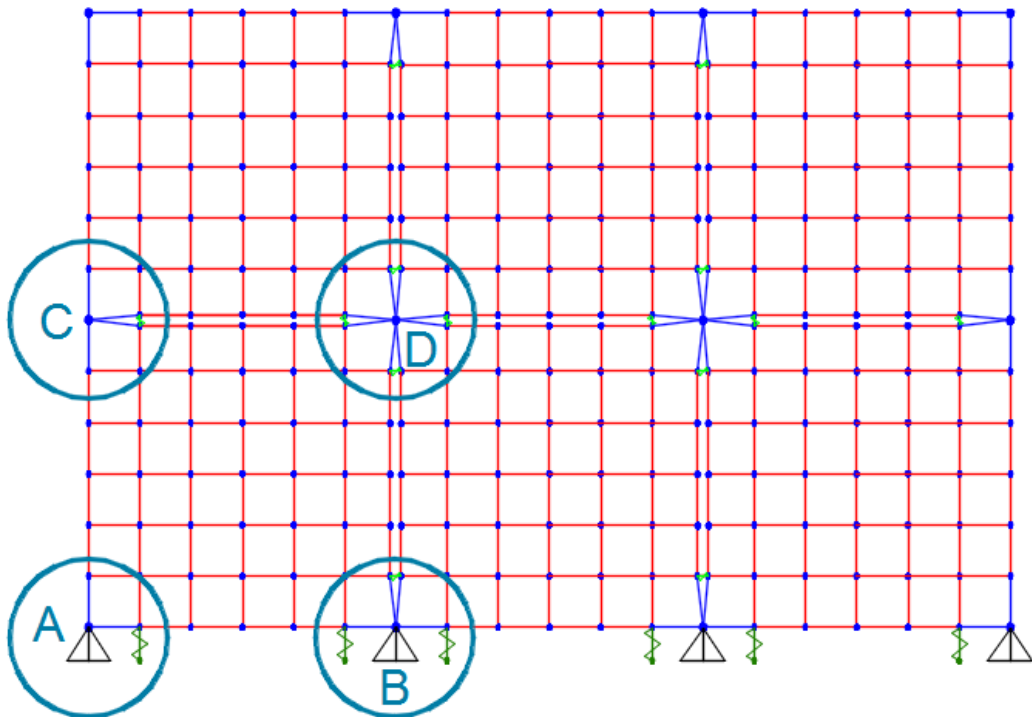


Immagine 5.6: le quattro configurazioni principali per sistemi di parete.

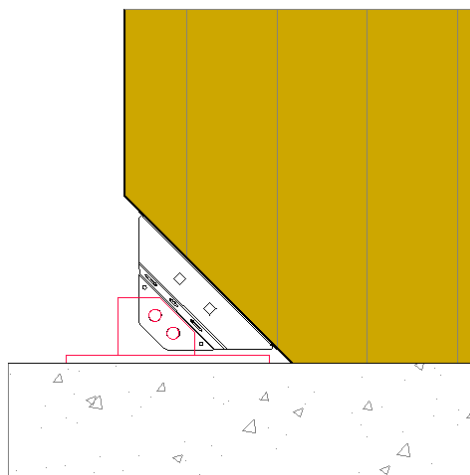
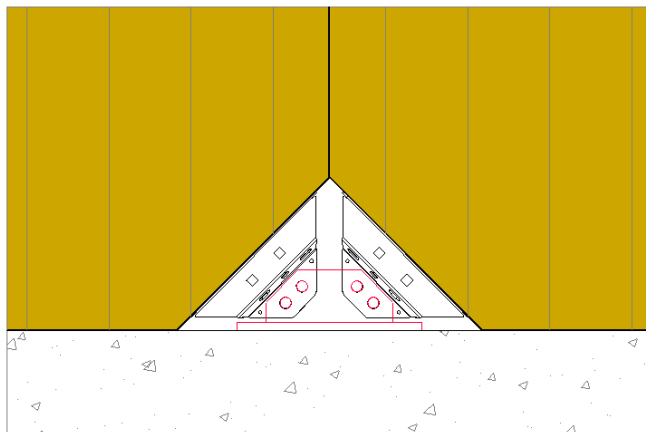
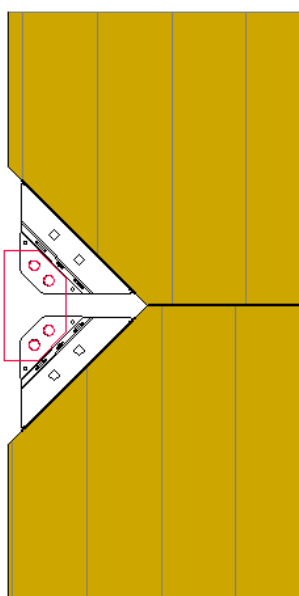


Immagine 5.7: configurazione ad una via, tipo "A".

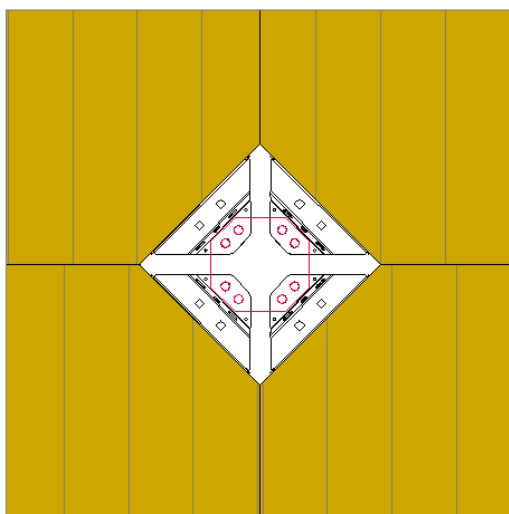
<sup>1</sup> § 4 del documento "Relazione modellazione X-Rad" Web 15/03/2018. Accessibile a < <https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/x-rad/x-plate> >



*Immagine 5.8: configurazione a due vie in orizzontale, tipo "B".*



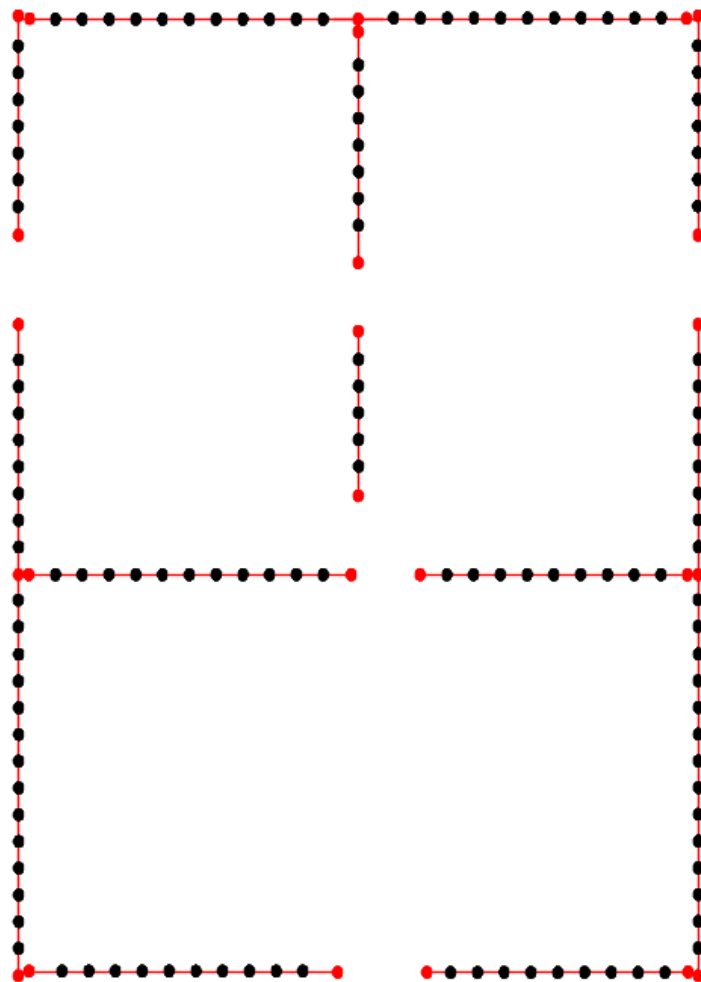
*Immagine 5.9: configurazione a due vie in verticale, tipo "C".*



*Immagine 5.10: configurazione a quattro vie, tipo "D".*

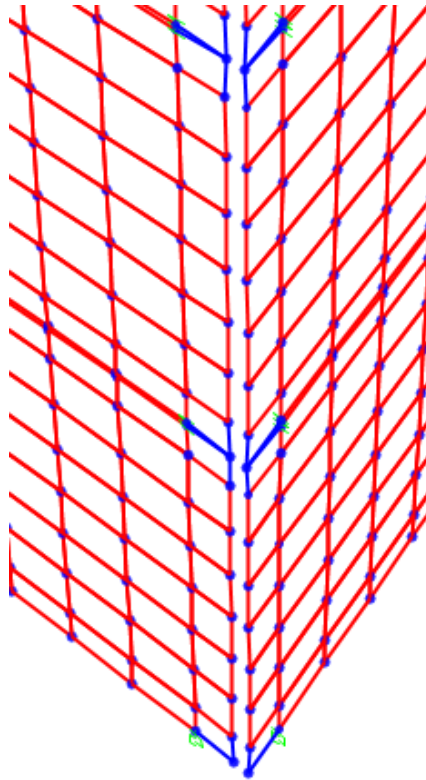
Per ogni orizzontamento devono essere inseriti dei diaframmi rigidi, per conferire a tutti i punti collegati dal solaio lo stesso spostamento. Tale schematizzazione rappresenta il controvento di piano costituito dai pannelli CLT di solaio, opportunamente collegati fra loro.

È importante escludere dal diaframma rigido orizzontale i nodi degli X-Rad. Nella figura seguente i nodi da escludere sono di colore rosso.



*Immagine 5.11: esempio di nodi X-Rad da escludere dal diaframma rigido orizzontale.*

Come si può notare già dall'*Immagine 5.11*, i pannelli disposti perpendicolarmente sono supposti svincolati nella modellazione. Le piastre di collegamento che andranno a collegare i pannelli nella realtà sono inserite come connessioni costruttive fuori dal calcolo.



*Immagine 5.12: svincolo dei pannelli perpendicolari.*

Per quanto riguarda l'inserimento dei carichi è possibile:

- inserire direttamente i carichi nei nodi degli elementi *shell* delle pareti sulle quali scaricano i solai;
- definire degli elementi *beam* svincolati a momento che fungono da travi porta carico.

Anche per la modellazione di eventuali travi o architravi è possibile utilizzare elementi *beam* svincolati a momento.

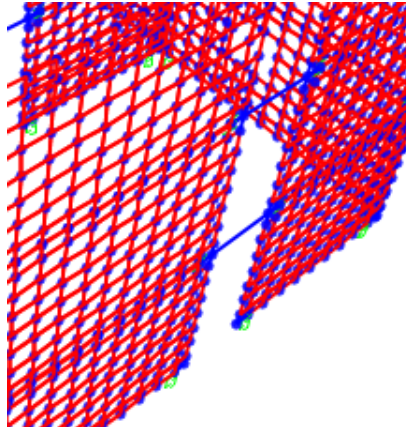


Immagine 5.13: esempio di modellazione di architravi.

Le sollecitazioni vengono poi ricavate dalle singole aste che compongono il sistema X-Rad.

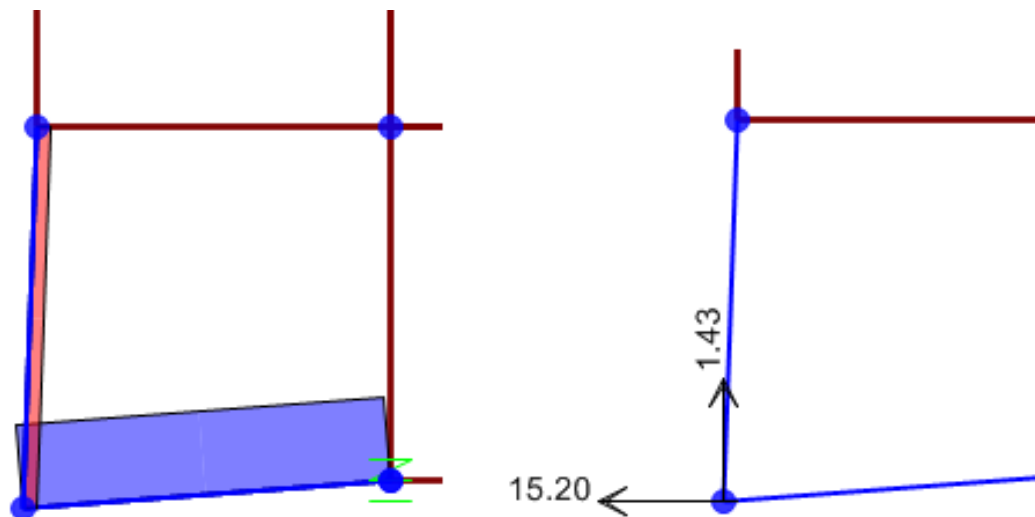


Immagine 5.14: esempi di deduzione delle sollecitazioni sul sistema X-Rad.

## 5.2 MODELLAZIONE DELLA PARETE SINGOLA

Per l'implementazione della singola parete si è scelto di partire dall'importazione di un semplice file DXF realizzato in AutoCad.

Questo in quanto permette di semplificare le operazioni di disegno, velocizzando l'inserimento della struttura, con vantaggi differenti a seconda del software utilizzato.

Trattandosi la parete non di un quadrilatero, ma di una superficie racchiusa da una polilinea spezzata è stato necessario suddividere la singola parete in più parti, allo scopo di ricondursi ad una geometria quadrilatera.

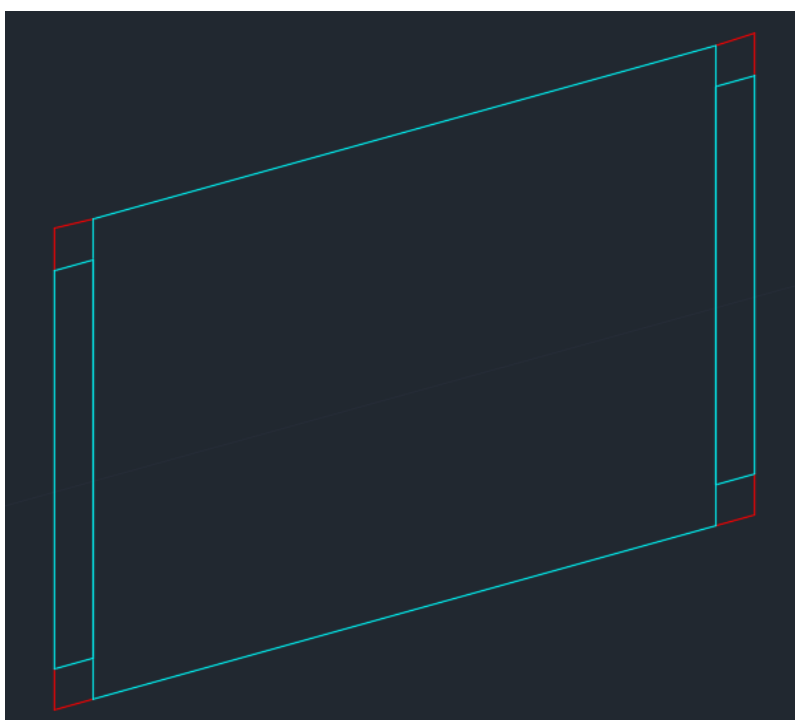


Immagine 5.15: schema utilizzato per il disegno della parete singola in AutoCad.

### 5.2.1 Parete singola in Midas Gen 2018

#### *Geometria*

Lo schema utilizzato per il disegno della parete in AutoCad consente in Midas Gen il riconoscimento delle geometrie: le linee utilizzate per il disegno delle bielle X-Rad vengono correttamente riconosciute come elementi *beam*, le superfici rettangolari in cui è stata suddivisa la parete vengono correttamente riconosciute come elementi *shell*.



In fase di importazione del file DXF in Midas Gen è possibile quindi assegnare ad ogni *layer* le corrispondenti e corrette proprietà, quali il materiale di elementi *plate* e *beam* e la sezione degli elementi *beam*, come indicato al § 5.1.

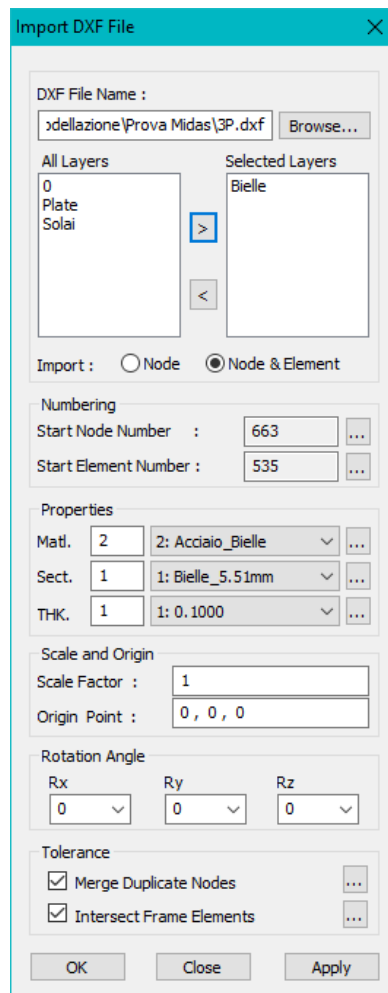
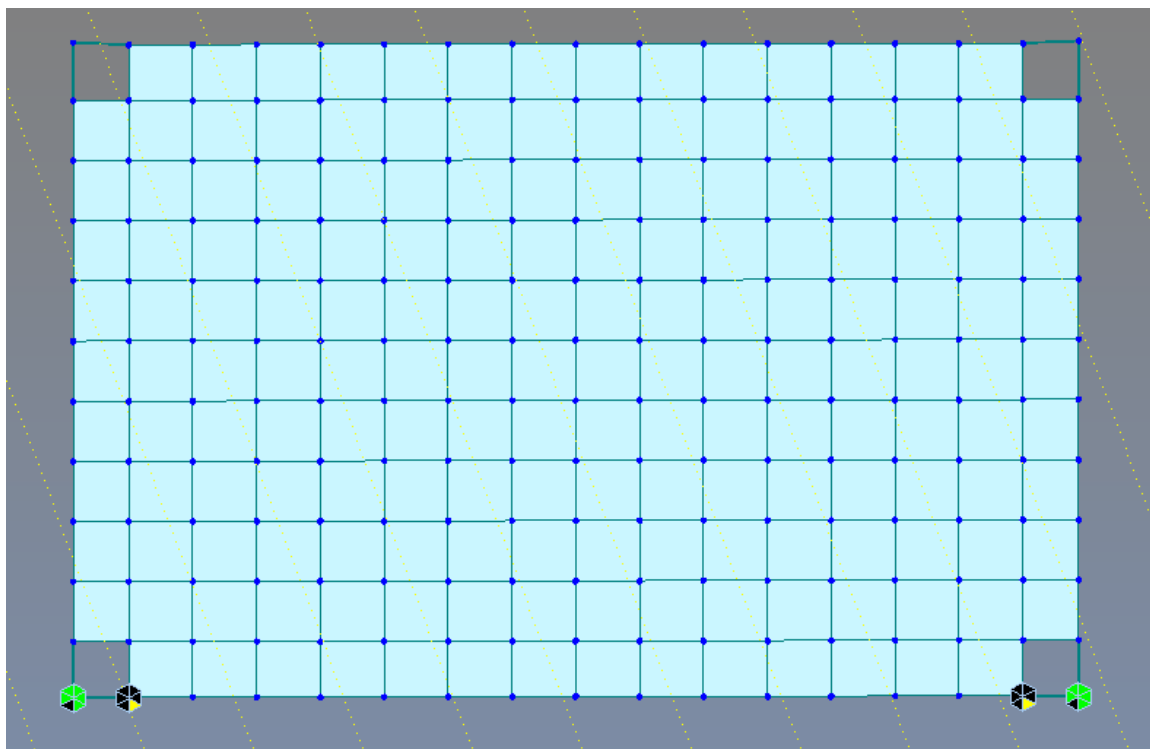


Immagine 5.16: definizione delle proprietà in fase di importazione del DXF.

### Vincoli

Successivamente si è provveduto all'*AutoMesh* della parete con quadrilateri di 30 cm di lato, all'inserimento delle condizioni di vincolo, secondo lo schema indicato in precedenza, con vincoli a cerniera in corrispondenza della connessione X-Rad e vincoli reagenti a sola compressione con rigidità infinita agli estremi inferiori del pannello.



*Immagine 5.17: parete vincolata in Midas Gen.*

È importante sottolineare come quest'ultima tipologia di vincolo visualizzata in giallo nell'Immagine 5.17, denominata nel software *Point Spring Supports*, sia presente nativamente all'interno del programma, e consente di assegnare non solo la rigidità del vincolo in una determinata direzione, ma anche di poter rispondere a sola compressione o sola trazione, quindi in un determinato verso, con rigidità assegnata.

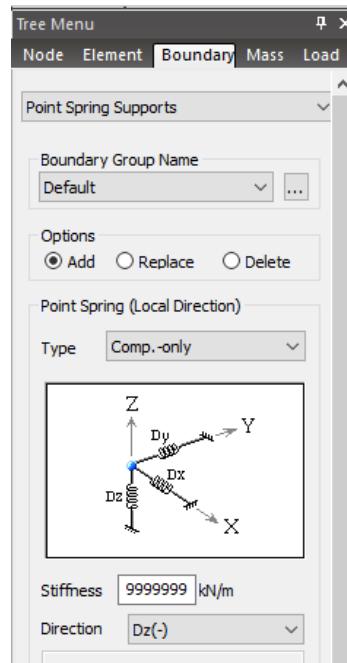


Immagine 5.18: inserimento del vincolo Point Spring Supports.

### Carico di prova verticale

Per quanto riguarda l'assegnazione del carico di prova verticale, è stato inserito un carico verticale lineare di 10 KN/m sul bordo degli elementi *shell*, escludendo così il nodo X-Rad dal carico.

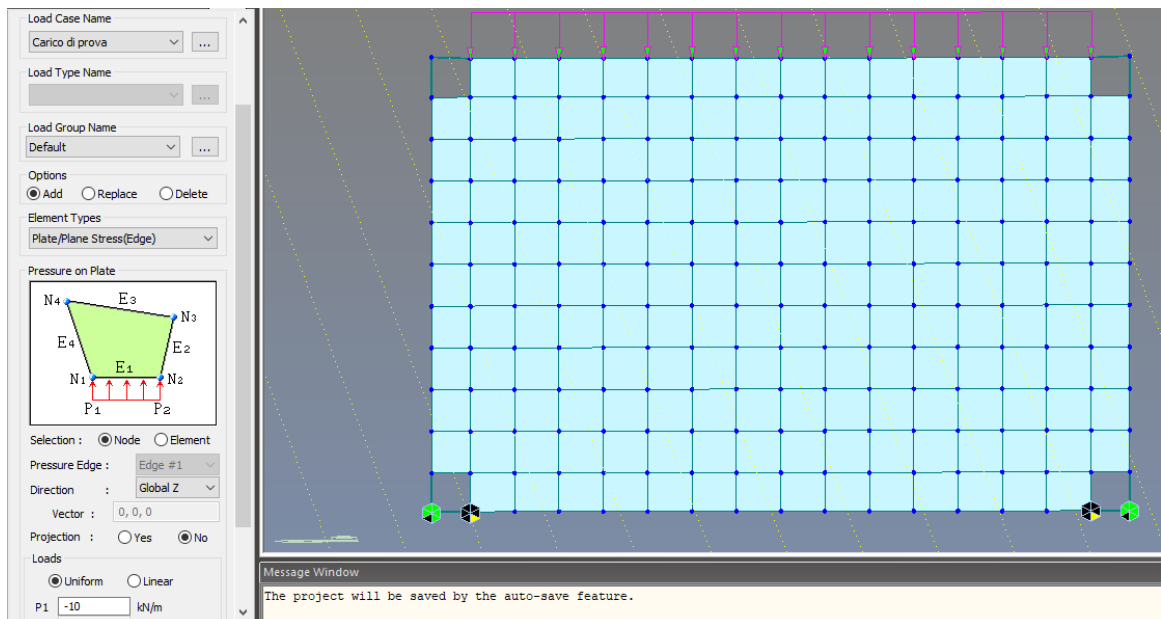


Immagine 5.19: inserimento corretto del carico verticale in Midas Gen.

Nonostante il carico sia di tipo *Pressure Load*, esso con la specifica *Plane Stress/Edge* può essere utilizzato per caricare una superficie sullo spigolo, in modo da essere utilizzato come carico lineare su elementi *shell*.

In questo modo il carico lineare viene discretizzato in forze concentrate sui singoli nodi della *mesh* della superficie, come rappresentato nell'Immagine 5.18.

A seguito dell'analisi viene quindi visualizzato il diagramma delle sollecitazioni assiali sulle aste del sistema X-Rad.

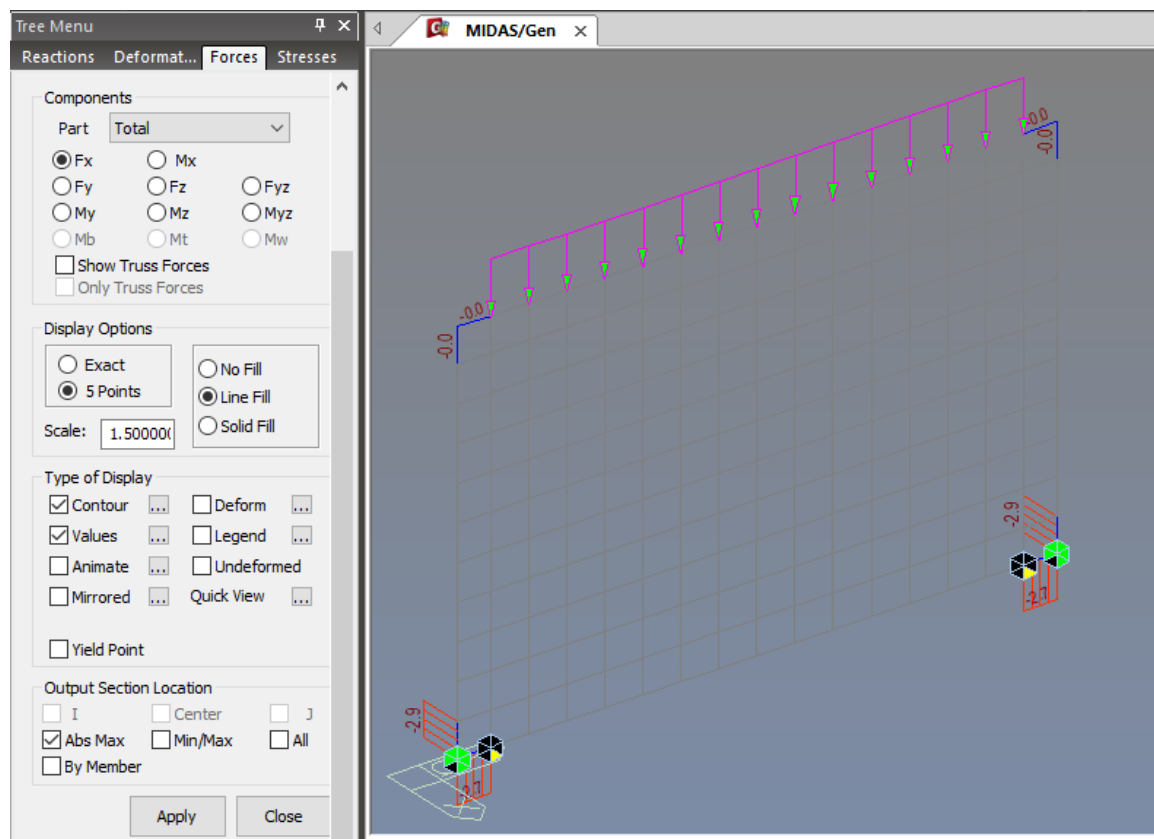


Immagine 5.20: sollecitazioni sugli elementi beam rappresentanti il sistema X-Rad.

### Carico di prova orizzontale

Successivamente di è provveduto all'inserimento di un carico di prova orizzontale concentrato di 50 KN in sommità della parete, allo scopo di verificare la corretta gestione del vincolo *Point Spring Supports* rappresentante l'appoggio della parete in fondazione.

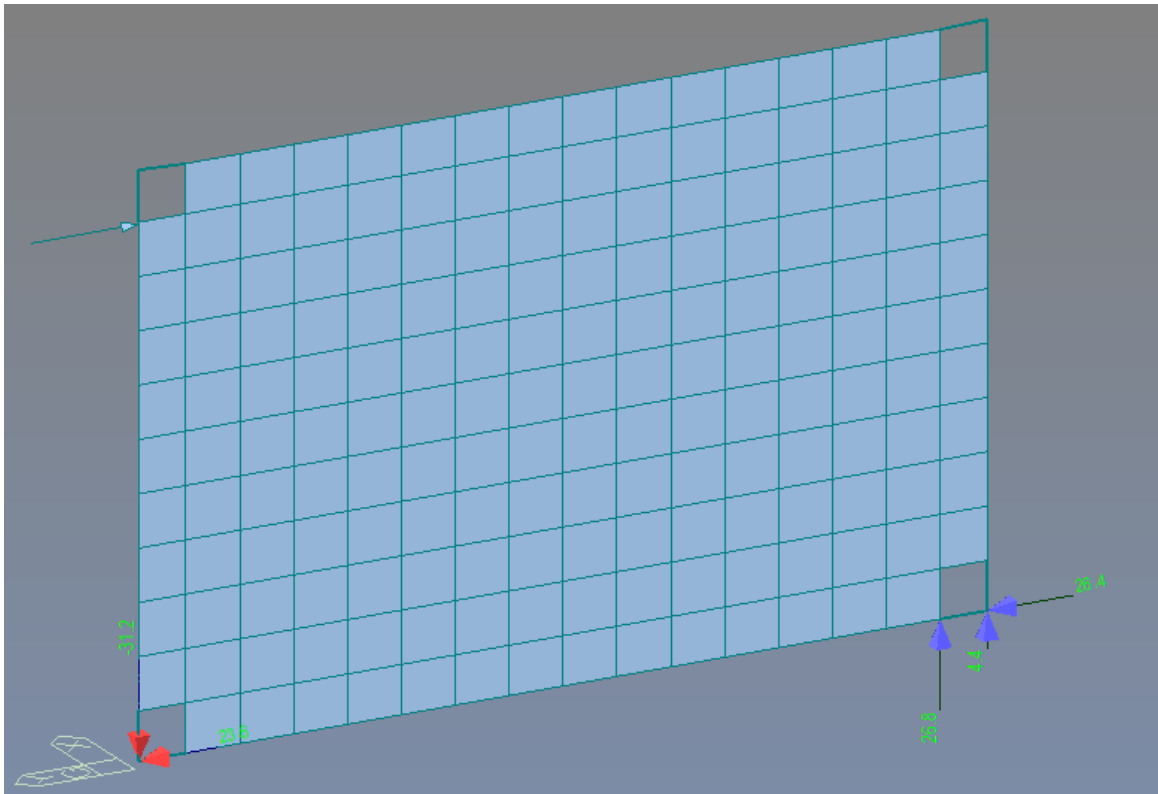


Immagine 5.21: reazioni vincolari per il carico concentrato orizzontale.

Correttamente il vincolo reagente a sola compressione posto sul lato di applicazione della forza non fornisce contributo di resistenza a trazione, che grava quindi sul vincolo esterno appartenente all'X-Rad, sollecitando gli elementi *beam* appartenenti ad esso. Il vincolo *Point Spring Supports* sul lato opposto risulta correttamente reagente a compressione.

### 5.2.2 Parete singola in Sismicad 12

A differenza del software Midas Gen, Sismicad è un software di calcolo strutturale ad elementi finiti con interfaccia tridimensionale.

La modellazione non avviene quindi direttamente ad elementi finiti, ma attraverso elementi reali quali travi in acciaio, pareti in legno, ancoraggi, di cui viene successivamente ed automaticamente creata la *mesh*.

#### *Geometria*

In Sismicad le geometrie non vengono automaticamente convertite in elementi tridimensionali. Esse sono importate come linee di riferimento da cui tracciare gli elementi tridimensionali direttamente all'interno del software.

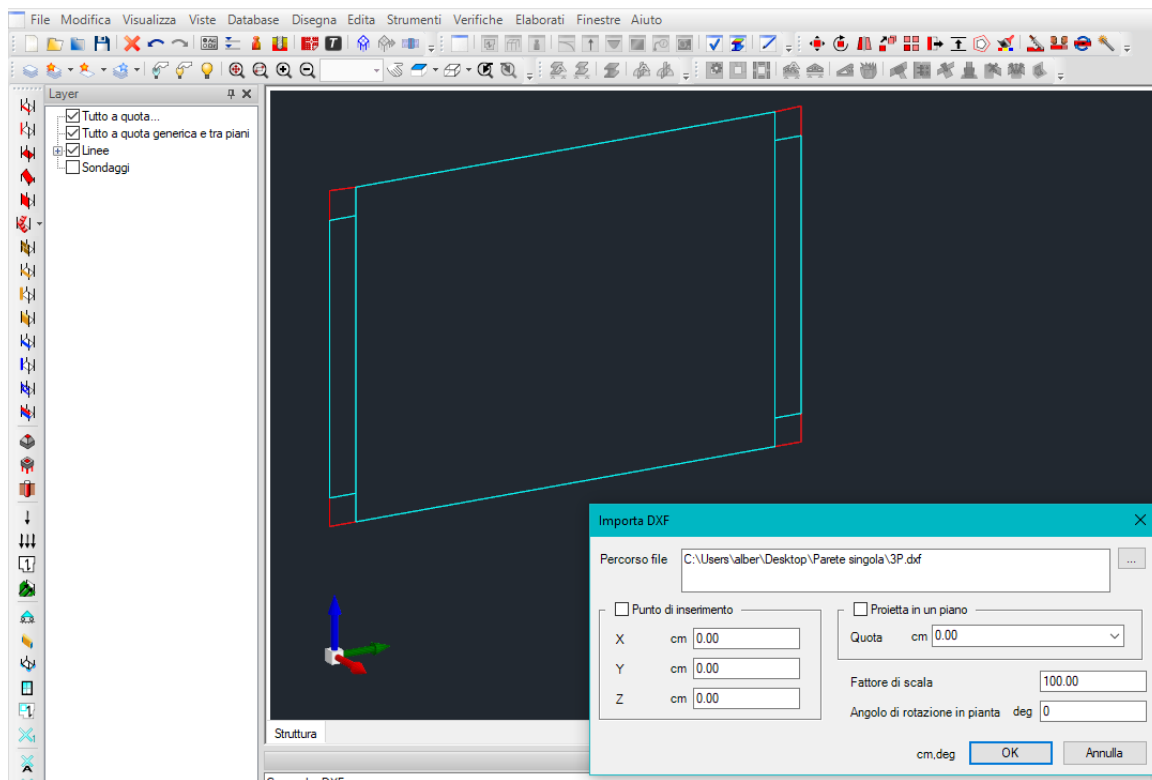


Immagine 5.22: importazione della geometria della parete in Sismicad.

Sono quindi necessarie due operazioni successive per poter operare sugli elementi tridimensionali:

- *conversione entità* per le bielle del sistema X-Rad, trattandosi di linee possono essere convertite direttamente in elementi trave;
- disegno delle *pareti in legno*.

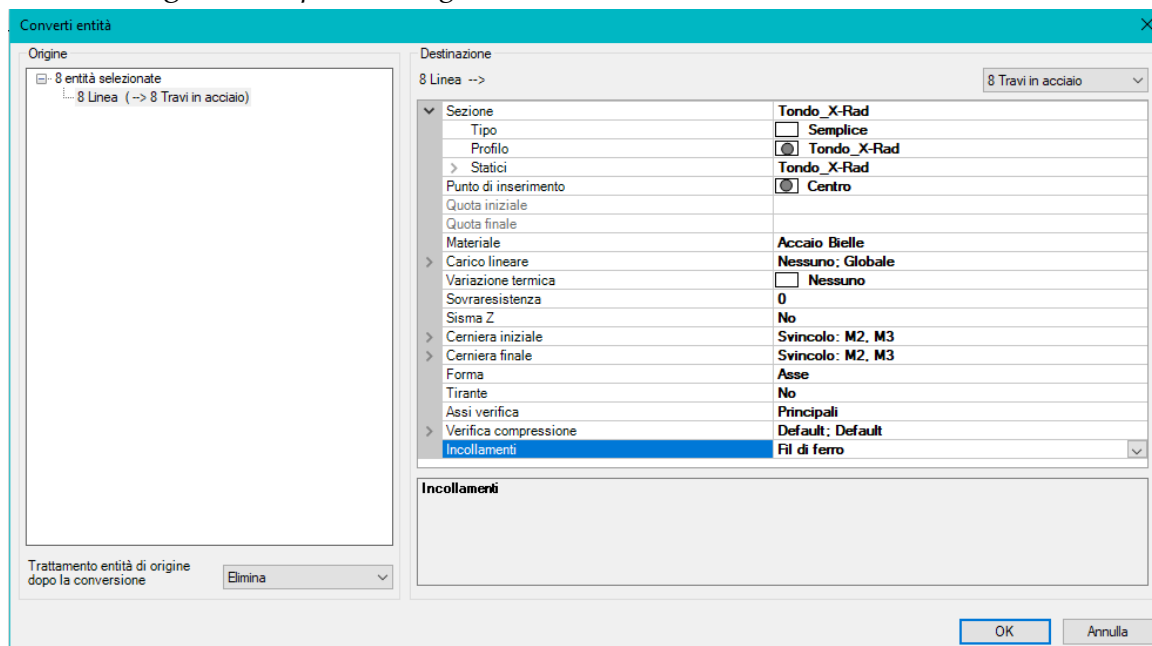


Immagine 5.23: converti entità per linee in Sismicad.

Come si può notare nell'*Immagine 5.23*, la sezione utilizzata per le bielle d'acciaio è di tipo *Tondo*. Questo in quanto non è disponibile in Sismicad una tipologia di sezione quadra piena, ma solamente di tipo cavo, di cui era possibile azzerare la dimensione della cavità.

Non avendo la certezza della correttezza dell'assunzione, si è optato per una sezione circolare del diametro di  $6.21 \text{ mm}$ , allo scopo di ottenere la corretta rigidità di  $25 \text{ KN/mm}$ .

Trattandosi di un software ad elementi tridimensionali Sismicad è in grado di gestire le connessioni, nel software definiti *incollamenti*, attraverso l'adiacenza di facce e la compenetrazione di solidi.

Essendo la guida per la modellazione definita in modo molto preciso attraverso elementi finiti, si è scelto di trattare anche Sismicad nel modo più vicino possibile ad un software ad elementi finiti, definendo quindi le pareti con la sola superficie FEM associata, le travi con il solo asse e gli incollamenti solo attraverso il collegamento fra questi due tipi di elementi, e non fra i solidi reali.

Prima di poter modellare le *pareti in legno*, è necessario definire i *livelli* nel modello, rappresentanti piani orizzontali solitamente utilizzati per definire la quota dei piani dell'edificio<sup>2</sup>, ed i *tronchi* ovvero l'intervallo fra due quote altimetriche su cui definire gli elementi tridimensionali verticali.

Essendo la parete a cui sono collegati gli X-Rad una geometria complessa è necessario definire tre pareti in legno per ogni parete reale in CLT, nella stessa modalità di disegno impiegata in AutoCad per il disegno del file DXF dell'*Immagine 5.15*.

È stato scelto il disegno delle tre pareti affiancate in verticale allo scopo di minimizzare il numero di tronchi necessari a definire la geometria della parete.

In ogni caso per ogni *tronco* reale, costituito fra due *livelli* reali, è necessario con questa schematizzazione definire due *tronchi* e quattro *livelli*.

---

<sup>2</sup> Manuale d'uso Sismicad 12.9

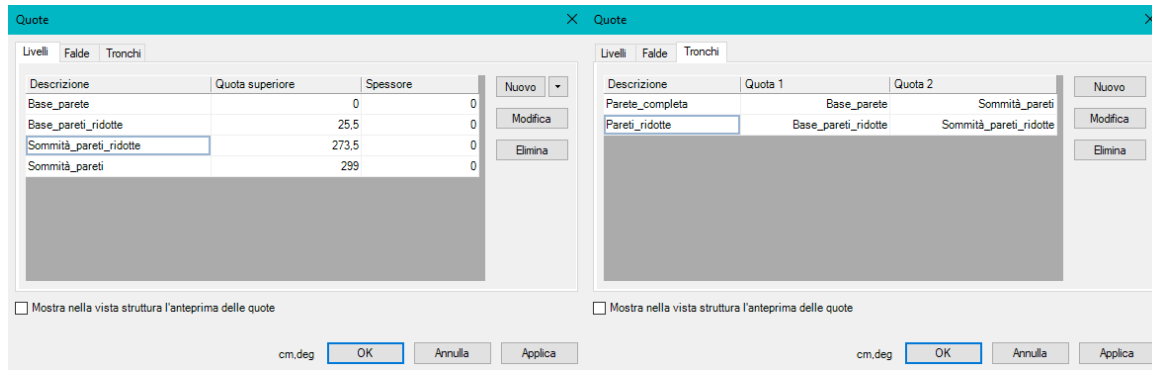


Immagine 5.24: definizione dei livelli e dei tronchi in Sismicad.

Ora è possibile procedere all’inserimento delle pareti.

Trattandosi di elementi tridimensionali reali in fase di inserimento delle pareti è necessario definire anche le caratteristiche dei bordi delle pareti.

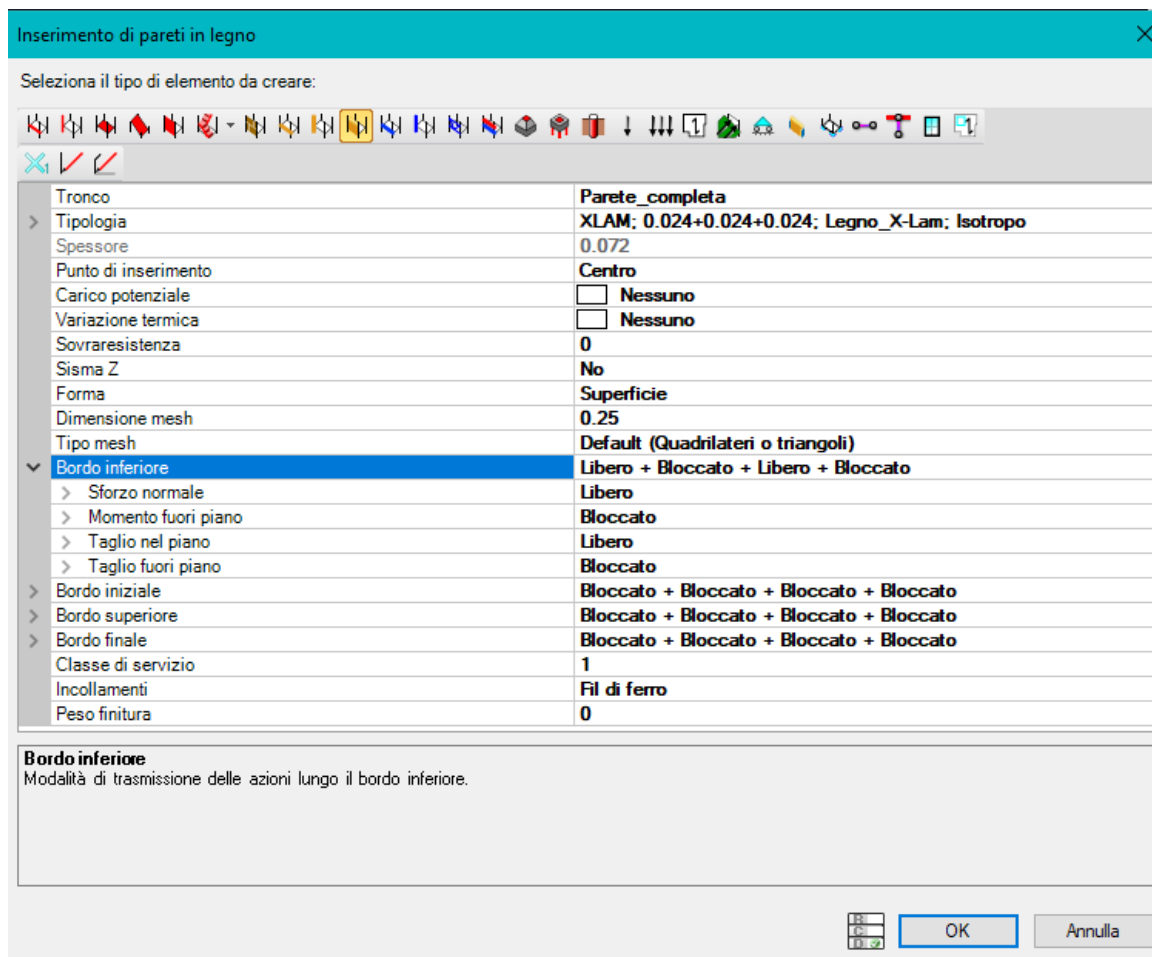


Immagine 5.25: inserimento di pareti in legno in Sismicad.

Come si può vedere nell’immagine sovrastante è necessario utilizzare un tronco precedentemente definito per l’inserimento della parete.



### *Vincoli*

La gestione dei vincoli sui bordi della parete avviene in questo modo:

- se la componente è specificata come bloccata il software in fase di *mesh* provvederà a vincolare i nodi appartenenti a quel bordo per quella specifica sollecitazione;
- se la componente è specificata come libera il software non inserirà alcun vincolo in fase di *mesh*;

Esistono altre possibilità di vincolo per i bordi della parete, in relazione al bordo in esame ed alla sollecitazione quali appoggio, appoggio cedevole, appoggio e trazione, elastico, elastoplastico simmetrico.

È possibile inserire vincoli esterni di cui gestire separatamente i sei gradi di libertà disponibili, potendo anche assegnare una determinata rigidità.

Non è possibile però inserire un vincolo esterno non lineare, che sia in grado di rispondere a compressione ma non a trazione.

Questa tipologia di vincolo è inseribile solamente se applicata all'intero bordo della parete, non rispondendo però alla schematizzazione della parete suggerita da Rothoblaas.

Vengono quindi inseriti agli estremi della parete i due vincoli a cerniera riguardanti l'X-Rad.

Per quanto riguarda gli appoggi della parete sono stati inseriti per il momento dei vincoli in grado di rispondere alle sollecitazioni verticali sia a compressione che a trazione, allo scopo di verificare la correttezza della modellazione.

### *Carico di prova verticale*

Nei riguardi del carico verticale la scelta del vincolo rispondente anche a trazione per la parete in legno non sortisce alcun effetto. Se corretta la modellazione infatti la parete all'interfaccia con la fondazione sarà soggetta a forze di sola compressione.

Viene inserito quindi lo stesso carico lineare in sommità alla parete di 10 KN/m.

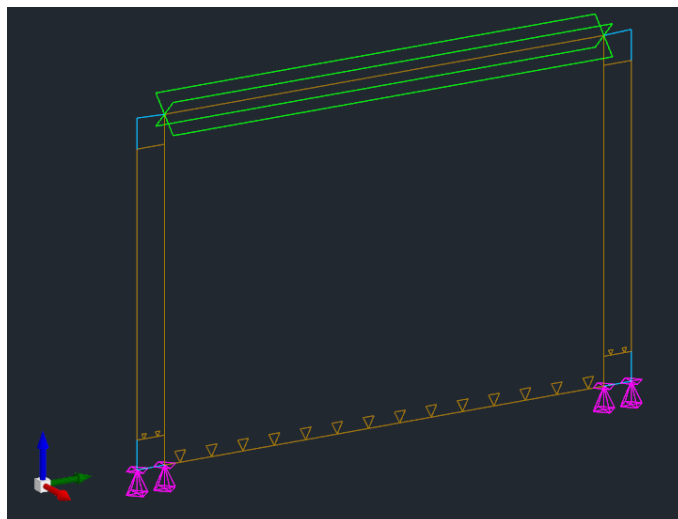


Immagine 5.26: parete modellata in Sismicad con vincoli di parete rispondenti anche a trazione.

Sarebbe stato altrimenti possibile definire il bordo inferiore della parete come soggetto ad un vincolo di appoggio. In questo modo la reazione vincolare sarebbe stata distribuita su tutti i vincoli creati ad ogni nodo sul bordo della *mesh*, dando luogo ad un risultato non scorretto, ma non rispondente alla schematizzazione proposta da Rothoblaas.

Si ottiene quindi la vista delle sollecitazioni assiali sulle singole bielle. I valori mostrati nella vista risultano essere arrotondati, ma nella finestra di dettaglio è possibile visualizzare i valori al secondo decimale.

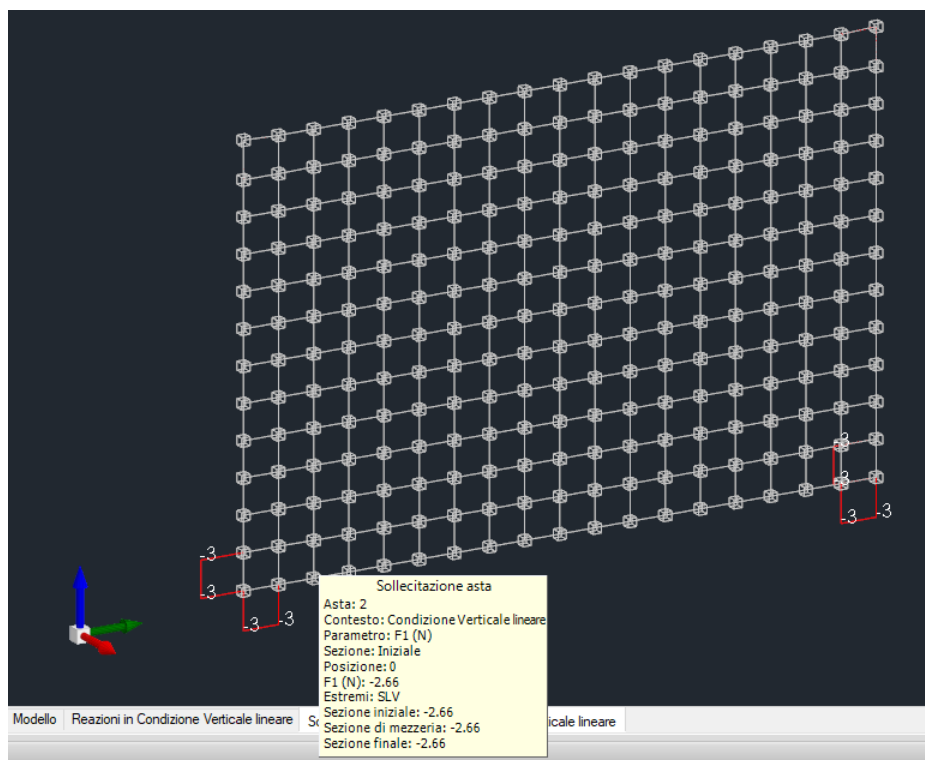


Immagine 5.27: sollecitazioni sulle bielle dovute al carico verticale.

*Prova di carico orizzontale*

Prima di procedere all'inserimento del carico concentrato orizzontale è stato necessario risolvere la problematica delle condizioni di vincolo della parete.

Non essendo disponibile un tipo di vincolo in grado di rispondere solamente a trazione si è provveduto ad inserire due bielle verticali ai bordi della parete in legno. Questo allo scopo di provare a creare un materiale di tipologia acciaio non lineare, non rispondente a trazione, assegnando una rigidezza del valore massimo a compressione e trascurabile a trazione.

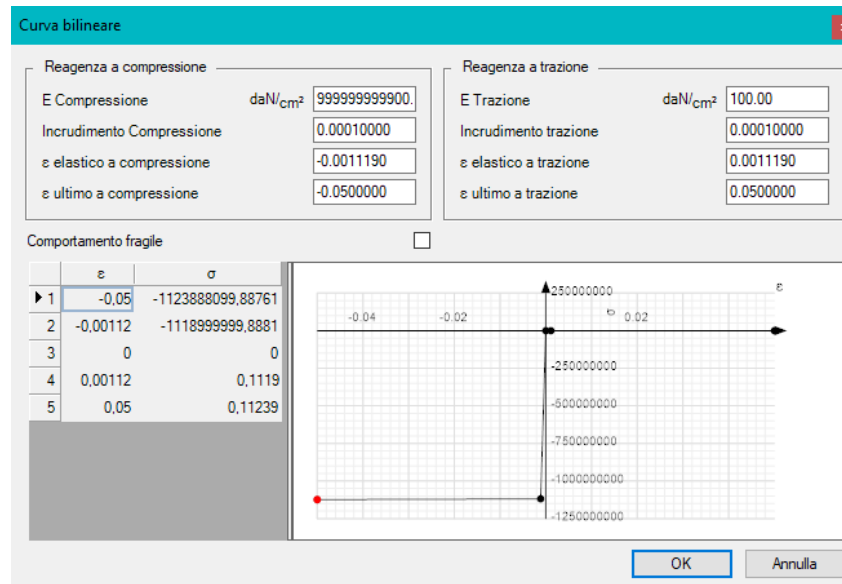


Immagine 5.28: definizione di un materiale non lineare in Sismicad.

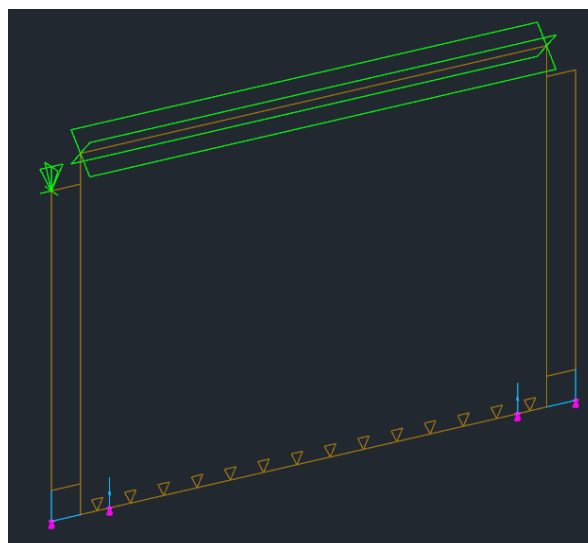


Immagine 5.29: schema utilizzato per la nuova parete in Sismicad.

Sismicad però utilizza queste informazioni solamente durante le operazioni di verifica degli elementi, non in fase di modellazione e di analisi.

Si è quindi provato a percorrere un'altra strada, utilizzando delle cerniere plastiche per vincolare gli estremi dei nuovi elementi *beam* inseriti. In questo modo è stato possibile scegliere i valori minimi e massimi per la sollecitazione interessata per la quale la cerniera risultasse non rispondente.

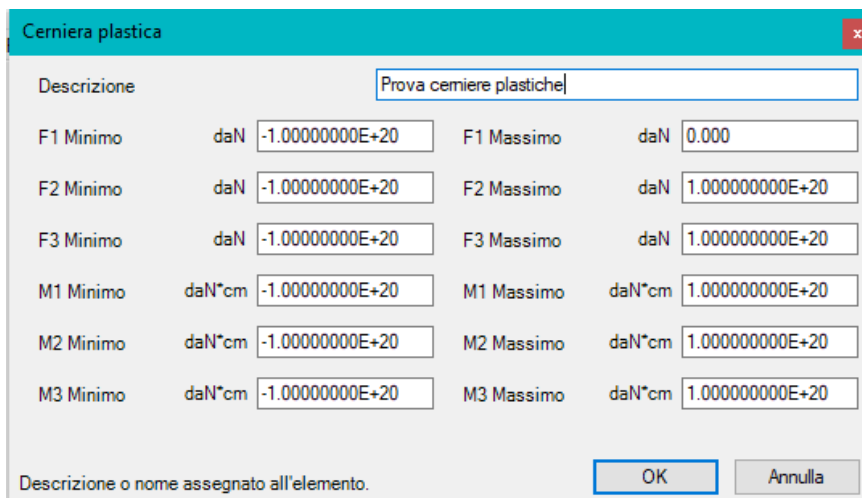


Immagine 5.30: inserimento delle cerniere plastiche.

Imponendo  $F1\ Massimo = 0$ , ovvero la forza per la quale svincolare la cerniera per quella sollecitazione, è stato possibile ottenere la non reazione degli elementi *beam* inseriti a trazione.

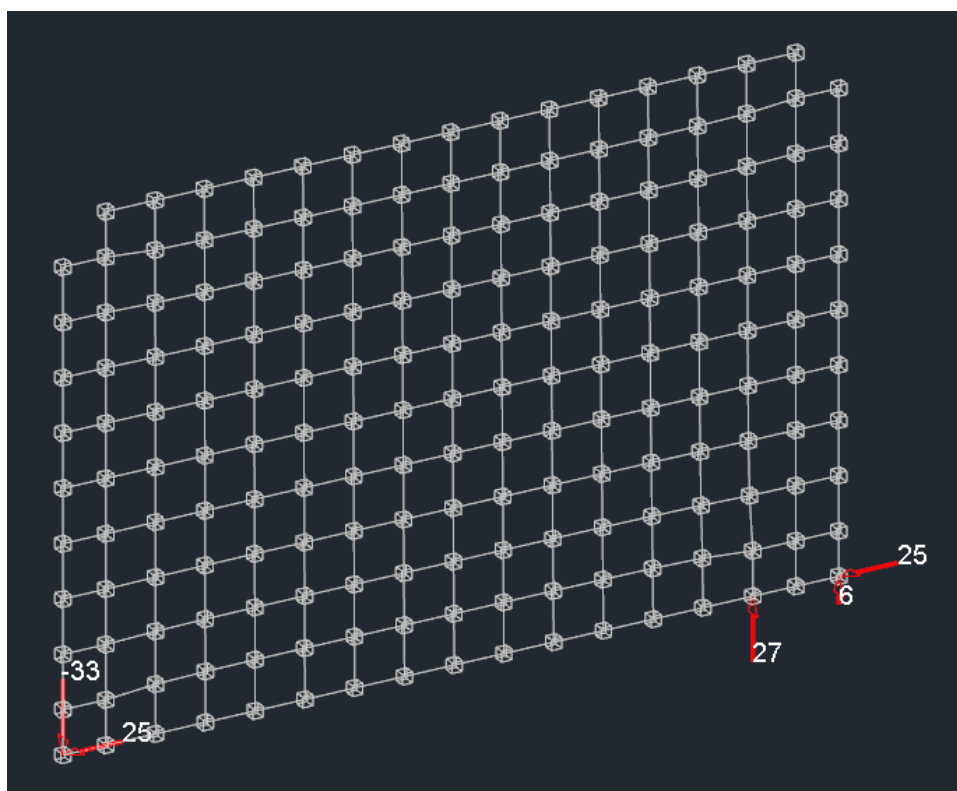
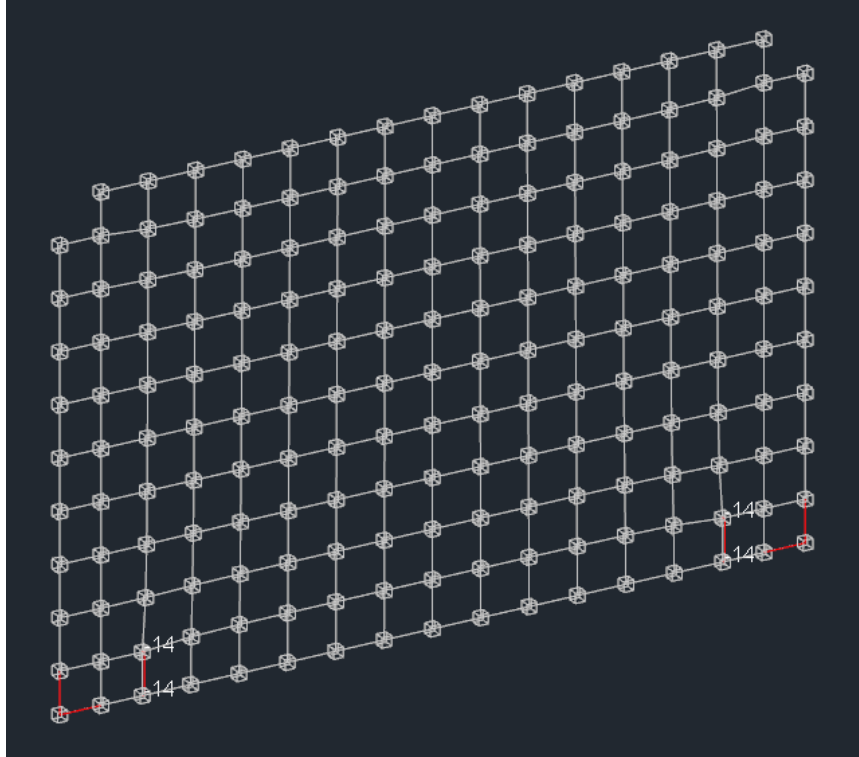


Immagine 5.31: reazioni vincolari per carico orizzontale.

### 5.2.3 Confronto fra i risultati per la parete singola fra i software Midas Gen 2018 e Sismicad 12

Dopo aver formulato la nuova schematizzazione per i carichi orizzontali in Sismicad si è esportato anche una vista delle sollecitazioni sulle aste componenti il sistema dovute al carico verticale precedentemente inserito.



*Immagine 5.32: sollecitazioni sulle aste dovute al carico verticale lineare nella nuova configurazione.*

Confrontandole con le sollecitazioni risultanti dalla prima configurazione nell'*Immagine 5.28*, si nota come sia cambiata la distribuzione delle sollecitazioni. Confrontando quindi le sollecitazioni sulle aste nella prima configurazione con le sollecitazioni sulle aste ricavate dalla parete modellata in Midas Gen nell'*Immagine 5.20*, si può subito notare come risultassero sostanzialmente equivalenti. Anche il confronto fra le reazioni vincolari fra queste configurazioni restituisce risultati positivi.

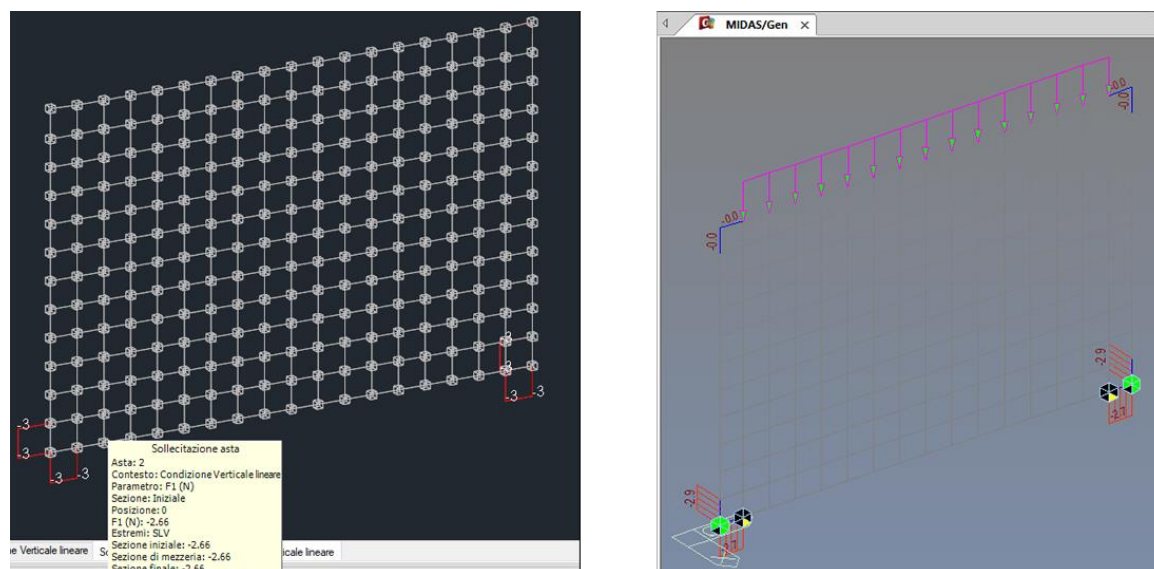


Immagine 5.33: confronto fra le sollecitazioni sulle aste ricavate dai due software, Sismicad 12 a sinistra, Midas Gen 2018 a destra.

Avendo assunto come corretti i risultati ottenuti in questa configurazione, risultati molto simili fra i due software di calcolo, si è scelto di non proseguire con la modellazione del caso studio proposto da Rothoblaas in Sismicad, in quanto è stata ritenuta eccessiva la disparità fra i risultati ottenuti con la seconda configurazione e la prima, dovute alle varie schematizzazioni necessarie a raggiungere la modellazione dei vincoli indicata per il componente X-Rad.

### 5.3 MODELLAZIONE DEL CASO STUDIO

Per la modellazione di un edificio completo si è scelto di far riferimento al caso studio indicato nella guida Rothoblaas per la modellazione, allo scopo di poter confrontare i risultati ottenuti per verificarne la correttezza.

Si tratta di un edificio a pianta rettangolare di tre piani fuori terra, ciascuno dell'altezza di 3 m con copertura piana e X-Rad presenti ad ogni angolo dei pannelli CLT.

Per i carichi si sono definiti:

- peso proprio + permanente portato impalcati: 3.5 KN/m<sup>2</sup>;
- peso proprio + permanente portato pareti: 1.0 KN/m<sup>2</sup>;
- carico accidentale impalcati: 2.0 KN/m<sup>2</sup>.

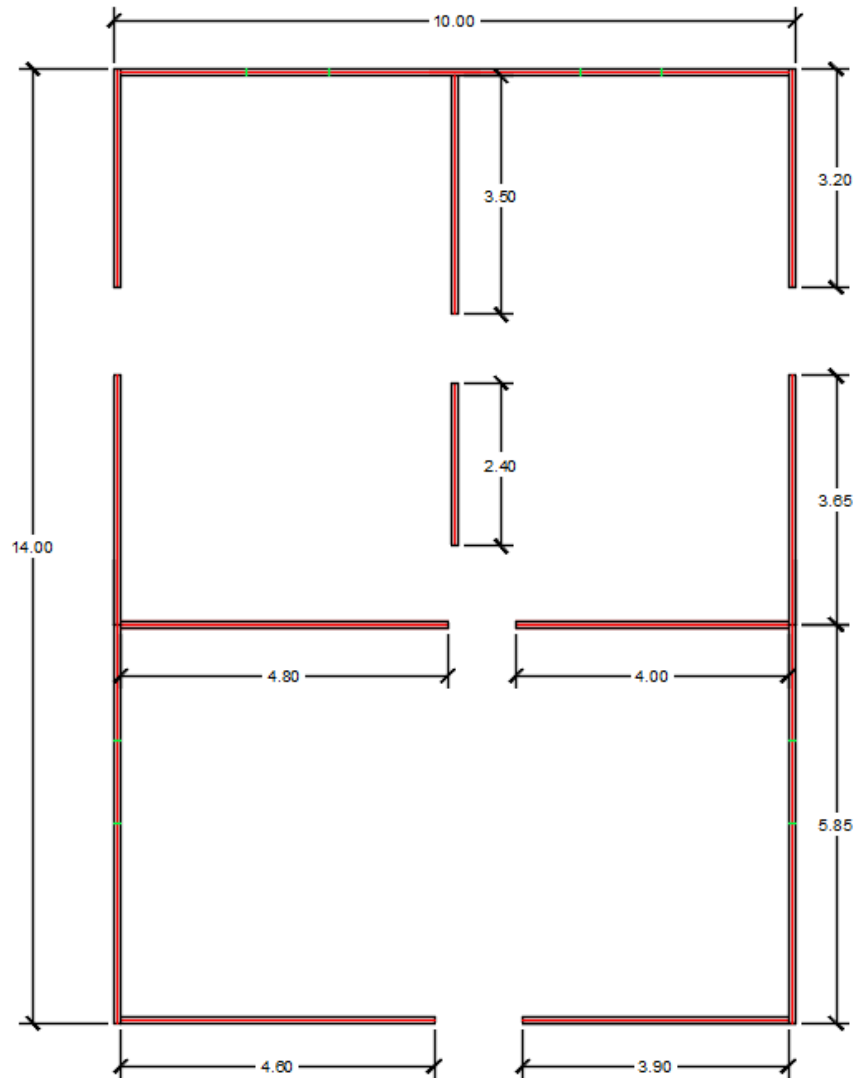


Immagine 5.34: geometria delle pareti utilizzate per il caso studio.

### 5.3.1 Implementazione del caso studio in Midas Gen 2018

Per l'importazione della geometria si è utilizzato, come per la parete singola, un file DXF di riferimento per agevolare l'importazione, con le stesse modalità per l'applicazione delle proprietà viste per la parete singola.

Già dal disegno del file DXF sono stati utilizzati dei criteri che possano essere replicabili, in modo da consentire un'automazione del processo.

Come si può notare nell'Immagine 5.35, nei giunti d'angolo fra pareti CLT esiste sempre una parete che appoggia con il suo lato corto alla faccia di un'altra parete.

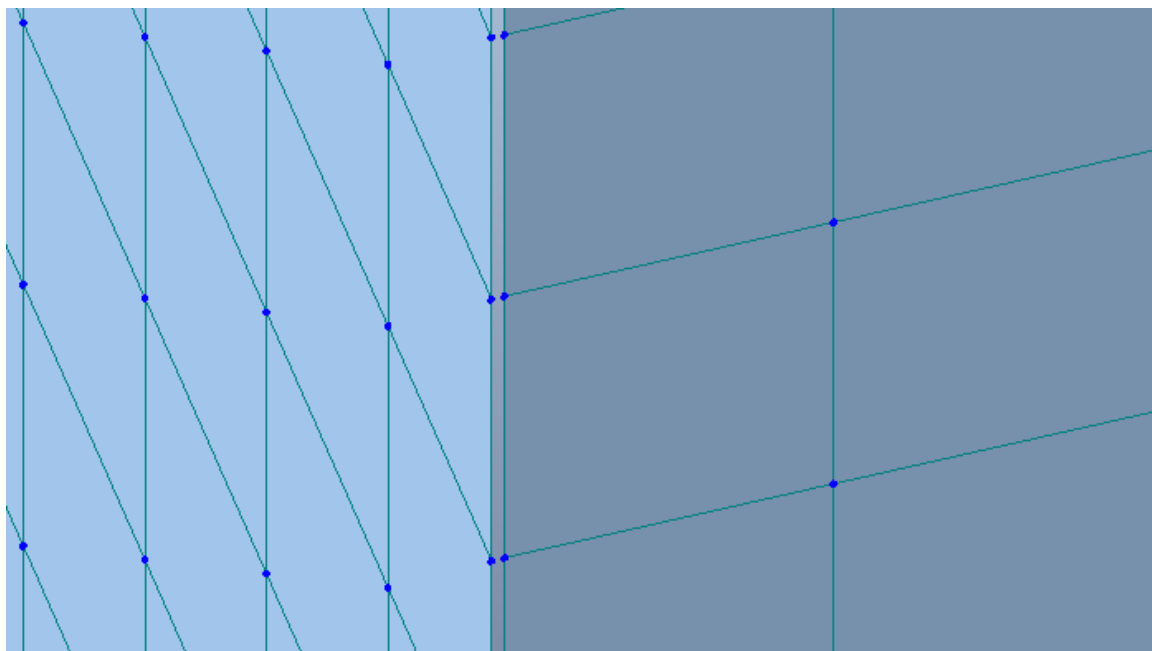


Immagine 5.35: particolare d'angolo dello schema di modellazione.

La parete in appoggio viene quindi ridotta nella sua lunghezza di 1 cm, allo scopo di impedire la sovrapposizione dei nodi delle *mesh* fra pareti perpendicolari.

La singola parete è stata definita con i bordi aventi un offset verso il centro della parete di 1 cm nella direzione perpendicolare alla direzione del bordo.

In questo modo è stato possibile inserire fra pareti adiacenti, sia in verticale che in orizzontale, degli *elastic link* che simulano il contatto fra parete e parete, reagenti solamente a compressione e con rigidità infinita.

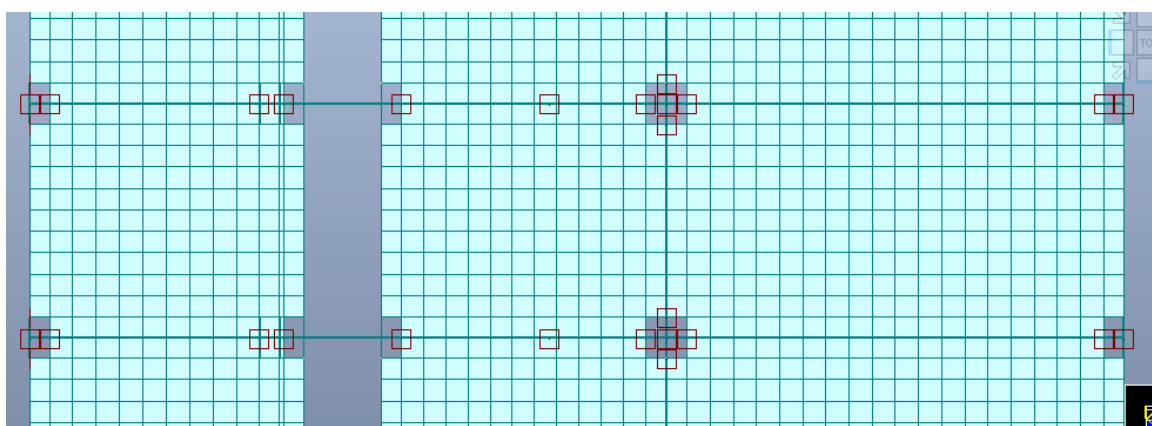


Immagine 5.36: *elastic link* inseriti nei punti di contatto delle pareti CLT.

Sono stati poi definiti degli *story*, ovvero dei diaframmi rigidi orizzontali per simulare la presenza del controvento di piano fornito dai solai in CLT. Essi sono stati posizionati 1 cm sotto la quota teorica dei piani reali. In questo modo gli *story* si trovano alla stessa quota cui terminano le pareti in CLT, che presentano un offset di 1 cm, ma allo stesso tempo sono posizionati ad una quota 1 cm inferiore ai nodi



degli X-Rad, che si trovano invece alla quota del piano reale. In questo modo essi sono automaticamente esclusi dal diaframma rigido come da prescrizione Rothblaas.

Story Data

Ground Level  
 m

	Module Name	Story Name	Level(m)	Height(m)	Floor Diaphragm
	Base	Copertura	8.99	0.00	Consider
▶	Base	Piano_2	5.99	0.00	Consider
	Base	Piano_1	2.99	0.00	Consider
*					

Immagine 5.37: definizione degli story alla quota secondo lo schema.

Dopo aver definito i vincoli nello stesso modo della parete singola si è pronti per passare all'inserimento dei carichi.

È possibile inserire manualmente i carichi lineari su ogni parete come visto per la parete singola.

Per velocizzare le operazioni di modifica e la gestione delle condizioni di carico è possibile utilizzare i *Floor Loads*, che consentono di assegnare carichi di superficie che vengono poi automaticamente convertiti in carichi lineari o concentrati applicati ai nodi degli elementi *shell* come in questo caso, in base alla distribuzione di carico assegnata.

Questo tipo di carichi richiede però di essere posizionata su di un perimetro chiuso, cosa non possibile visto l'inclinazione delle bielle X-Rad. Sono stati quindi definiti degli elementi *beam* fittizi nei punti in cui era presente un'inclinazione delle bielle X-Rad, cioè in corrispondenza degli architravi e dei nodi d'angolo degli X-Rad. Queste bielle porta carico sono state svincolate a momento e posizionate in corrispondenza del pannello CLT, senza intersecare gli elementi *beam* costituenti l'X-Rad. In questo modo è stato correttamente possibile assegnare la sollecitazione verticale scaricata sulla trave al pannello CLT.

Le sollecitazioni sul sistema X-Rad introdotte con questa schematizzazione per un carico di 10 KN/m sulla biella fittizia sono di massimo 0.5 KN, accettabili ingegneristicamente. In ogni caso le sollecitazioni vengono introdotte al livello dei solai, mentre le sollecitazioni massime con questo sistema costruttivo si verificano sempre al collegamento in fondazione.

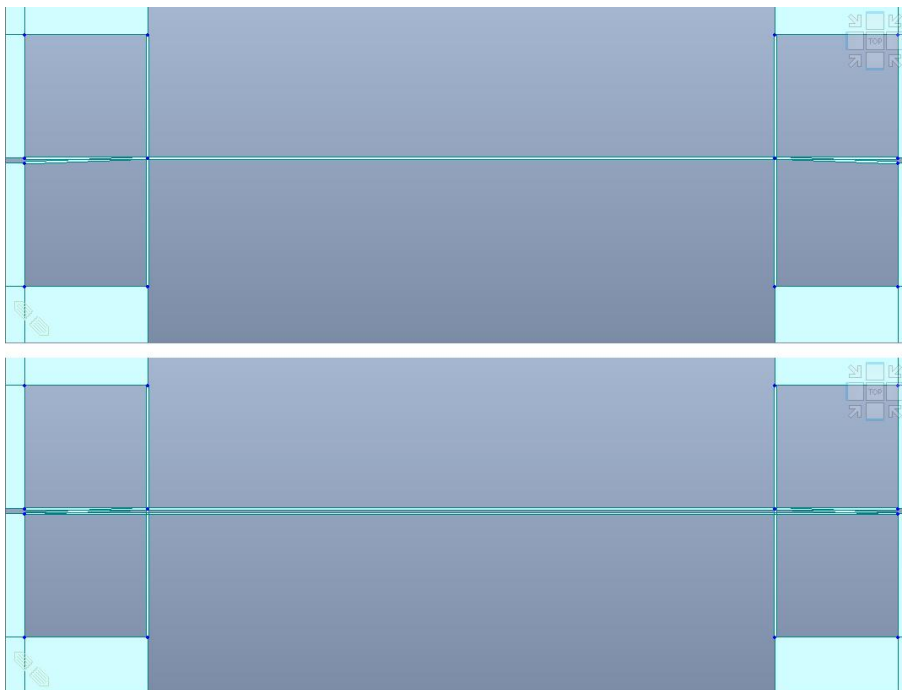


Immagine 5.38: confronto fra un architrave semplice (sopra) e con modellazione di beam porta carico (sotto).

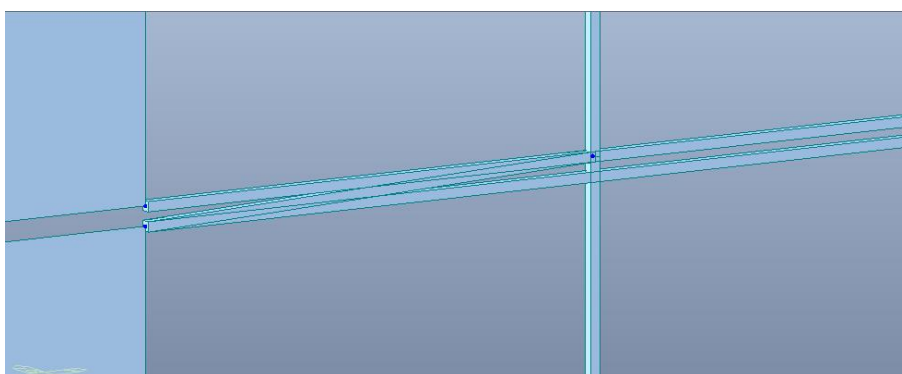


Immagine 5.39: dettaglio del nodo in cui il beam fittizio non crea nessun nodo con il beam X-Rad.

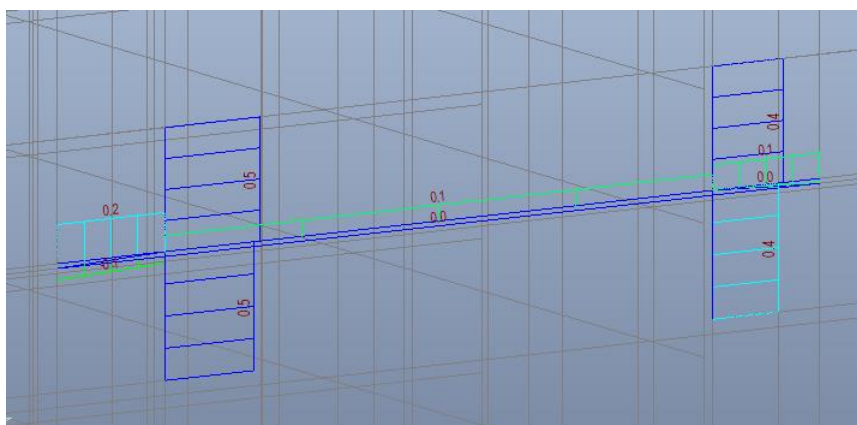
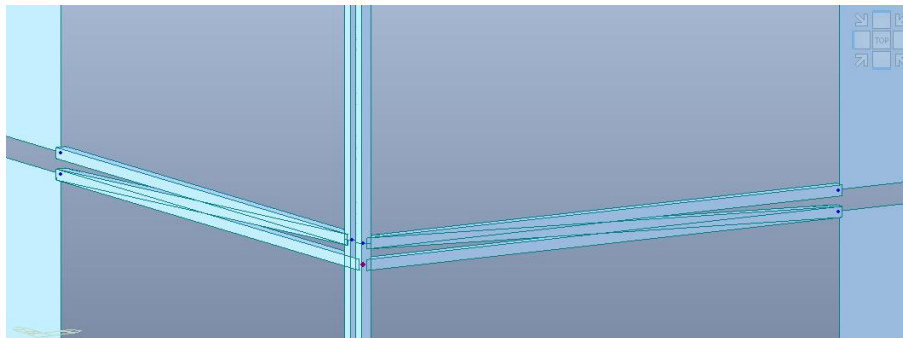


Immagine 5.40: sollecitazioni assiali introdotte sul sistema (in KN).

Anche per gli elementi d'angolo è stata utilizzata una soluzione simile, con

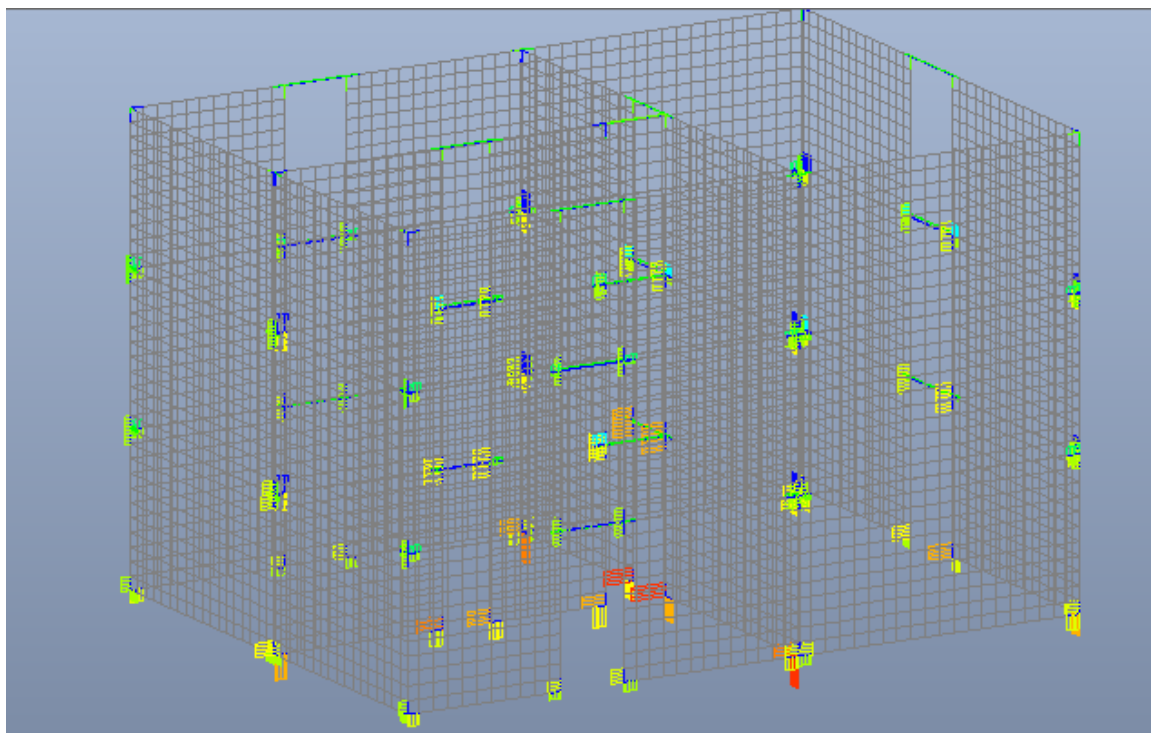
l'accortezza di non svincolare a momento le bielle fittizie per non causare labilità, e di assegnare a quegli elementi *beam* una bassa rigidezza per non influire sullo svincolo fra pareti ortogonali.

Il nodo in viola non interrompe la continuità dell'elemento verticale.



*Immagine 5.41: particolare della schematizzazione per il nodo d'angolo.*

È possibile quindi procedere all'inserimento dei carichi *floor loads* come descritto in precedenza e procedere all'analisi per la combinazione SLU Statica.



*Immagine 5.42: risultati dell'analisi Midas Gen.*

Correttamente in base a quanto indicato nella guida Rothoblaas le sollecitazioni maggiori sui *beam* componenti il sistema X-Rad si trovano al collegamento con la fondazione, in particolare nella zona centrale dell'edificio.

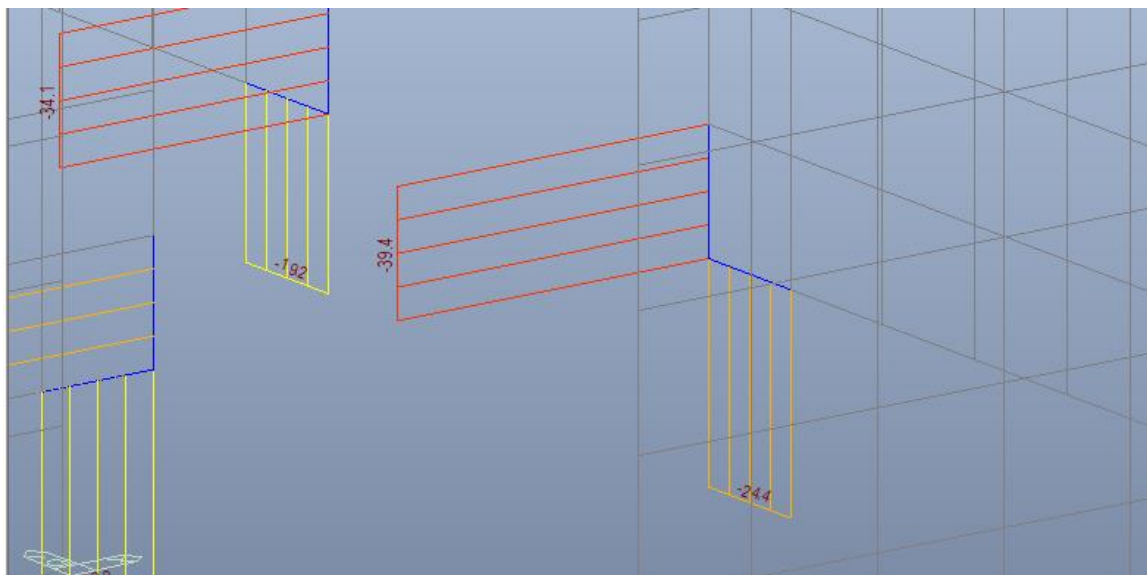


Immagine 5.43: sollecitazioni sull'elemento beam maggiormente gravato.

#### 5.4 VERIFICA DEL SISTEMA X-RAD CON MYPROJECT

Per la verifica del sistema X-Rad Rothoblaas ha predisposto l'utilizzo del suo software *MyProject* che consente sostanzialmente la verifica dell'appartenenza delle coppie di sollecitazioni ricavate dall'analisi FEM al dominio di resistenza, correttamente valutato in base alla normativa selezionata.

L'input delle coppie può avvenire solo manualmente, senza nessuna possibilità di importazione di file di testo o di tabelle di dati.

The screenshot displays the 'myProject' software interface for calculating X-ONE connections. The main window is titled 'Connessione X-ONE per pannelli CLT'. It is divided into several sections:

- Selezione X-ONE:** A table for selecting standards and material properties.
 

Norma	γM legno	γM2 acciaio	Knod est.
NTC 2008 (ITA)	1,50	1,25	1,00
EN 1995:2014 (EU)	1,30	1,25	1,10
- Sollecitazioni N-V:** A table showing the input load components for one pair.
 

Nr. coppia	Componente Vd [kN]	Componente Nd [kN]	Risultante Fd [kN]	Angolo α [°]
1	-24,40	-39,40	46,34	238,23
- Diagramma:** A 2D plot titled 'Dominio resistente e sollecitazioni' showing the interaction between axial force (Nd) and shear force (Vd). The plot includes a blue boundary representing the design resistance and a red path indicating the applied load. Key coordinates are labeled, such as (0,0;165,9) and (-197,8;-197,7). A scale for 'Sfruttamento %' (utilization percentage) is shown at the bottom, ranging from 0 to 32.
- Table of Results:** A detailed table of input and output parameters.
 

Descrizione			
<b>DATI INGRESSO:</b>			
Classe di servizio	cl	1	
Durata carico dominante	tq	istantaneo	
Coefficiente kmod	kmod	1	
Coefficiente sicurezza legno	γM	1,5	
Coefficiente sicurezza acciaio	γM2	1,25	
<b>COPPIA SOLLECITAZIONE 1: (Rottura lato legno)</b>			
Componente Vd	Vd	-24,40	kN
Componente Nd	Nd	-39,40	kN
Risultante Fd	Fd	46,34	kN
Angolo	α	238,23	°
Resistenza caratteristica X-ONE	Rk	216,71	kN
Coefficiente γ applicato alla resistenza di X-ONE	γM	1,50	
Coefficiente kmod applicato alla resistenza O-ONE	kmod	1,00	
Resistenza di progetto X-ONE	Rd	144,48	kN
<b>Verifica</b>		<b>0,32</b>	<b>VERIFI...</b>
- RIEPILOGO SINTETICO RISULTATI:** A summary table showing the final verification result for the pair.
 

Verifica coppia 1	0,32	VERIFI...
-------------------	------	-----------

Immagine 5.44: input dei dati e risultati di verifica del connettore.

Il software restituisce il risultato della verifica per ogni coppia e la percentuale di sfruttamento della connessione.



---

## ANALISI DI INTEROPERABILITÀ

---

Prima di procedere all'implementazione di un caso pratico si è provveduto ad effettuare lo scambio di elementi semplici, quali varie tipologie di geometria, tipi di vincoli, condizioni di carico tra i software oggetto d'analisi quindi Revit – Sismicad e Revit- Midas Gen, allo scopo di verificare quali elementi potessero essere oggetto di modellazione in Revit e venire esportati con successo verso i due software di analisi.

### 6.1 INTEROPERABILITÀ REVIT 2017 – SISMICAD 12

Per l'analisi di interoperabilità fra i due software si è utilizzata la versione di Revit 2017 in quanto è l'ultima versione disponibile per il quale è possibile l'utilizzo del componente esterno che permette l'esportazione diretta da Revit verso Sismicad. Per l'esportazione di informazioni da Revit verso Sismicad sono disponibili due possibilità: l'esportazione tramite file IFC e l'esportazione diretta tramite il componente esterno.

#### 6.1.1 Esportazione tramite file IFC

Il software Sismicad supporta l'importazione tramite file IFC di versione 2x3. Il comando *importa IFC* consente di inserire all'interno della vista struttura di Sismicad degli "elementi IFC" corrispondenti agli elementi strutturali definiti nel file IFC di origine<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Manuale Sismicad 12.9, § 19.2

Non è disponibile nessuna impostazione di importazione.

Con la dicitura “elementi IFC” si intende che il software consente l’importazione della sola geometria degli elementi. Una volta importati infatti essi corrispondono ai soli limiti geometrici dell’elemento. Nella finestra proprietà del singolo elemento viene riportata solamente la descrizione dell’entità nativa IFC.

Ogni elemento importato deve quindi essere convertito tramite il comando *Converti entità*, con la stessa procedura indicata al §5.2.2, solamente dopo aver definito manualmente i *livelli* in Sismicad, che non vengono importati dal file IFC.

Con questa modalità è possibile importare e convertire oggetti di tipo:

- *IfcSlab*;
- *IfcBeam*;
- *IfcBuildingElementProxy*;
- *IfcColumn*;
- *IfcWall*;
- *IfcWallStandardCase*;
- *IfcProxy*;
- *IfcOpeningElements*.

Come esposto precedentemente non vengono importati elementi del tipo *IfcBuildingStorey*.

Questa modalità di importazione deve essere attuata anche per i file IFC prodotti dallo stesso software Sismicad, attualmente non in grado di riconoscere le proprietà presenti nei file IFC esportati da Sismicad stesso, contenenti tutte le proprietà dell’elemento definibili in Sismicad.

```

Parete singola_in sismicad.ifc - Blocco note
File Modifica Formato Visualizza ?
#73= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Tronco',$,IFCIDENTIFIER('Fondazione - Piano 1'),$);
#74= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Tr.',$,IFCIDENTIFIER('T1'),$);
#75= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Tipologia',$,IFCIDENTIFIER('XLAM; 0.024+0.024+0.024; Legno_X-Lam; Isotropo'),$);
#76= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Manutenzione',$,IFCIDENTIFIER('woodwall_xlam'),$);
#77= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Tipologia',$,IFCIDENTIFIER('XLAM'),$);
#78= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Spessore',$,IFCLENGTHMEASURE(7.2),$);
#79= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Punto di inserimento',$,IFCIDENTIFIER('Centro'),$);
#80= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Punto iniziale',$,IFCIDENTIFIER('0; 0'),$);
#81= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Punto finale',$,IFCIDENTIFIER('4; 0'),$);
#82= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Peso finitura',$,IFCPANARFORCEMEASURE(0.),$);
#83= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Sovreresistenza',$,IFCRATIOMEASURE(0.),$);
#84= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Sisma Z',$,IFCBOOLEAN(.F.),$);
#85= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Forma',$,IFCIDENTIFIER('Superficie + Solido'),$);
#86= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Dimensione mesh',$,IFCIDENTIFIER('Default (0.8)'),$);
#87= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Tipo mesh',$,IFCIDENTIFIER('Default (Quadrilateri o triangoli)'),$);
#88= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Punti FEM',$,IFCIDENTIFIER('4 punti'),$);
#89= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Peso unitario',$,IFCPANARFORCEMEASURE(0.),$);
#90= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Bordo inferiore',$,IFCIDENTIFIER('Bloccato + Libero + Bloccato + Bloccato'),$);
#91= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Bordo iniziale',$,IFCIDENTIFIER('Bloccato + Libero + Bloccato + Bloccato'),$);
#92= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Bordo superiore',$,IFCIDENTIFIER('Bloccato + Libero + Bloccato + Bloccato'),$);
#93= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Bordo finale',$,IFCIDENTIFIER('Bloccato + Libero + Bloccato + Bloccato'),$);
#94= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Classe di servizio',$,IFCIDENTIFIER('1'),$);
#95= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Incollamenti',$,IFCIDENTIFIER('Default (Solidi reali)'),$);
    
```

Immagine 6.1: proprietà dell’elemento parete in Sismicad correttamente esportate nel file IFC prodotto dallo stesso software.



Tale file IFC importato in Revit premette il riconoscimento di tali parametri associati all'elemento e la loro modifica. Non è altrettanto possibile però la corretta riesportazione del file IFC da Revit.

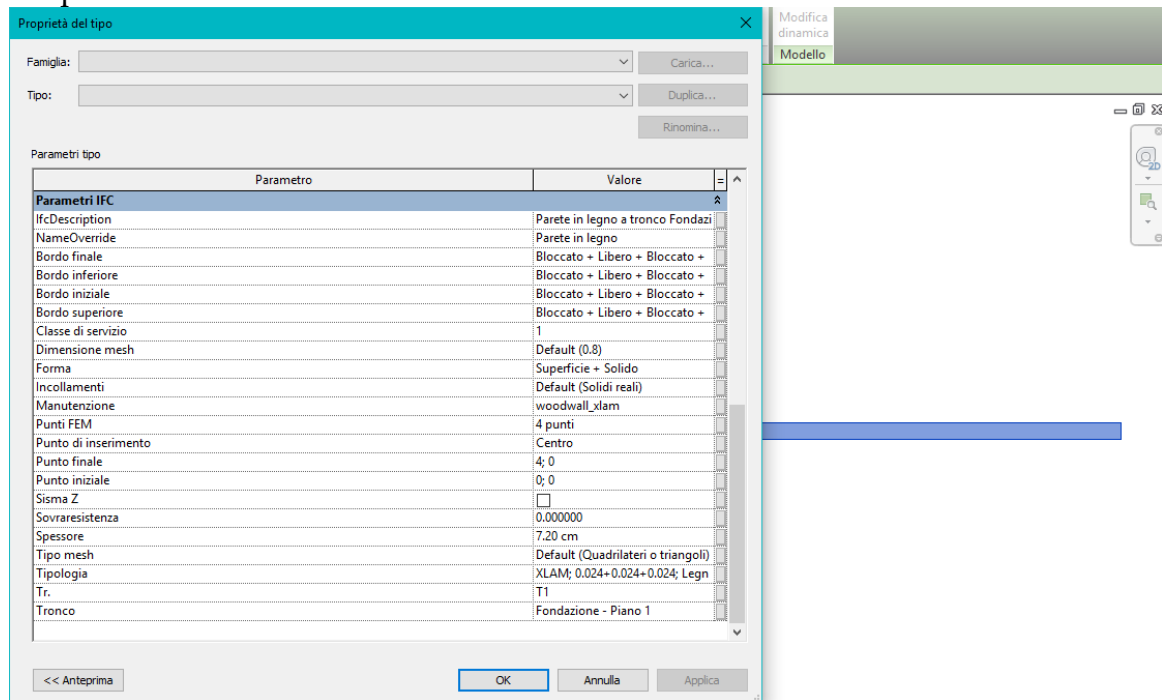


Immagine 6.2: gli stessi parametri IFC della parete in legno esportata da Sismicad correttamente letti da Revit.

Viste le grandi limitazioni di questa modalità di importazione si è scelto di non proseguire con questa modalità, non funzionale dal punto di vista dell'interoperabilità.

### 6.1.2 Esportazione diretta tramite *Esporta in Sismicad*

L'altra modalità di esportazione da Revit verso Sismicad è utilizzando lo strumento esterno dedicato. Esso viene installato al momento dell'installazione di Sismicad, se viene rilevata una versione di Revit compatibile.

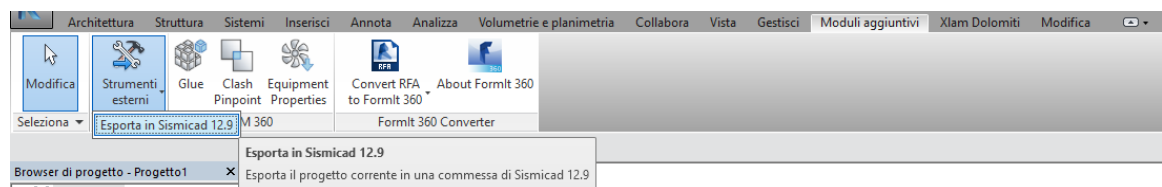


Immagine 6.3: barra di esportazione in Revit verso Sismicad.

Come si può già intuire dalla barra degli strumenti esterni, non è prevista la reimportazione del modello aggiornato in Revit, ma solo la sua esportazione.

Le opzioni di esportazione comprendono:

- una scheda *Generali* in cui specificare il file da esportare, il percorso della nuova commessa da creare in Sismicad e la possibilità di esportare solo una selezione del modello;
- una scheda *Materiali* in cui specificare il materiale predefinito da assegnare alle tipologie di elementi nel caso non sia stato specificato nell'elemento;
- una scheda *Famiglie per colonne e travi* in cui specificare la corrispondenza di tipologie fra le famiglie in Revit con le sezioni in Sismicad.

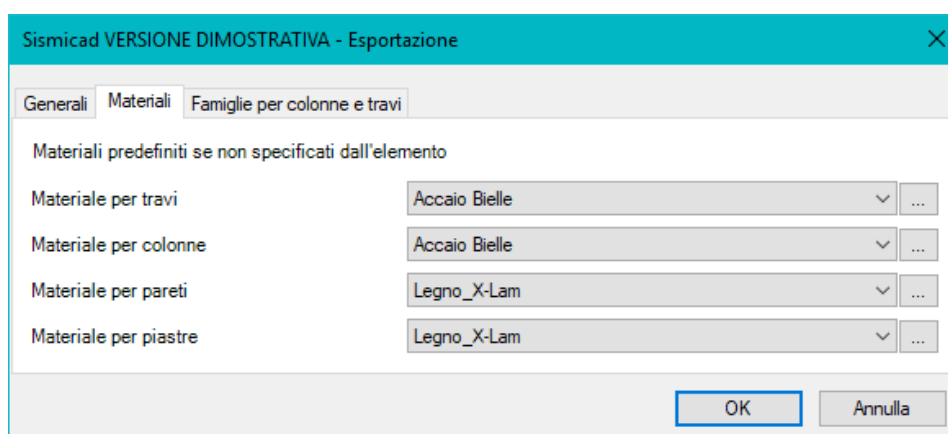


Immagine 6.4: esempio schermata di esportazione da Revit a Sismicad.

### Geometria

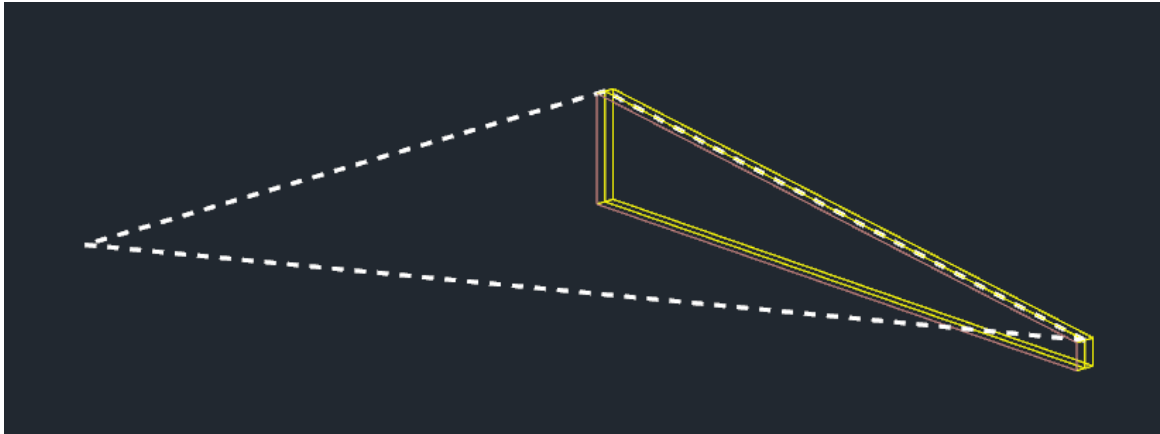
I livelli presenti in Revit vengono correttamente riconosciuti da Sismicad. Ad ogni livello in Revit ne viene creato uno in Sismicad alla stessa quota avente spessore nullo. Nel caso in cui in Revit sia presente un pavimento a quel livello, lo spessore del pavimento sarà assegnato come spessore del livello in Sismicad.

Gli elementi lineari vengono correttamente esportati in Sismicad. All'atto dell'esportazione viene richiesto di specificare la corrispondenza dei parametri delle sezioni fra Revit e Sismicad.

La posizione dell'asse analitico rispetto all'elemento specificata in Revit viene correttamente riconosciuta in Sismicad.

Le pareti vengono esportate correttamente nella loro geometria, correttamente vincolate ai livelli specificati in Revit ma con delle problematiche non indifferenti connesse alla tipologia della parete e del materiale.

Nel caso di murature inclinate in Revit, viene automaticamente creata in Sismicad una falda per gestire la geometria inclinata.



*Immagine 6.5: muro inclinato gestito da Sismicad inserendo una falda.*

Le finestre vengono correttamente importate come aperture nei muri in Sismicad. Gli elementi di pavimento in Revit vengono convertiti in carichi superficiali in Sismicad, oppure come Piastra in c.a. se sono elementi di fondazione.

Il sistema di travi strutturali in Revit viene importato in Sismicad come singole travi.

Il sistema di facciata continua in Revit non viene esportato in Sismicad.

#### *Carichi*

I carichi puntuali, lineari, di superficie generici in Revit vengono convertiti, creando una nuova condizione di carico.

Dei carichi ospitati da elementi in Revit viene solamente importata la condizione di carico, ma il carico non viene applicato all'elemento corrispondente.

Le combinazioni di carico di Revit non sono riconosciute da Sismicad.

#### *Vincoli*

Dei vincoli esterni vengono convertiti solamente i vincoli di tipo puntuale. L'eventuale rigidità assegnata ad una condizione di vincolo viene anch'essa trasferita in Sismicad correttamente, essendo le condizioni di vincolo gestite in maniera simile tra i due software.

Non è possibile quindi importare i vincoli di superficie e quelli lineari necessari per la corretta gestione delle pareti in legno.

## Materiali

Per quanto riguarda l'importazione dei materiali esistono problemi legati anche al tipo di elemento.

In Sismicad, essendo un modellatore tridimensionale, gli elementi sono categorizzati per tipologia.

Nel caso di una parete abbiamo infatti la parete in muratura, la parete in c.a. e la parete in legno.

Se in Revit il muro è caratterizzato come strutturale verrà convertito nella tipologia parete in c.a. in Sismicad, in caso contrario verrà convertito nella tipologia parete in muratura. Importando due pareti del medesimo materiale Calcestruzzo C35/45 in Revit, una con utilizzo strutturale ed una architettonico, vengono importate in Sismicad come due tipologie di parete differenti, ignorando quindi l'impostazione di materiale effettuata in Revit.

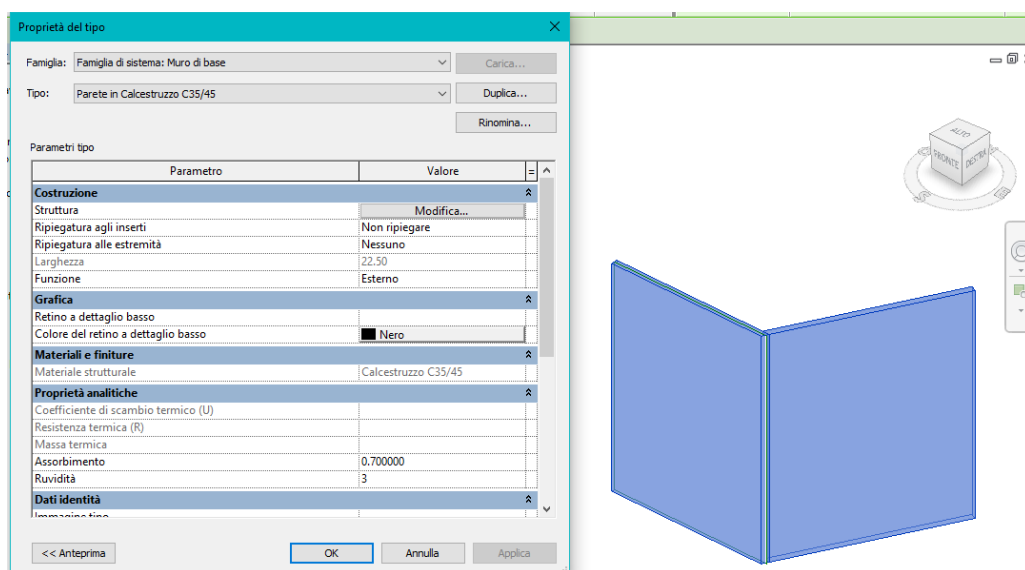


Immagine 6.6: identico materiale assegnato ad entrambe le pareti in Revit.

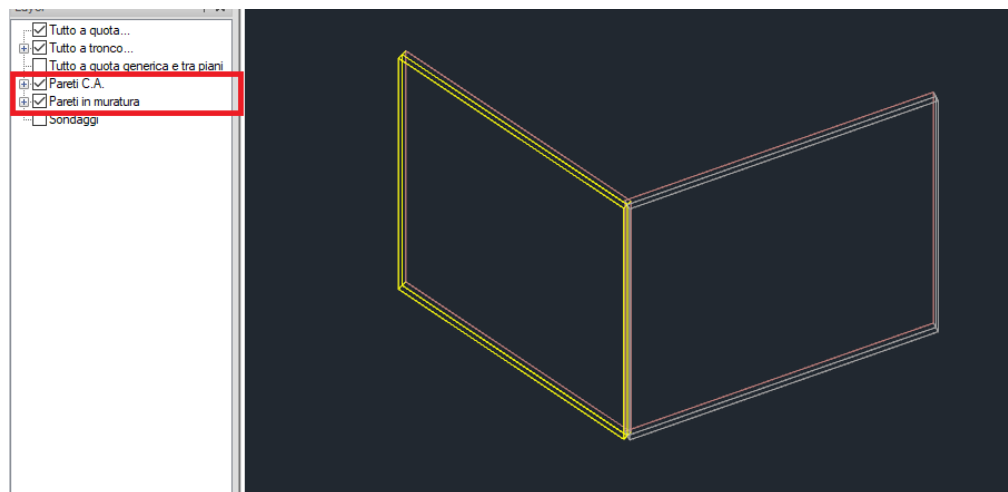


Immagine 6.7: differente tipologia di parete importata in Sismicad.

Per quanto riguarda il materiale assegnato alle pareti, viene ad ogni importazione creato un materiale con proprietà predefinite in Sismicad, sia per quanto riguarda il c.a. della parete strutturale che per la muratura della parete non strutturale, creando quindi una muratura di tamponamento. Tutto ciò anche in caso di pareti dotate di un solo strato.

Per pareti a più strati in Revit infatti viene creata in Sismicad una parete che abbia lo spessore equivalente alla somma degli spessori dei singoli strati in Revit, ed un materiale con peso specifico dato dalla media pesata dei pesi specifici dei singoli strati.

Con queste impostazioni di importazione risulta quindi non possibile importare una parete strutturale in legno, che verrebbe quindi convertita in parete in c.a., rendendo quindi necessario a seguito dell'importazione un'operazione di conversione della tipologia di elemento, azzerando quindi le proprietà importanti e dovendole reinserire manualmente.

### **6.1.3 Conclusioni**

Date le limitazioni imposte dalle due modalità di esportazione, non essendo disponibili impostazioni di importazione avanzate, risulta difficile eseguire un lavoro mirato al miglioramento dell'interoperabilità dei due software.

La soluzione per il momento è quella dell'esportazione della mera geometria da Revit, che possa essere quindi convertita negli elementi tridimensionali corretti in Sismicad. Questa risulta essere la strada percorribile al momento.

Paradossalmente, i parametri inseriti in Sismicad sono leggibili attraverso l'IFC importato in Revit ma non nello stesso Sismicad.

Una possibilità futura di interoperabilità potrebbe vedere la creazione di una corrispondenza fra un determinato tipo di muro appositamente definito in Revit e la tipologia parete in legno in Sismicad, potendo inserire in Revit le stesse proprietà inseribili in Sismicad con una perfetta corrispondenza di parametri, senza dover convertire entità geometriche ad ogni importazione, scenario che potrebbe aprire fortemente le porte all'interoperabilità fra i due software.

## 6.2 INTEROPERABILITÀ REVIT 2017 – MIDAS GEN 2018

Anche per lo studio dell'interoperabilità fra Revit e Midas si è utilizzata la versione di Revit 2017, la più recente per la quale risulta essere disponibile lo strumento esterno *MidasLinkForRevit2017*, un *add-on* per Revit che consente l'esportazione del modello.

### 6.2.1 Esportazione tramite *Midas Link*

Lo strumento esterno per l'esportazione del modello verso Midas deve essere installato successivamente all'installazione del programma. Attualmente è disponibile per le versioni 2016 e 2017 di Revit.

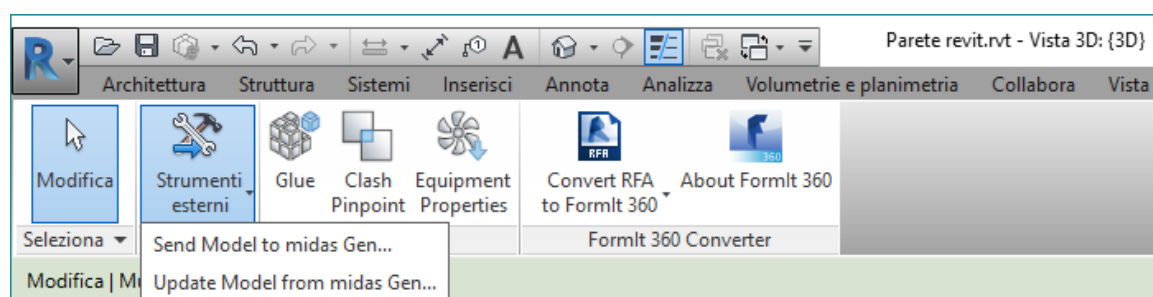


Immagine 6.8: barra di esportazione in Revit verso Midas.

Si può già notare che è presente anche la funzione *Update Model from midas Gen*, che consente di reimportare il modello aggiornato da Midas, oltre che la funzione *Send Model to midas Gen*.

L'aggiornamento del modello tramite il comando *Update Model* non consente un aggiornamento completo del modello ma solo della geometria, e il comando *Send Model* presenta dei problemi di corrispondenza secondari che verranno analizzati in dettaglio nel § 7.

Non si tratta di una vera e propria esportazione diretta, in quanto l'utilizzo del comando di esportazione genera dei file di interscambio, che devono poi essere importati in Midas.

In particolare vengono generati i seguenti file:

- un file con estensione *.mgt* (Midas Gen Text file) che costituisce il file di scambio;
- un file con estensione *.rmg* utilizzato per memorizzare i riferimenti del file di Revit.

Dalla finestra di esportazione è possibile specificare:

- la posizione di salvataggio dei file sopra indicati;
- la dimensione della *mesh* utilizzata per la discretizzazione, che avviene già in fase di importazione del modello;
- la possibilità di esportare l'intero modello o solamente una parte selezionata;
- le unità di misura utilizzate nella generazione del file di scambio;
- la corrispondenza delle sezioni degli elementi, fra quelli utilizzati in Revit e quelli di Midas;
- la corrispondenza dei materiali, fra quelli utilizzati in Revit e quelli di Midas.

Per le sezioni è possibile utilizzare specifiche *User-defined* nel caso in cui non fosse presente la sezione necessaria o non venisse riconosciuta, facendo corrispondere al singolo parametro che descrive la geometria della sezione il corretto parametro corrispondente in Midas.

Questo è possibile anche per i materiali, anche se è possibile associare ad un materiale in Revit, un materiale in Midas già presente nel catalogo, senza poter in questa fase specificare delle opzioni personalizzate. Il catalogo comprende solamente materiali acciaio e calcestruzzo, essendo Midas un software dedicato a questi materiali.

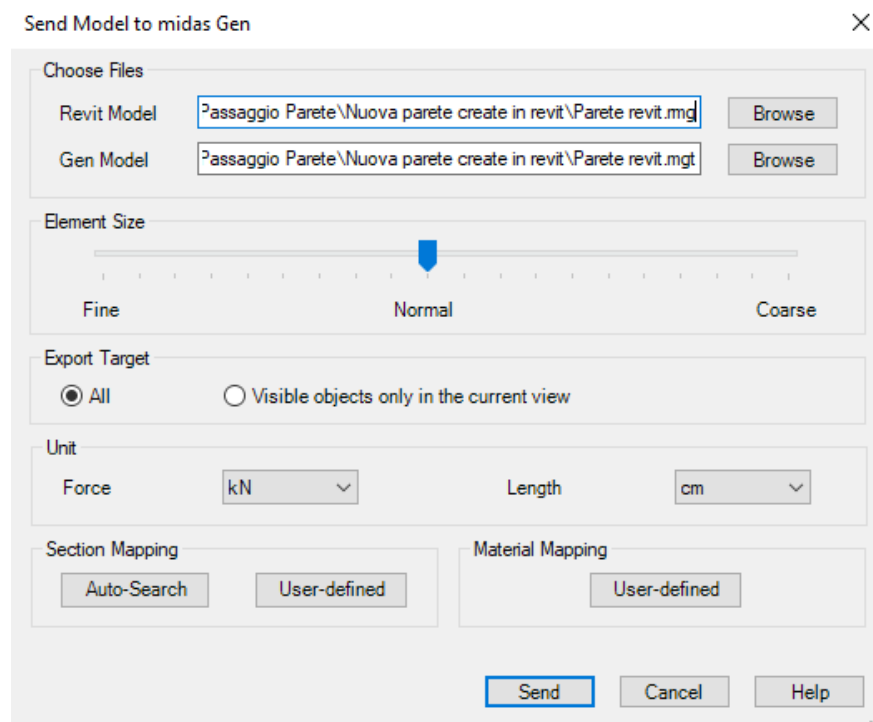


Immagine 6.9: interfaccia di esportazione da Revit verso Midas.

Successivamente è possibile avere conferma della correttezza del mappaggio delle sezioni, ed è possibile importare il file esportato da Revit in Midas.

### *Geometria*

I livelli di Revit non vengono esportati in Midas, in quanto trattandosi di un software FEM non vi è necessità di definire questo tipo di parametro.

Gli elementi lineari vengono correttamente esportati in Midas, e convertiti in elementi *beam*. Gli elementi vengono importati con l'asse analitico nella posizione indicata da Revit, quindi all'estremo superiore della sezione di default. Nel caso si variasse la posizione dell'asse in Revit verrà creato un tipo differente di sezione, con l'asse posizionato nel punto indicato in quanto la posizione dell'asse non risulta essere un attributo del singolo *beam* ma del tipo di sezione.

Le pareti vengono correttamente esportate come elementi *plate* bidimensionali se definiti come muri di tipo strutturale. Lo spessore degli elementi superficiali viene assegnato in Midas come parametro *thickness* se il materiale viene correttamente importato.

Le finestre vengono correttamente importate come aperture negli elementi *plate*, così come eventuali aperture nei muri in Revit sono riconosciute correttamente.

Di conseguenza anche gli elementi *plate* rappresentanti pavimenti strutturali e fondazioni a platea sono riconosciuti con le stesse modalità.

Il sistema di travi strutturali in Revit viene importato in Midas come singole travi.

Il sistema di facciata continua non viene esportato in Midas.

### *Carichi*

I carichi puntuali, lineari e di superficie definiti in Revit sono trasferibili a Midas solamente se sono di tipo ospitato. I carichi generici non possono essere trasferiti. Il carico puntuale viene trasferito come carico applicato al nodo, il carico lineare come carico applicato ad un'asta ed il carico di superficie come carico applicato ad un elemento *plate*.

Le condizioni di carico vengono correttamente trasferite. In base alla categoria di carico assegnata in Revit le condizioni di carico vengono assegnate alla corrispondente categoria in Midas.

Le combinazioni di carico in Revit non sono trasferite in Midas.



Vincoli

I vincoli puntuali vengono correttamente trasferiti in Midas come elementi di tipo *Supports*.

Assegnando una rigidezza ad una condizione di vincolo in Revit, esso viene trasferito come *Point Spring Supports*. Si sono però verificate delle problematiche con la rigidezza assegnata in Revit, che non risulta corretta nell'importazione. Viene definito il tipo di vincolo correttamente, ma non la sua rigidezza di valore errato. Ciò è probabilmente dovuto alle differenti unità di misura adottate dai due software per la gestione della rigidezza.

Inoltre il sistema di riferimento utilizzato in Revit è quello globale, mentre in Midas è quello locale dell'elemento.

In caso di utilizzo di questa tipologia di vincolo, per le componenti specificate come bloccate viene inserita una rigidezza di 100000000 KN/m, talmente elevata da considerarsi rigido, per le componenti specificate come libere una rigidezza pari a 0 KN/m.

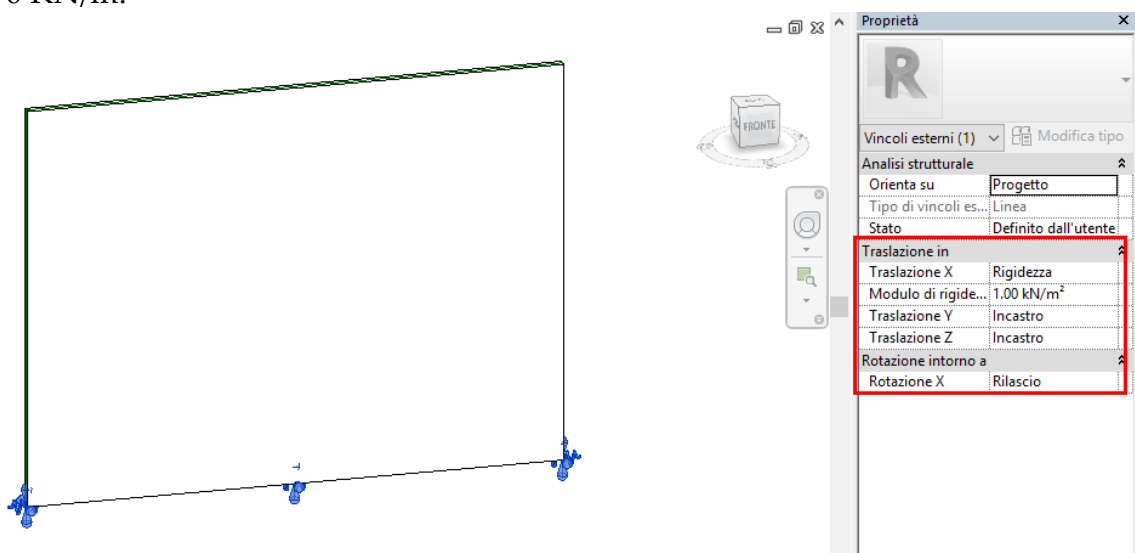


Immagine 6.10: vincolo con rigidezza assegnata in Revit.

Node	Type	SDx (kN/m)	SDy (kN/m)	SDz (kN/m)	SRx (kN*m/[rad])	SRy (kN*m/[rad])	SRz (kN*m/[rad])
1	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
2	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
3	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
4	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
5	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
6	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
7	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
8	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00
9	Linear	0.3048	100000000	100000000	0.00	0.00	0.00

Immagine 6.11: rigidezza dello stesso vincolo in Midas.

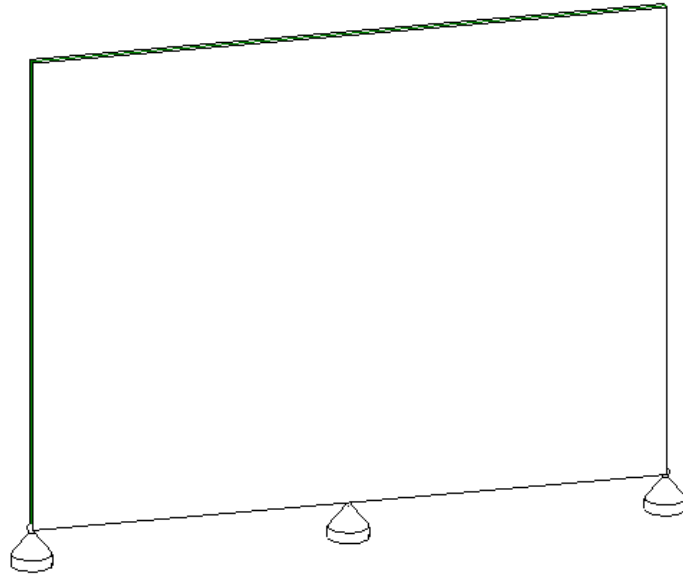
Dovendo inserire dei vincoli con un determinato valore di rigidezza, di tipo *Point Spring Support* in Midas, è conveniente inserire il tipo *Rigidezza* fra le condizioni di vincolo in Revit, lasciando il valore predefinito e quindi specificare la corretta rigidezza in Midas, trovando così già inserita la tipologia di vincolo corretta.

In Revit non è possibile assegnare un tipo di vincolo non lineare, ad esempio reagente solo a compressione, caratteristica che deve essere quindi assegnata in Midas.

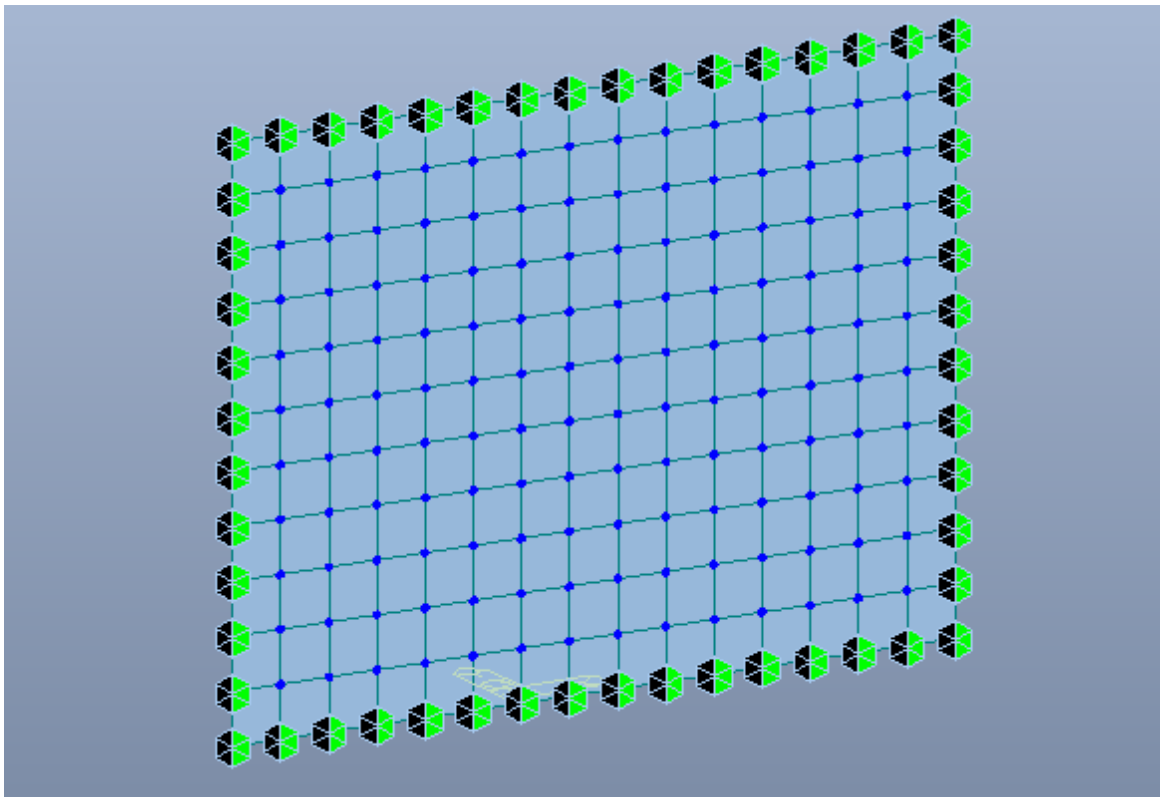
Per quanto riguarda i vincoli di tipo lineare essi sono convertiti, in fase di *mesh* durante l'importazione, in vincoli di tipo puntuale, applicati ad ogni nodo della *mesh* appartenente al vincolo lineare.

Nell'esportazione sono stati però riscontrati dei problemi. Applicando infatti un vincolo di tipo lineare ad un solo bordo della parete, esso viene esteso a tutti i bordi della parete.

In fase di reimportazione in Revit del modello aggiornato in Midas, non vengono importate le modifiche effettuate sui vincoli in Midas.



*Immagine 6.12: parete di esempio vincolata al solo bordo inferiore in Revit.*



*Immagine 6.13: parete con tutti i bordi vincolati in Midas.*

Questo problema non permette la corretta gestione dei bordi delle pareti in legno X-Lam, per cui è necessario specificare condizioni diverse di vincolo lineare per ogni bordo della parete.

*Materiali*

Il passaggio dei materiali acciaio e calcestruzzo da Revit a Midas avviene correttamente.

Al momento dell'esportazione è disponibile una finestra che consente di associare al materiale in Revit il corrispondente materiale in Midas in base alle normative presenti. In Midas infatti sono le due categorie di materiali presenti, oltre a SRC ed *user-defined*.

User-defined Material Mapping

	Category	Revit Material Name	Gen Standard	Gen DB Name
80	Steel	Steel, 55-430	BS(S)	55C
81	Steel	Steel, 55-450	BS(S)	55C
82	Steel	Metallo - Acciaio - Fe360	UNI(S)	Fe360
83	Steel	Metallo - Acciaio - Fe430	UNI(S)	Fe430
84	Steel	Metallo - Acciaio - Fe510	UNI(S)	Fe510
85	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - Calce	UNI(RC)	Rck25
86	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R15	UNI(RC)	Rck15
87	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R20	UNI(RC)	Rck20
88	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R25	UNI(RC)	Rck25
89	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R30	UNI(RC)	Rck30
90	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R35	UNI(RC)	Rck35
91	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R40	UNI(RC)	Rck40
92	Concrete	Calcestruzzo - Calcestruzzo gettato in opera - R45	UNI(RC)	Rck45
93	Concrete	Calcestruzzo, gettato in opera	UNI(RC)	Rck10
94	Steel	Acciaio per X-Rad bielle	EN(S)	S235

Add    Modify    Delete    Find    Up    Down    OK    Cancel

*Immagine 6.14: definizione della corrispondenza dei materiali fra Revit e Midas.*

Nel caso si volesse trasferire un'altra tipologia di materiale, e quindi creare in Midas un materiale di tipo *user-defined*, non è possibile farlo dalla finestra di dialogo in *Immagine 6.13*.

È infatti possibile assegnare solamente materiali di tipo *steel* e *concrete*.

Define Material Mapping

Revit Material: Legno per XLam XRad

Gen Material

Type	Standard	DB
<input type="text" value=""/> <ul style="list-style-type: none"> <li>Steel</li> <li>Concrete</li> </ul>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>

OK    Cancel

*Immagine 6.15: assegnazione della corrispondenza fra materiali.*

Nel caso si dovessero utilizzare come in questo caso altri tipi di materiali, è conveniente non provare a definire alcuna associazione di materiali.

Per i materiali per cui non è stata specificata alcuna corrispondenza infatti, Midas crea automaticamente un nuovo tipo di materiale *user-defined* che conserva le caratteristiche fisiche specificate in Revit.

Se per un materiale in Revit non sono state definite caratteristiche appartenenti alla categoria *fisico*, esso non viene importato in Midas.

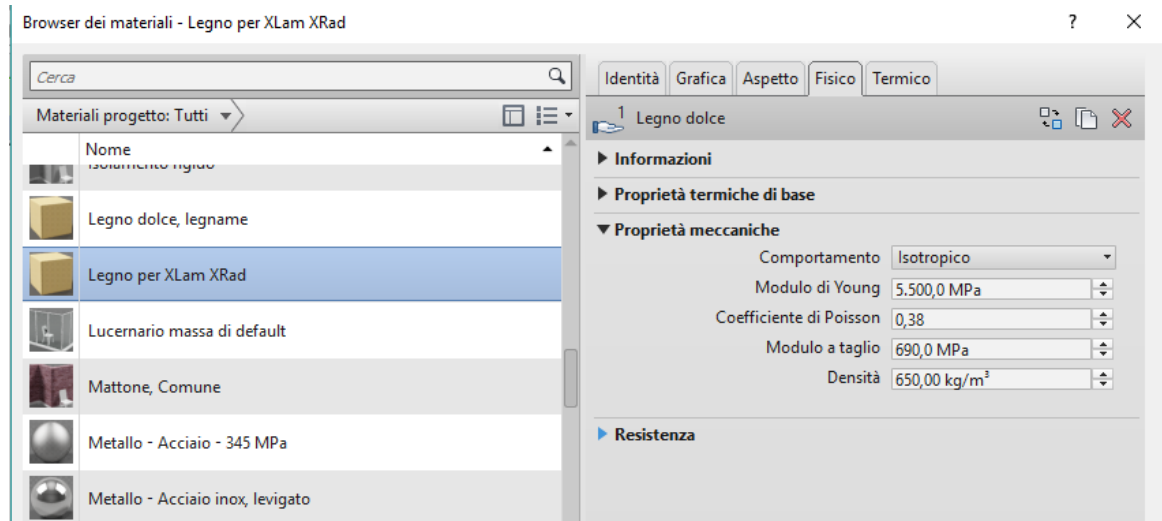


Immagine 6.16: materiale assegnato in Revit.

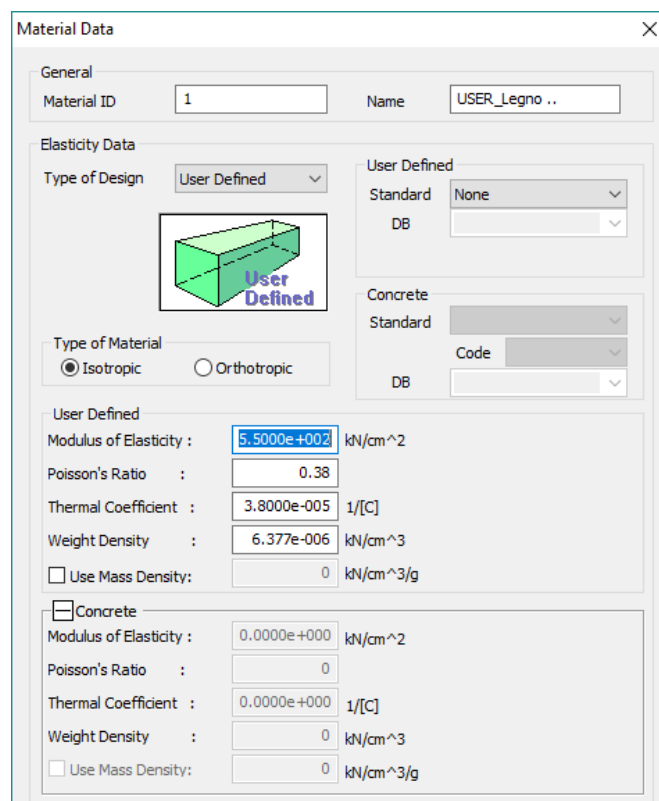


Immagine 6.17: materiale importato in Midas correttamente.

Per la gestione delle pareti a più strati, occorre prestare attenzione. Midas infatti in fase di importazione è in grado di riconoscere a quale materiale è stata assegnata la funzione strutturale. Quello sarà l'unico materiale importato in Midas, con le caratteristiche fisiche corrette, ma lo spessore importato in *thickness* sarà quello dell'intera parete, comprendente anche gli strati indicati come finitura in Revit.

È necessario quindi prestare attenzione durante la fase di importazione in Midas, in cui è comunque possibile modificare lo spessore dell'elemento *plate* anche se sarebbe più corretto che avvenisse l'esportazione dello spessore del solo strato strutturale.

### 6.2.2 Conclusioni

Il software Midas gode già di una buona interoperabilità da Revit. La schematizzazione necessaria per la modellazione del sistema X-Rad è pienamente implementabile in Midas come visto al § 5.2, e non si rilevano problemi di interoperabilità che non consentano lo sviluppo di strumenti di interoperabilità per questo sistema costruttivo. I piccoli problemi riscontrati quali la gestione dei vincoli lineari per la parete e l'importazione dello spessore dei materiali non costituiscono una problematica per questo sistema, che viene gestito tramite vincoli puntuali e per cui verrà modellato in Revit il solo spessore strutturale.

---

## FILIERA DI INTEROPERABILITÀ

---

Dopo aver eseguito uno studio approfondito delle informazioni scambiate fra i vari software riguardanti il sistema di progettazione e di modellazione delle connessioni X-Rad, si è provato a verificare l'interoperabilità dell'intero percorso di design del sistema, tra modellazione, analisi strutturale e produzione industriale.

Avendo svolto un processo iterativo in questa analisi, verrà presentato l'intero percorso svolto allo scopo di motivare le soluzioni adottate e presentare le problematiche che hanno impedito lo sviluppo di soluzioni parallele.

### 7.1 MODELLAZIONE IN REVIT

#### 7.1.1 Geometria

La modellazione ha avuto inizio in Revit utilizzando per semplicità degli elementi muro strutturale di una tipologia realmente esistente in X-Lam, allo scopo di poter poi effettuare una verifica esterna ai software sul pannello più sollecitato. In questo modo verrebbe importato in Midas Gen lo spessore già corretto del pannello.

È iniziata quindi la riproduzione del caso studio proposto da Rothoblaas, modellando il primo piano e riproducendolo per i piani rimanenti, vista la perfetta corrispondenza.

Per la corretta modellazione, corrispondente alle linee guida X-Rad sono stati necessari dei piccoli accorgimenti. Era necessario che i muri fra loro ortogonali non risultassero connessi. Per poter fare ciò al momento del disegno dei muri è stata impedita la creazione del giunto fra muri.

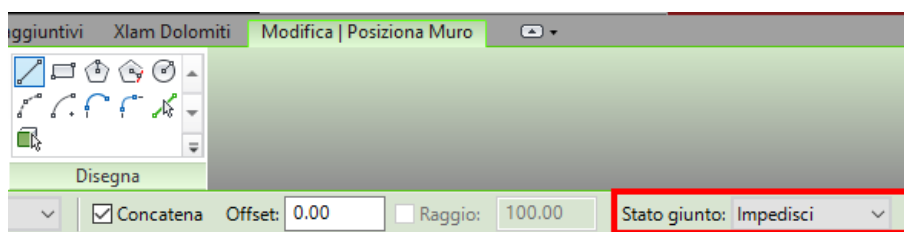


Immagine 7.1: giunto non consentito fra elementi.

Si sono inoltre evidenziati i modelli analitici degli elementi per aver maggiore chiarezza su quali sarebbero stati i futuri assi strutturali esportati. Nonostante la disgiunzione dei giunti gli assi risultavano comunque sovrapposti, ed è stato quindi necessario un arretramento del muro in battuta di 1 cm per ogni giunto, così come effettuato nel § 5.3 nella modellazione strutturale.

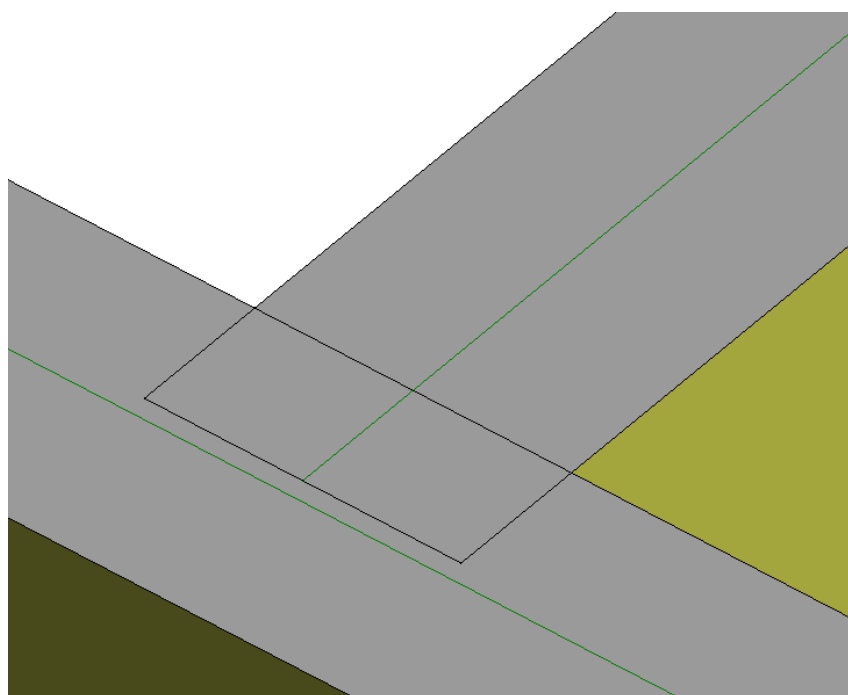


Immagine 7.2: arretramento del muro in battuta per evitare la sovrapposizione dell'asse strutturale (in verde).

In questo modo, durante la successiva creazione della *mesh* in fase di esportazione, i nodi non sarebbero risultati sovrapposti, rimanendo disgiunti. Inoltre è stato necessario utilizzare il comando *Dividi con spazio* per creare le aperture corrispondenti alle porte, per poter successivamente inserire le bielle schematizzanti gli architravi. Procedendo in questo modo si arriva al disegno del primo piano completo, successivamente replicato ai livelli superiori corrispondenti.



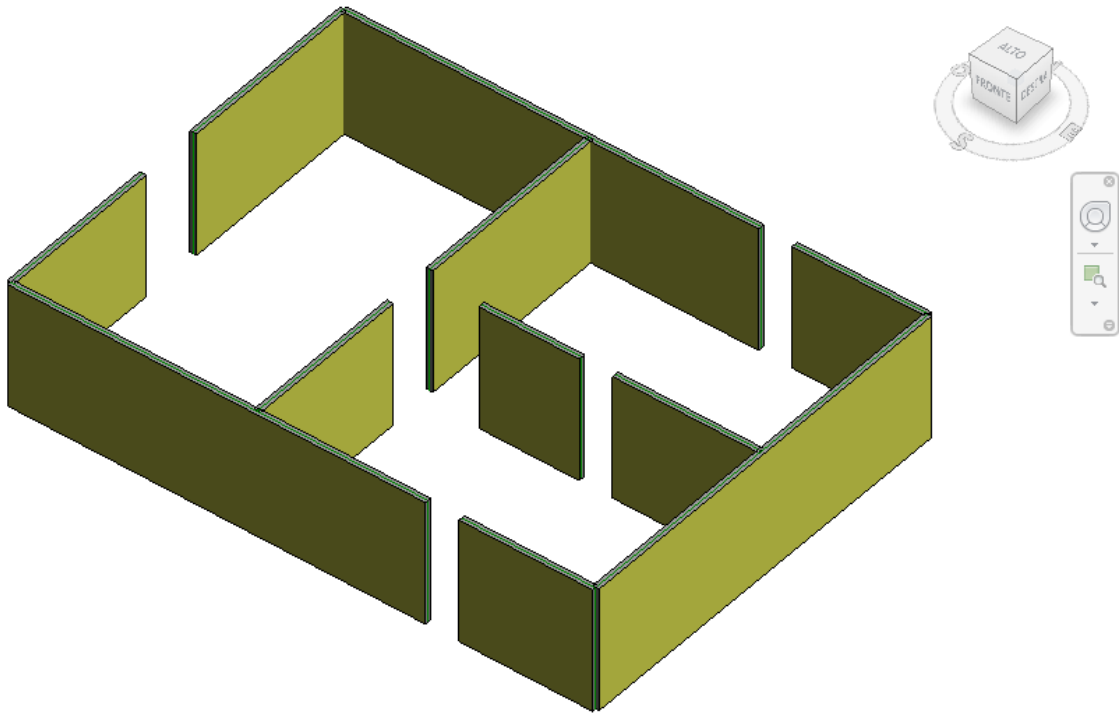


Immagine 7.3: modellazione completa delle pareti del primo piano.

Non vengono modellati i solai in quanto, come si è visto nel § 6.2, risulta più agevole l’inserimento di *story* e *floor loads* in Midas.

### 7.1.2 Modellazione degli elementi *beam* della connessione X-One

Dopo aver modellato la geometria base dei pannelli si è provveduto a realizzare le bielle rappresentanti il connettore X-One.

#### *Modellazione elementi beam tramite famiglia nidificata*

Dapprima si era provato a realizzare il sistema tramite una famiglia nidificata, creando un modello generico ospitato da muro in cui annidare la famiglia delle travi strutturali rappresentanti gli elementi *beam*.

Il vantaggio di questo sistema di modellazione era la possibilità di inserire direttamente nella famiglia anche il *Taglio apertura* nella parete, che sarebbe andato a modificare già correttamente il disegno a parete per l’esportazione.

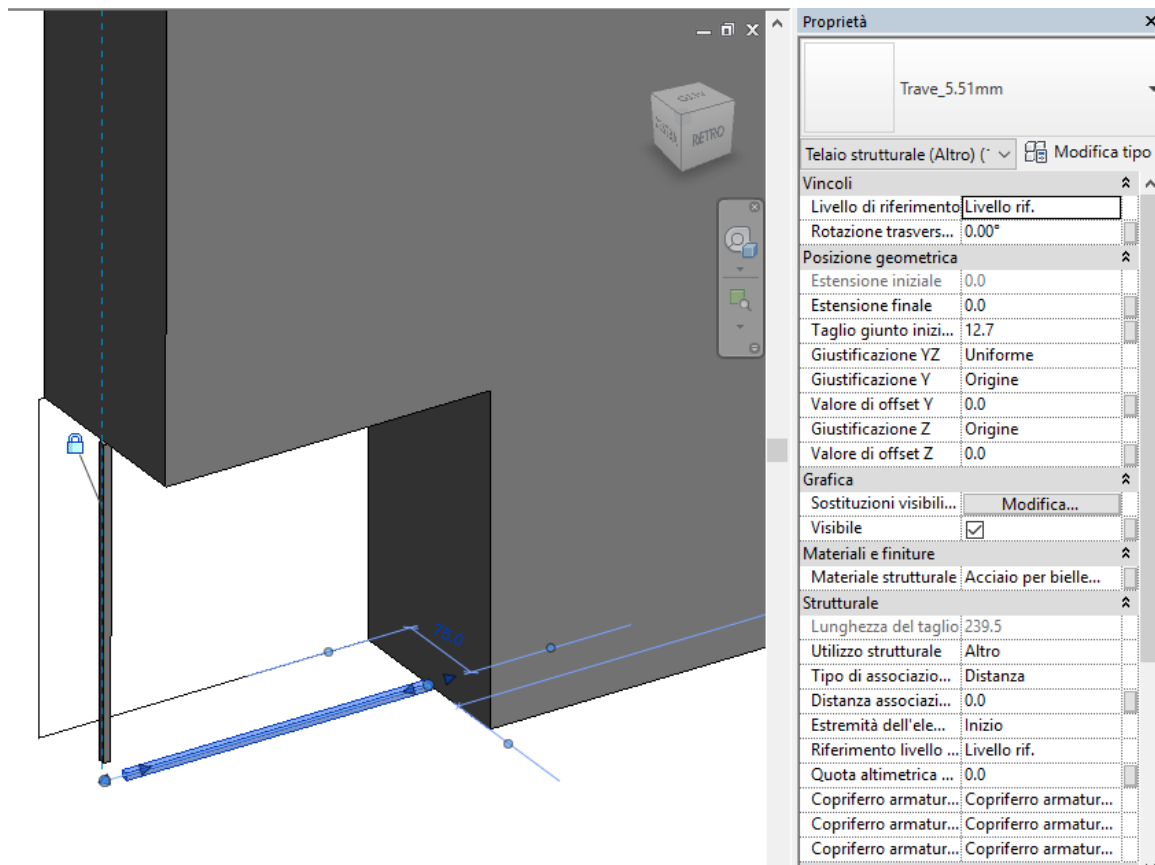


Immagine 7.4: famiglia nidificata per il componente X-One.

Non è stato possibile utilizzare questo sistema in quanto Midas, in fase di importazione, è in grado di leggere solo famiglie che rappresentano componenti strutturali trasferibili. Una famiglia generica basata su muro viene ignorata in quanto Midas non è in grado di leggere la presenza di elementi *beam* all'interno di una famiglia, che viene letta come generica e quindi non può essere associata a nessun elemento *beam* o *plate* in Midas.

#### Modellazione degli elementi beam tramite script Dynamo

Si è quindi passati alla realizzazione di uno *script* in Dynamo per la realizzazione degli elementi *beam*.

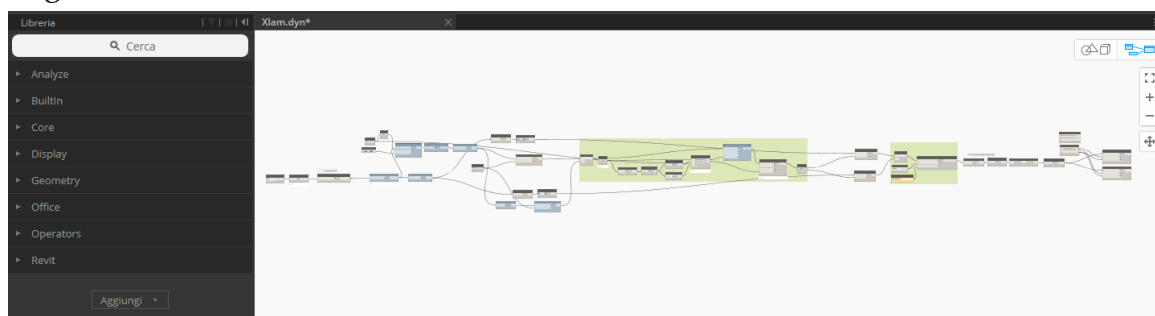


Immagine 7.5: visuale completa dello script creato in Dynamo.

Per semplicità nella progettazione visuale in Dynamo è stata variata la tipologia di muro inserita, passando ad una *facciata continua* senza pannelli o montanti inseriti, per poter ricavare in modo più semplice i contorni delle pareti.

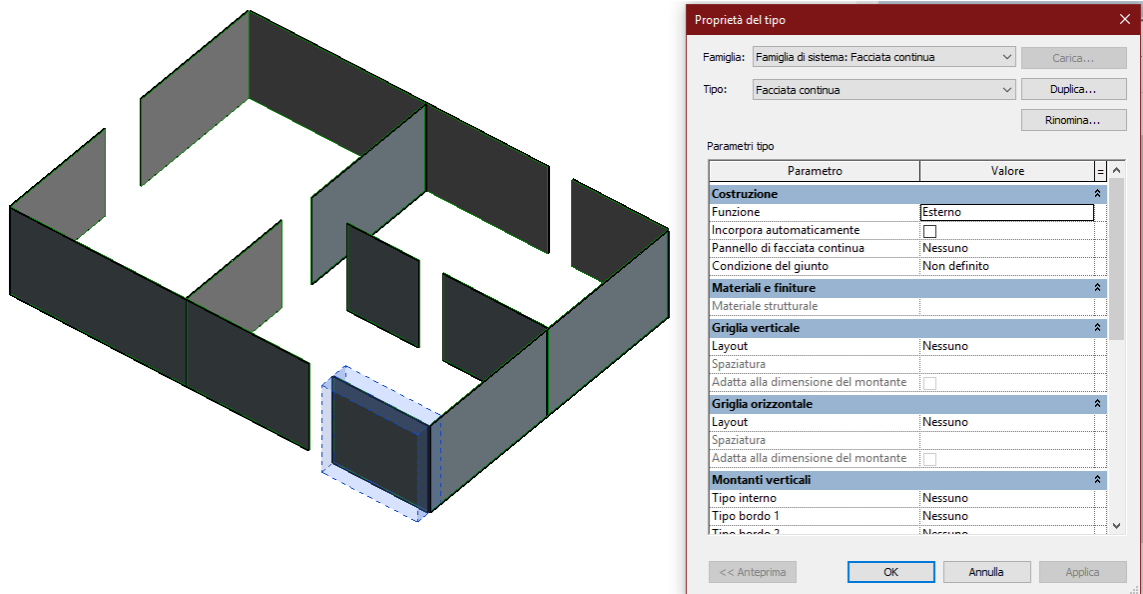


Immagine 7.6: tipologia delle pareti cambiata in facciata continua.

Dynamo è un'applicazione per il *visual programming* in grado di interfacciarsi perfettamente con Revit. Permette di ottenere funzionalità avanzate di modellazione, senza necessità di conoscere linguaggi di programmazione.

Nel nostro caso è stata utilizzata per automatizzare l'operazione di creazione degli elementi *beam* rappresentanti il connettore X-One, allo scopo di rendere interfacciabile e più agevole la modellazione.

Lo scopo dello *script* è quello di riuscire a ricreare i punti estremi delle bielle, in modo da poterli connettere con una linea che andrà poi a formare l'asse strutturale dell'elemento *beam*.

Per poter fare ciò è necessario ottenere la traslazione del punto d'angolo della parete in due direzioni appartenenti al piano della parete, pari ad 1 cm per il disassamento dei connettori e di 25.5 cm per la lunghezza delle bielle, che andrà connesso con il punto d'angolo della parete reale.

Per prima cosa in Dynamo è stato quindi effettuato un offset interno del perimetro della parete di 1 cm, per ottenere il disassamento corretto del punto.

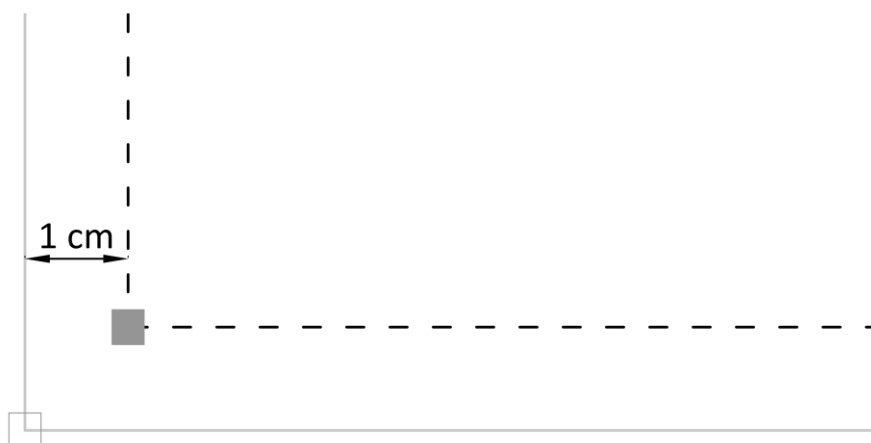


Immagine 7.7: offset interno del perimetro della parete (non in scala).

Il passo successivo è stato quello di introdurre la traslazione nella successiva direzione, per realizzare la lunghezza della biella di 25.5 cm.

La lunghezza di 25.5 cm è stata in questo caso calcolata, per semplicità, parallela al bordo delle pareti, in modo da potersi successivamente ricondurre con precisione alla stessa posizione per la realizzazione della parete. Questa approssimazione introduce un errore sulla lunghezza della biella dello 0.08%, valore assolutamente accettabile.

È stato quindi ricavato un segmento sul perimetro interno di 24.5 cm, per potersi ricondurre alla misura corretta di 25.5 cm.

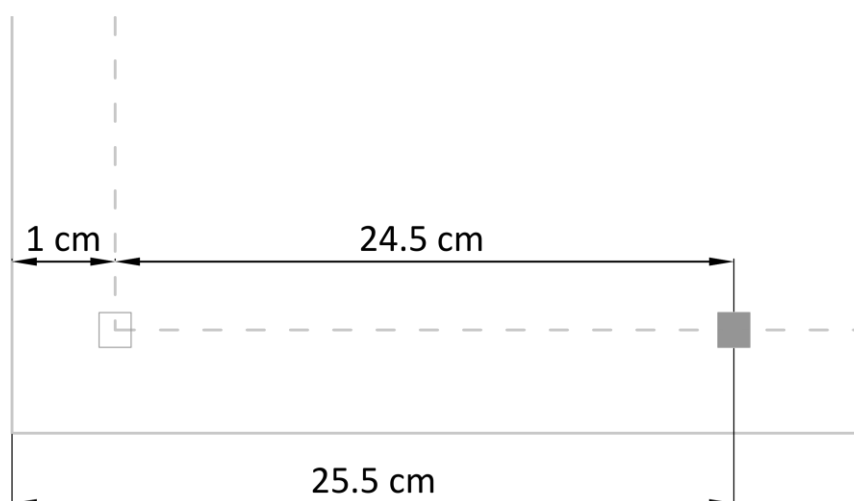


Immagine 7.8: deduzione del punto interno (non in scala).

Sono stati poi connessi i due punti estremi con una linea che verrà utilizzata come asse strutturale dell'elemento *beam*.

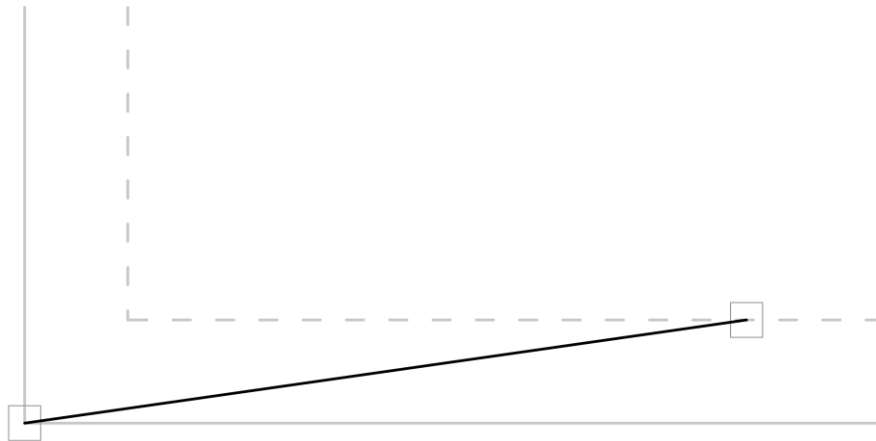


Immagine 7.9: realizzazione della linea rappresentante l'asse strutturale della biella X-Rad.

È poi stata realizzata una famiglia di trave strutturale con le proprietà geometriche indicate al §5.1. Le linee ricavate, come esposto precedentemente, sono state utilizzate come assi strutturali di elementi trave.

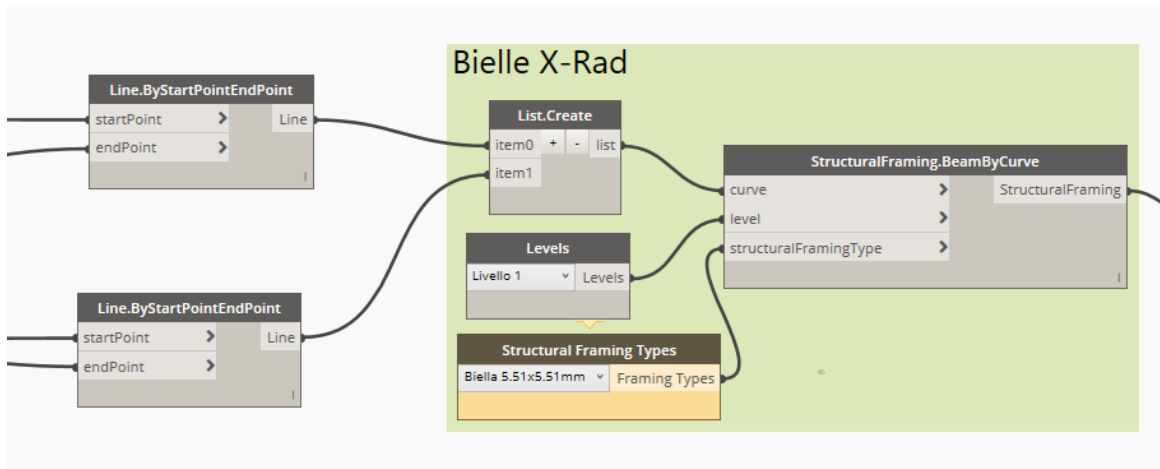
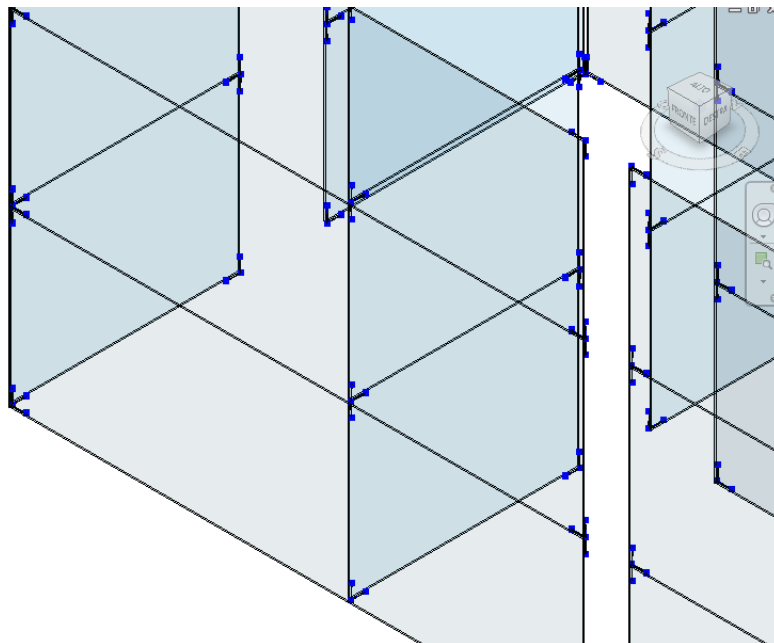


Immagine 7.10: comandi per la creazione delle bielle a partire da linee.

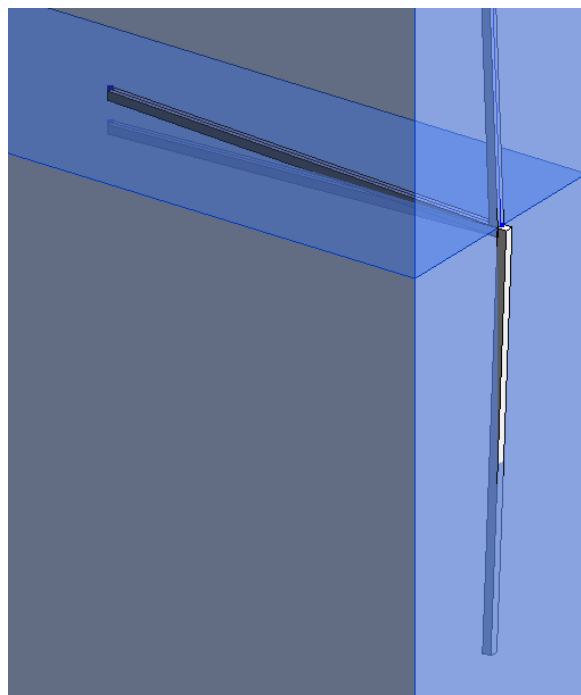
Si è ottenuto quindi tutto il sistema di elementi *beam* per la schematizzazione X-Rad.



*Immagine 7.11: sistema di bielle ottenute con script Dynamo.*

### 7.1.3 Pareti

Arrivati a modellare la connessione era poi necessario modellare le pareti X-Lam. In particolare l'apertura quadrata in corrispondenza della connessione. Inoltre, avendo creato un offset interno di 1 cm della connessione, il bordo della parete non corrispondeva più al punto estremo della biella.



*Immagine 7.12: elementi beam compenetranti l'elemento parete.*

Non era quindi sufficiente posizionare un *Taglio apertura* nei muri, ma si rendeva necessario modificarne il contorno per farlo coincidere con i punti estremi delle bielle. Questa operazione da ripetere per ogni parete risultava estremamente invalidante.

Non era possibile neppure esportare i soli connettori in Midas, che è in grado di modellare solo elementi *plate* quadrangolari, non geometrie complesse come quelle della parete, che avrebbero richiesto in Midas l'inserimento di 4 nuovi nodi per ogni parete, allo scopo di potersi ricondurre alla modellazione di elementi quadrangolari.

La soluzione più conveniente è stata quella di inserire anche la realizzazione di parte della parete in X-Lam nello script di Dynamo.

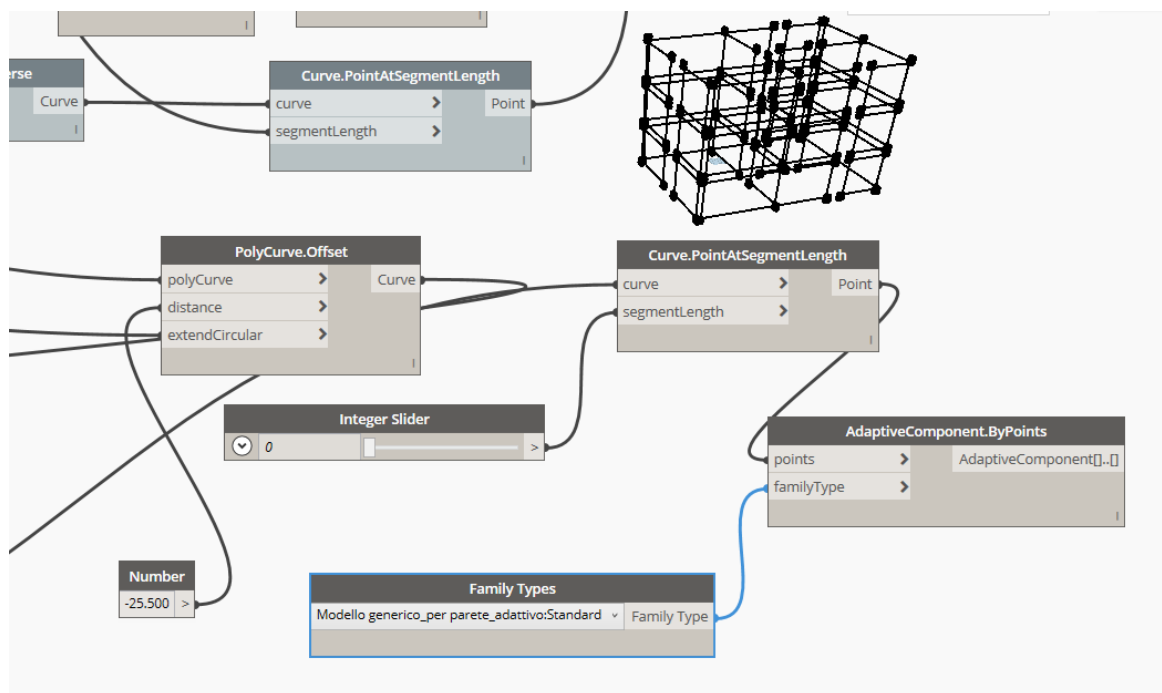
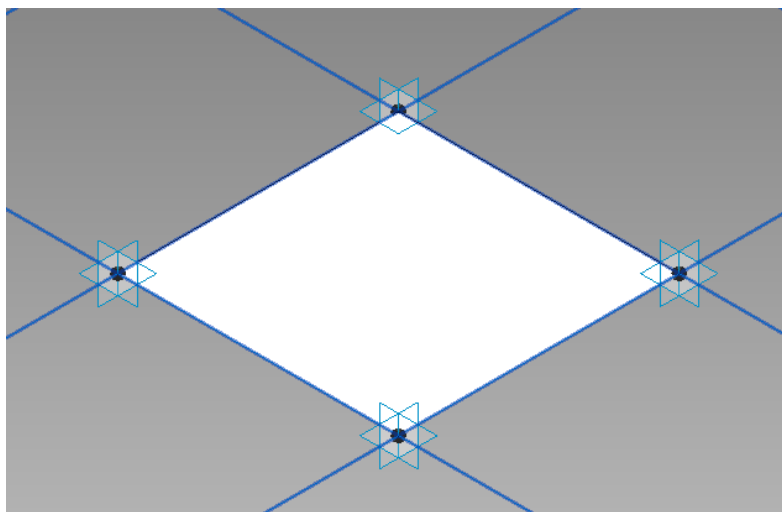


Immagine 7.13: parte di script Dynamo per la realizzazione di parte della parete X-Lam.

Non essendo possibile realizzare l'intera parete perfettamente adattata agli elementi *beam* in Dynamo, si è optato per la realizzazione della parte centrale di ogni parete, in modo da poter esportare in Midas i nodi per poter realizzare gli elementi *plate* quadrangolari e le proprietà della parete.

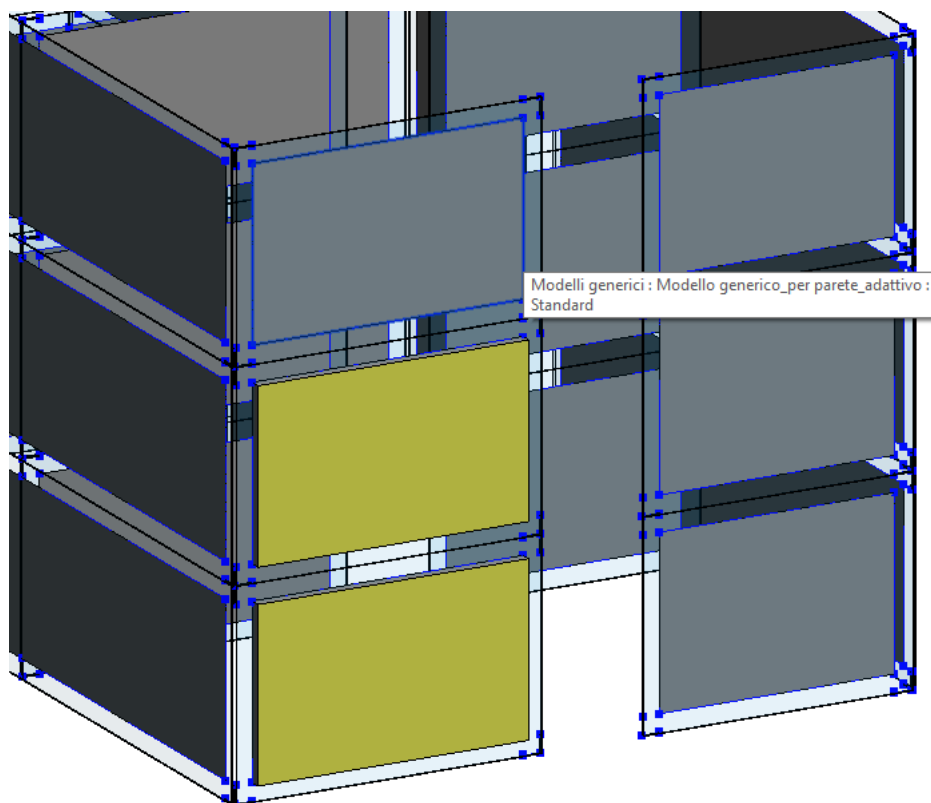
È stata realizzata tramite modello generico una famiglia adattiva vincolata agli angoli.



*Immagine 7.14: modello generico adattivo, rettangolo.*

In Dynamo è stato quindi realizzato un offset della parete verso l'interno di 25.5 cm, in modo da far coincidere gli estremi della superficie creata con gli estremi delle bielle della connessione, inserendo poi il componente adattivo in questa superficie.

In questo modo, una volta in Revit è stato sufficiente utilizzare il comando *Muro da superficie* per inserire correttamente la parte centrale delle pareti della giusta tipologia.



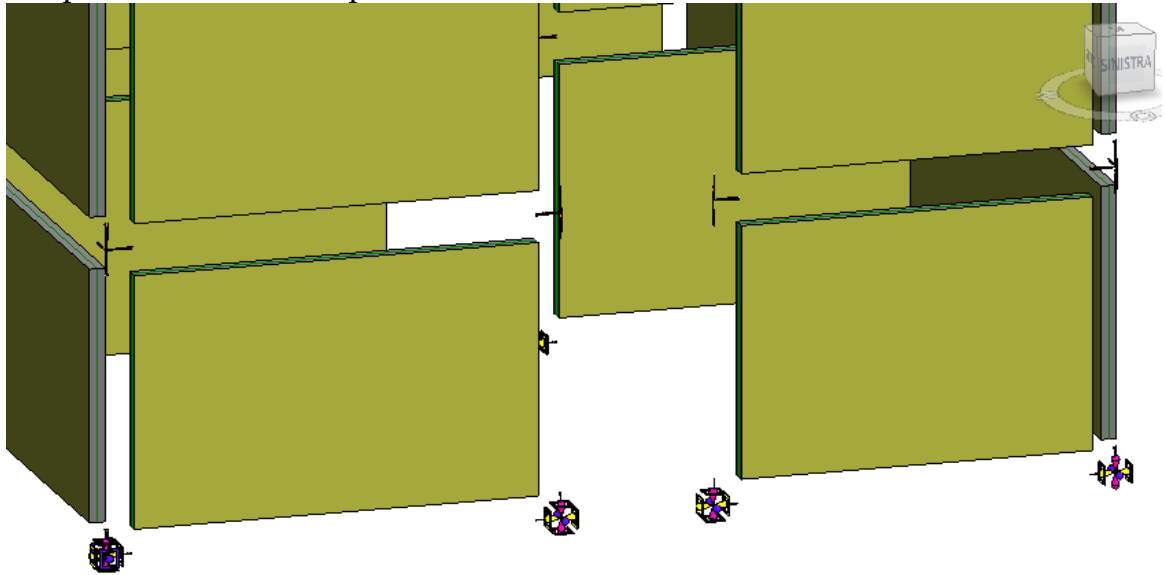
*Immagine 7.15: inserimento della parte centrale delle pareti.*



### 7.1.4 Vincoli

È possibile ora provvedere all'inserimento dei vincoli esterni. Vengono inseriti i vincoli a cerniera connessi alle bielle del sistema X-Rad a terra.

Non è possibile inserire i vincoli ai bordi inferiori della parete in quanto la parte inferiore della parete non è ancora stata modellata. Anche se fosse stata modellata, Revit non permette comunque di inserire dei vincoli puntuali su elementi analitici di tipo lineare, come in questo caso.

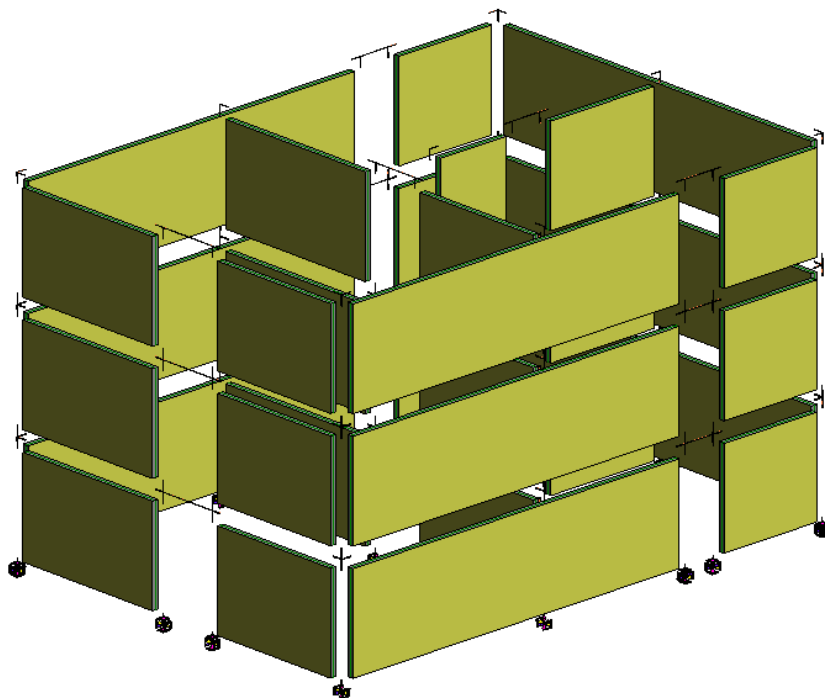


*Immagine 7.16: inserimento dei vincoli possibili in Revit.*

Restano da inserire successivamente in Midas i vincoli a terra delle pareti in legno e gli *elastic link* fra bordi di pareti.

### 7.1.5 Altri elementi

Altri elementi che è possibile inserire in Revit sono ad esempio le bielle utilizzate per rappresentare gli architravi.



*Immagine 7.17: modello da esportare al più conveniente stadio di avanzamento.*

## 7.2 IMPORTAZIONE IN MIDAS GEN

L'importazione in Midas non ha posto particolari problemi, vista anche l'analisi condotta al § 6.2.

Si è quindi provveduto all'inserimento delle parti di parenti mancanti per il primo piano, replicandole per i piani successivi.

Successivamente sono state effettuate tutte le schematizzazioni sul modello indicate al § 5.3.1 e sono state introdotte le condizioni di vincolo mancanti.

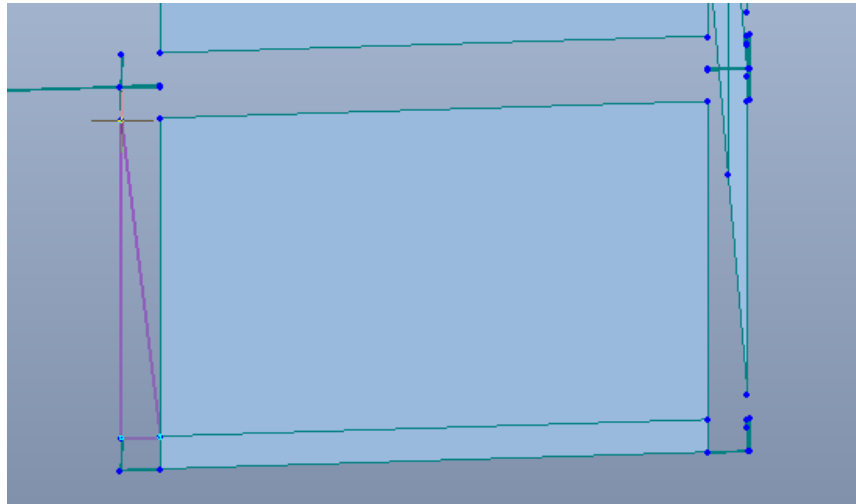


Immagine 7.18: completamento delle pareti in Midas Gen.

Al termine di queste operazioni il modello è risultato corrispondente al modello realizzato interamente in Midas come al § 5.4.

### 7.3 ESPORTAZIONE DEI RISULTATI DELL'ANALISI DA MIDAS GEN

Il problema dell'esportazione dei risultati da Midas Gen verso Revit risiede nella modalità di esportazione da Revit verso Midas.

Nell'esportazione tramite *Send model to Midas Gen* non viene esportato un'Id univoco dell'elemento, che viene invece assegnato in Midas. In questo modo non esiste corrispondenza fra elementi tra Revit e Midas nel momento dell'aggiornamento del modello proveniente da Midas. La mancanza di corrispondenza risulta invalidante nel momento in cui dovesse essere necessaria l'interazione con software di terze parti.

Per questa problematica esistono due possibili soluzioni:

- a partire dal file *.mgt* esportato da Midas Gen è possibile, attraverso l'attenta realizzazione di uno script di programmazione visuale, ricreare il modello in Revit a partire dal modello in Midas. In questo modo gli elementi ricreati in Revit conterranno anche l'Id che è stato associato agli elementi in Midas, generando una corrispondenza fra elementi. La problematica di questo sistema è che ricreando un nuovo modello vengono importate solamente le informazioni contenute nel file di testo *.mgt*, perdendo quindi tutte le informazioni implementate in Revit in precedenza e non trasferite in Midas durante l'esportazione;

- realizzare un confronto fra le coordinate del baricentro degli elementi in Midas e Revit, con il medesimo sistema di riferimento. In questo modo, creando una corrispondenza fra i punti è possibile realizzare l'associazione fra gli elementi. Questo metodo implica però dei requisiti stringenti di modellazione, quali ad esempio l'adozione della medesima origine del sistema di riferimento ed alcuni criteri standard di modellazione per non creare ambiguità, spesso difficilmente utilizzabili, data anche la partecipazione di diversi soggetti alla modellazione.

Le problematiche indicate non sussistono per il sistema indicato, che viene verificato tramite appartenenza al dominio di resistenza, senza alcuna possibilità di dimensionamento e per il quale non sono necessarie interazioni con software esterni.

#### **7.4 VERIFICA DELLA CONNESSIONE TRAMITE SOFTWARE ROTHOBLAAS**

La verifica della connessione con il software Rothoblaas risulta molto limitante, in quanto non è possibile in nessun modo eseguire l'importazione di file di testo, tabulati o listati contenenti le sollecitazioni gravanti sulle connessioni da verificare. Questo risulta essere un problema non secondario in caso di combinazioni sismiche, che implicano una quantità di dati non indifferente da inserire manualmente nel software.

Il problema è già stato segnalato a Rothoblaas ed una volta risolto si potrà procedere anche con l'implementazione di uno dei due sistemi indicati al paragrafo precedente § 7.3 in base alla maggiore corrispondenza alle esigenze ed alle possibilità di sviluppo.

## 7.5 ESPORTAZIONE VERSO DIETRICH'S

Dietrich's è un software per la produzione CAD / CAM 3D per le costruzioni in legno. Risulta essere fra i leader mondiali dei software nel settore dei programmi CAD per le costruzioni in legno.

Il software dispone di strumenti tali da garantire la possibilità di risultare completo e autonomo per quanto riguarda la progettazione di edifici in legno.

È in grado di realizzare l'ultimo passaggio della filiera della produzione, garantendo un pieno controllo delle macchine CNC per il taglio e la lavorazione dei pannelli.

Viene garantita la possibilità di esportazione e importazione di file *.ifc*, evitando un nuovo inserimento dell'edificio nel software.

Sarebbe risultato interessante effettuare quest'ultimo passaggio in quanto Dietrich's, oltre alla modellazione geometrica, permette di associare ad ogni geometria una lavorazione dettagliata sull'elemento tarata precisamente sul controllo di una macchina CNC ed allo strumento da utilizzare.

Non è stato possibile verificare la possibilità di esportazione da Revit verso Dietrich's non essendo disponibile una licenza temporanea per il software.

È stato invece possibile importare in Revit un file *.ifc* esportato da Dietrich's, del quale sono state recepite le geometrie della struttura e pochissime altre informazioni.

Le categorie importate sono solo di tipo muro, telaio strutturale, modello generico, pavimento e tetto, tutti elementi non parametrizzati e senza possibilità di modifica se non la traslazione.

Gran parte degli oggetti, anche d'arredo, risultano essere importati come telaio strutturale o modello generico.

Molti elementi diversi, quali arredi, gradini e elementi MEP, risultano appartenere allo stesso modello generico.

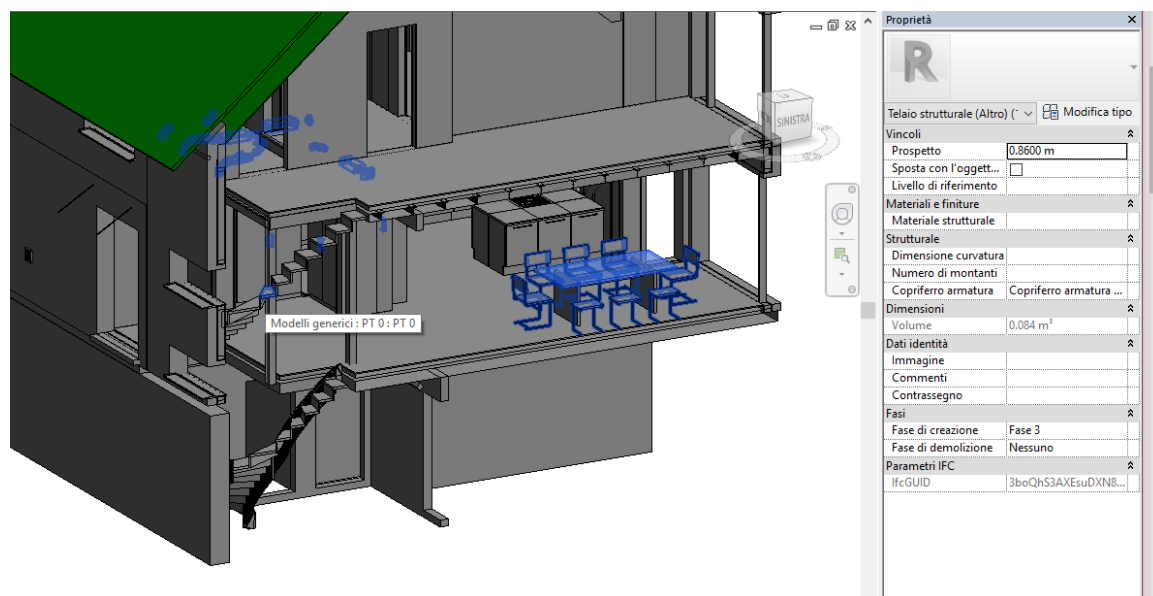


Immagine 7.19: ifc prodotto da Dietrich's importato in Revit.

Non essendovi la possibilità di un confronto con il modello realizzato in Dietrich's non è possibile trarre conclusioni esaustive riguardo l'interoperabilità.

Il tentativo di interoperabilità è stato effettuato peraltro in una sola direzione, risultando abbastanza primitiva.

---

## CONCLUSIONI

---

Sostanzialmente, le conclusioni tratte dal lavoro di tesi riflettono quanto acquisito durante il processo di ricerca.

L'attuale situazione prevede il molteplice ridisegno dei modelli, dapprima geometrico, poi strutturale e successivamente la preparazione del modello per macchinari CNC, di cui è necessaria un'adeguata conoscenza. Non si tratta infatti di definire solamente la corretta geometria, ma anche la scelta dello strumento e delle lavorazioni più adeguate per ogni lavorazione.

Per quanto riguarda il sistema X-Rad si è riusciti a costruire un percorso abbastanza agevole che consenta la verifica delle connessioni. Le limitazioni rimanenti appartengono al software proprietario per la verifica dei connettori.

Sono state necessarie delle schematizzazioni, e la modellazione più efficiente risulta essere di tipo ibrido, con una parte di modello inserita in Revit ed una parte di modello inserita in Midas, in base alla convenienza.

La precisa modellazione imposta dal sistema X-Rad ha da un lato complicato il processo, che ha richiesto diversi accorgimenti del tutto particolari di schematizzazione che hanno impedito l'utilizzo del software Sismicad, dall'altro lo ha semplificato in quanto gli accorgimenti richiesti erano facilmente implementabili in un software ad elementi finiti.

Il compromesso adottato permette di snellire il processo, evitando il duplice e completo ridisegno del modello geometrico e analitico.

Una differente situazione si pone invece nei riguardi delle costruzioni in legno prefabbricato in generale.

I software maggiormente utilizzati attualmente sono del tipo a modellazione di elementi tridimensionali come Sismicad, in quanto questa tipologia di software include accorgimenti specifici per il legno non presenti in Midas, riguardo ad

esempio la gestione dei bordi delle pareti e di particolari tipologie di vincoli come gli *hold-down*, risultando molto più immediati nell'immissione di dati e nel feedback dei risultati.

L'interoperabilità fra questi software e Revit è risultata lacunosa, concordemente con quanto emerso dalla fase di ricerca.

Le problematiche non sembrano essere dovute agli strumenti software, come si è visto nella parte sperimentale, ma alla mancanza di coordinazione fra strutture diverse.

Un esempio molto chiaro è il fatto che Revit sia in grado di leggere i parametri di un pannello X-Lam realizzato in Sismicad.

Sarebbe sufficiente realizzare una tipologia di muro in Revit in cui far corrispondere i parametri inseribili con quelli di Sismicad, e renderlo immediatamente riconoscibile per realizzare un già ottimo livello di interoperabilità.

In sostanza quindi, per il sistema X-Rad è risultato conveniente e proficuo operare con Revit e Midas, che consente un buon livello di interoperabilità, ma non dispone di alcun tipo di verifica per il legno.

Per questo motivo per il caso generale della costruzione prefabbricata in legno, risulta sensato operare con strumenti specifici come Sismicad, il cui onere da sostenere per poter scambiare informazioni risulta essere la conversione degli elementi importati e la non totale trasferibilità delle informazioni.

Uno sviluppo futuro nei riguardi dell'interoperabilità verso software che gestiscono macchine CNC potrebbe essere quello di arrivare alla completa ed esaustiva definizione della geometria in Revit, rendendone possibile la piena importazione in software CAM, in cui assegnare e gestire le lavorazioni sulla geometria già definita.

Il livello attuale di interoperabilità nella filiera di produzione di edifici prefabbricati in legno non risulta quindi soddisfacente, soprattutto in relazione alle molteplici soluzioni tecniche innovative sviluppate ed alla crescita del settore nel corso degli ultimi anni.

Il sistema di tipo chiuso con il quale si opera in generale in questo settore rende difficili lo sviluppo di soluzioni condivisibili, che potrebbero essere sviluppate invece in ambiente accademico.







---

## BIBLIOGRAFIA

---

- Arif, M., Goulding J., Rahimian F. (2012). "Promoting Off-Site Construction: Future Challenges and Opportunities". *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 75–78.
- Beck, D. (2015). *Design and Development of Standardised BIM Components for the Offsite Timber Manufacturing Industry*, Master's Thesis, Southampton Solent University.
- Bernasconi, Andrea (2010). *Il materiale XLAM Caratteristiche e prestazioni*. Web 11/01/2018. Accessibile a < <http://www.promolegno.com/tecnologia/sistemi-costruttivi/xlam> >.
- Bernasconi, Andrea (2011). *Il calcolo dell'XLAM Basi, normative, progettazione, applicazione*. Web 11/01/2018. Accessibile a < <http://www.promolegno.com/tecnologia/statica-calcolo> >.
- Bernasconi, Andrea, Gerhard Schickhofer, Maurizio Piazza (2005). *Il calcolo delle strutture in legno*. Web 11/01/2018. Accessibile a < <http://www.promolegno.com/tecnologia/statica-calcolo> >.
- Goulding, J., et al. (2014). "New offsite production and business models in construction: priorities for the future research agenda". *Architectural Engineering and Design Management*, 1 - 22.
- Haapio, Appu (2013). *Puurakentamisen tulevaisuuden näkymät. Haastattelututkimus [Future trends of wood construction. Interviews]*, Espoo, VTT.
- Hairstans, Robert (2010). "TIMBER OFFSITE MODERN METHODS OF CONSTRUCTION". *World Conference on Timber Engineering*.
- Hairstans, Robert (2010). *Off-site and modern methods of timber construction: a sustainable approach*, High Wycombe, TRADA Technology Ltd.
- Jeonghyun, Kim, Jeon Bong Hee (2012). "Design Integrated Parametric Modeling Methodology for Han-ok". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2(11), 239-243.

- Livingstone, Andrew et al. (2016). "Multi-Dimensional Data Fitting for the Structural Design of a Simple Timber Connection". *Proceedings of the WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering, Vienna / Austria, August 22-25, 2016*.
- Mancini, Giovanna. "L'edilizia in legno in Italia raggiunge quota 700 milioni". *Il sole 24 ore*, 12 luglio 2017. Web 11/01/2017. Accessibile a <<http://www.ilsole24ore.com/art/impresa-e-territori/2017-07-11/l-edilizia-legno-italia-raggiunge-quota-700-milioni-143305.shtml?uuid=AEFYeTvB>>
- Meyer, J. et al. (2015). "COMPUTER DESIGN AND DIGITAL MANUFACTURING OF FOLDED ARCHITECTURAL STRUCTURES COMPOSED OF WOOD PANELS". *Proceedings of the 20th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2015): EMERGING EXPERIENCES IN THE PAST, PRESENT AND FUTURE OF DIGITAL ARCHITECTURE*, 641-650.
- Nawari, N. (2012). "BIM Standard in Off-Site Construction". *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 107-113.
- Patlakas, Panagiotis (2015). "Development of a software application for timber design". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 168, 23-28.
- Patlakas, Panagiotis, Andrew Livingstone, Robert Hairstans (2015). "A BIM Platform for Offsite Timber Construction". *Real Time – Proceedings of the 33<sup>rd</sup> International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Vienna, Austria, 16-18<sup>th</sup> September 2015*, eds. Bob Martens et al., vol. 1, 597-604.
- Patlakas, Panagiotis, Jesus Menendez, Robert Hairstans (2015). "The Potential, Requirements, and Limitations of BIM for Offsite Timber Construction". *International Journal of 3-D Information Modeling*, 4(1), 54-70.
- Patlakas, Panagiotis, Andrew Livingstone, Robert Hairstans (2017). "An Automated Code Compliance system within a BIM environment". *ShoCK! – Sharing of Computable Knowledge! - Proceedings of the 35<sup>th</sup> International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Roma, Italy, 20<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> September 2017*, eds. Antonio Fioravanti et al., vol. 1, 153-160.
- Polastri, Andrea, Albino Angeli (2014). "AN INNOVATIVE CONNECTION SYSTEM FOR CLT STRUCTURES: EXPERIMENTAL – NUMERICAL ANALYSIS". *WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings*.

- Polastri, Andrea, Albino Angeli, Dal Ri Gianni (2014). "A NEW CONSTRUCTION SYSTEM FOR CLT STRUCTURES". *WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings*.
- Polastri, Andrea (2014). "An innovative connector system for fast and safe erection with CLT". *Internationales Holzbau-Forum IHF 2014*, 1-14.
- Ruuska, Antti, Tarja Häkkinen (2016). "Efficiency in the delivery of multi-story timber buildings". *Energy Procedia*, vol. 96, 190-201.
- Yang, X., M. Koehl, P. Grussenmeyer (2017). "PARAMETRIC MODELLING OF AS-BUILT BEAM FRAMED STRUCTURE IN BIM ENVIRONMENT". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2W3(42), 651-657.
- Zan Bruno, (2015). *Calcolo e verifica delle strutture di legno: Travi, solai, pareti, collegamenti e resistenza al fuoco*, Palermo, Flaccovio Editore.