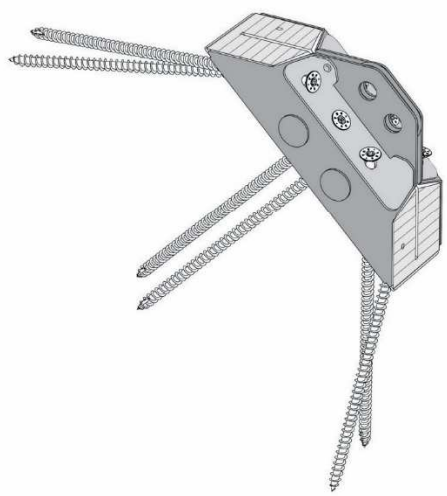
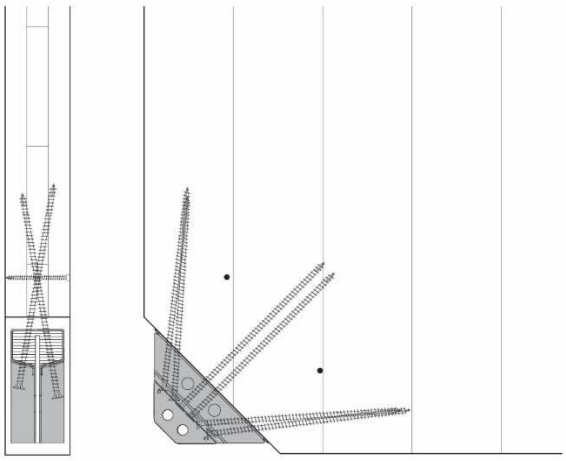
CONNESSIONE X-ONE
ANALISI SPERIMENTALE

COMPORTAMENTO MECCANICO E DOMINIO RESISTENTE

SVILUPPO DI UN MODELLO DI CALCOLO INNOVATIVO PER EDIFICI IN LEGNO
CON IL SISTEMA X-RAD





10/2015

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE 4

2. DESCRIZIONE DELLA CONNESSIONE 5

2.1. COMPONENTI ELEMENTARI 5

2.1.1. Box esterno 6

2.1.2. Inserto in LVL 8

2.1.3. Piastra interna 8

2.1.4. Bulloni Ø12 8

2.1.5. Viti tuttofiletto VGS 9

2.2. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI 10

2.2.1. Legno LVL (Laminated veneer lumber) 10

2.2.2. Acciaio 10

3. I DATI DI INPUT 12

3.1. PROVE ESEGUITE PRESSO IL TU-GRAZ 12

3.1.1. Prove monotone LUNGO Y 12

3.1.2. Prove monotone LUNGO X 14

3.2. PROVE ESEGUITE PRESSO IL CENTRO CNR-IVALSA (SAN MICHELE A.A.) 15

3.2.1. Prove cicliche LUNGO Y 15

3.2.2. Prove cicliche LUNGO X 16

3.3. PROVE ESEGUITE PRESSO L'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO 17

3.3.1. Prove sul pannello singolo 17

3.3.2. Prove sul pannello composto 19

3.4. ANALISI FEM 20

3.4.1. Casi di analisi 21

3.4.2. Risultati principali 22

4. STUDIO DELLE VARIE CONDIZIONI DI SOLLECITAZIONE 25

4.1. SISTEMI DI COORDINATE E DEFINIZIONI 25

4.2. SINTESI DEI DATI SPERIMENTALI AL MOMENTO DISPONIBILI 26

4.3. MODALITÀ DI ROTTURA DELLA CONNESSIONE 27

4.3.1. Taglio-trazione (α=0°) 29

4.3.2. Trazione a 45° (α=45°) 29

4.3.3. Trazione (α=90°) 30

4.3.4. Taglio a 45° (α=135° oppure α=315°) 30

4.3.5. Taglio-compressione (α=180°) 31

4.3.6. Compressione a 45° (α=225°) 31

4.3.7. Compressione (α=270°) 31

4.4. CALCOLO A ROTTURA 31

4.4.1. Taglio-trazione (α=0°) 32

4.4.2. Trazione a 45° (α=45°) 32

4.4.3. Trazione (α=90°) 34

4.4.4. Taglio a 45° (α=135° oppure α=315°) 34

4.4.5. Taglio-compressione (α=180°) 35

4.4.6. Compressione a 45° (α=225°) 36

rothoblaas

Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

4.4.7. Compressione (α=270°) 36

5. DEFINIZIONE DI UN CRITERIO DI RESISTENZA 37

5.1. COSTRUZIONE DEL DOMINIO DI ROTTURA 37

5.1.1. Dominio basato sulle resistenze sperimentali 37

5.1.2. Dominio basato sulle resistenze da modellazione FEM 39

5.1.3. Confronti dati sperimentali-modellazioni FEM 39

5.1.4. Dominio basato sulle resistenze da calcolo a rottura 40

5.1.5. Confronti dati sperimentali - calcolo a rottura 41

5.1.6. Interpretazione grafica del dominio 42

5.2. DOMINIO DI ROTTURA PER IL PROGETTISTA 43

5.2.1. Campo di utilizzo della connessione 45

5.2.2. Dominio di rottura caratteristico 45

5.2.3. Dominio di rottura di progetto 47

5.3. PRESCRIZIONI PROGETTUALI DA BENESTARE TECNICO EUROPEO (ETA- 15/0632) 48

5.3.1. Fenomeni di splitting 49

rothoblaas

Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

1. INTRODUZIONE

La presente relazione tecnica è redatta dall'azienda Rotho Blaas s.r.l. allo scopo di approfondire gli aspetti strutturali, in relazione al nuovo sistema di connessione denominato "X-ONE". Visto il carattere innovativo della connessione, sono state eseguite una serie di prove di laboratorio, suffragate da analisi ad elementi finiti. Tali test di laboratorio sono stati utilizzati come punto di partenza per la redazione della presente. Si riporteranno una serie di considerazioni e formulazioni analitiche, utili per la definizione di un criterio di verifica per la connessione. La presente relazione riporta una criterio di verifica del sistema X-RAD, limitatamente all'elemento X-ONE e alle viti tuttofiletto VGS che lo collegano al pannello CLT. Gli altri componenti del sistema, quali piastre esterne X-PLATE, restano escluse dalla presente.

La presente ha lo scopo di fornire al progettista strutturale una guida teorica per la verifica della connessione e in nessun caso può essere utilizzata al di fuori di tale scopo, senza l'autorizzazione dell'azienda Rotho Blaas. In ogni caso, come anche riportato sul Benestare Tecnico Europeo della connessione (ETA) la progettazione di connessioni X-RAD deve essere condotta sotto la responsabilità di un ingegnere con esperienza nelle costruzioni in legno (ETA 15/0632 §2.2 *Design of connections with X-RAD connectors is carried out under the resposability of an engineer experienced in timber strucutres*).

Nel **capitolo 2** si riportano una descrizione della connessione e dei materiali che la costituiscono.

Nel **capitolo 3** si riportano brevemente i principali dati disponibili, quali risultati delle prove di laboratorio e simulazioni FEM.

Nel **capitolo 4** si riporta uno studio in merito alle varie condizioni di sollecitazione cui la connessione può essere soggetta. Le varie considerazioni sono basate sia sui dati sperimentali sia su schemi analitici.

Nel **capitolo 5** si riporta l'elaborazione di un criterio di resistenza per la verifica analitica della connessione, noti i valori delle forze sollecitanti. Il criterio di resistenza è stato elaborato partendo dai calcoli analitici, suffragati dalle prove sperimentali disponibili, incrociate con i risultati derivanti dalle modellazioni FEM.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

2. DESCRIZIONE DELLA CONNESSIONE

Il connettore X-ONE consiste in un box esterno in acciaio (1), con un inserto in legno LVL e una piastra interna (2), entrambi connessi al box esterno con due bulloni Ø12. La piastra interna e il box esterno sono connessi a delle piastre esterne X-PLATE con due bulloni Ø16 per formare il sistema X-RAD. Il collegamento con il pannello in CLT è assicurato da 6 viti tuttofiletto VGS inserite con inclinazioni variabili.

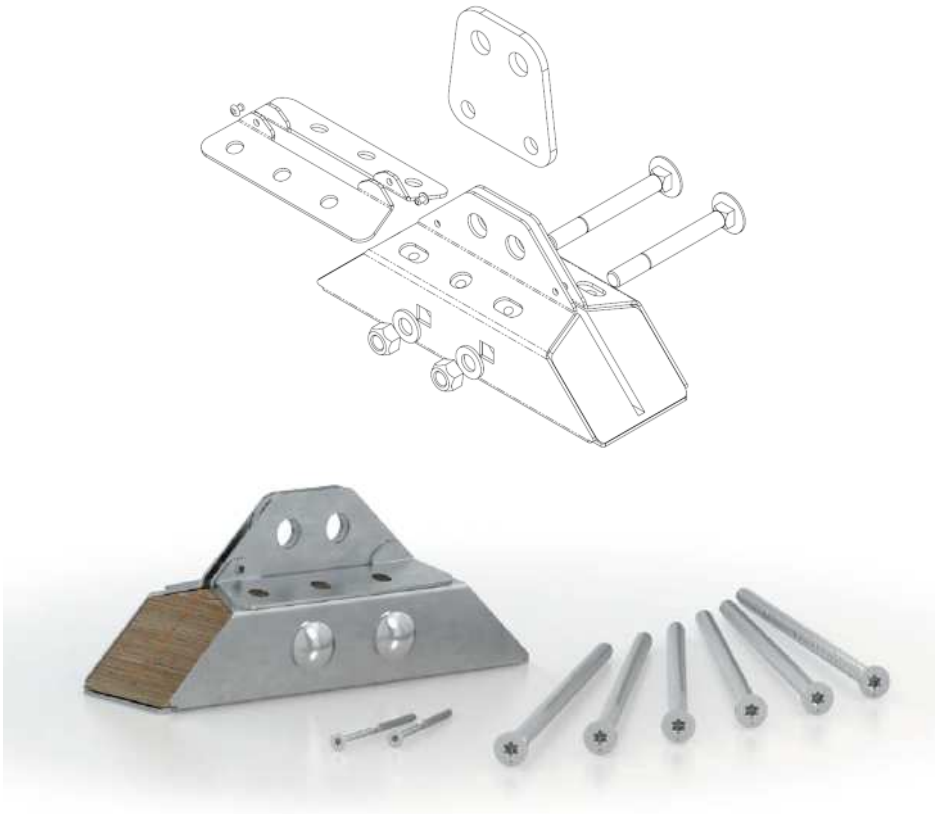


Figura 1: Esploso della connessione

2.1. Componenti elementari

Come visto, il sistema di connessione X-RAD si compone tre componenti base, quali:

1. **X-ONE**: è un elemento preassemblato, composto dai seguenti elementi:
    - un box esterno, costituito da una lamiera piegata, che va ad avvolgere l'inserto in LVL, il quale è sollecitato principalmente a rifollamento in corrispondenza dei bulloni di collegamento alla piastra esterna;
    - un inserto in LVL, sollecitato a compressione ortogonale alla fibra e a rifollamento dai bulloni interni;
    - una piastra interna, collegata alla piastra esterna e al box metallico per mezzo dei due bulloni esterni;

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

- 2 bulloni interni Ø12, che collegano la piastra interna all'inserto in LVL, creando una connessione a taglio legno-acciaio-legno.

2. **6 VITI TUTTOFILETTO VGS** caricate assialmente e a taglio, che realizzano la connessione legno-legno tra il pannello CLT e l'inserto in LVL dell'X-ONE.
3. **PIASTRE ESTERNE X-PLATE**: piastre in acciaio che consentono il collegamento dell'X-ONE a terra o il collegamento reciproco X-ONE/X-ONE; sono disponibili una serie di piastre studiate per soddisfare le più svariate configurazioni geometriche. Le piastre esterne sono collegate all'X-ONE con 2 bulloni Ø16.

Si riportano alcune immagini dei componenti.

Figura 2: Due immagini dell'X-ONE

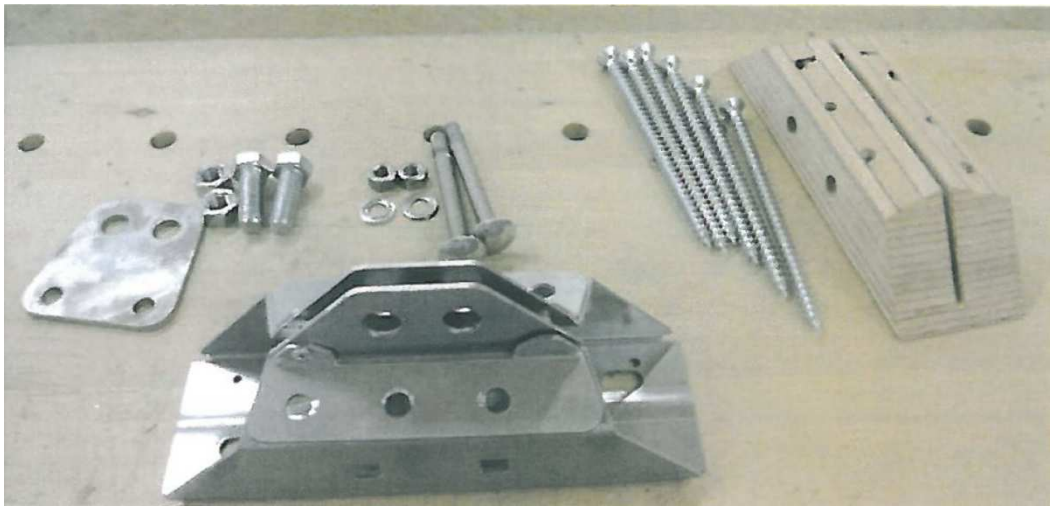


Figura 3: Componenti del sistema X-RAD

2.1.1. Box esterno

E' costituito da una lamiera piegata in acciaio DX51D, o equivalente, con le seguenti caratteristiche geometriche.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

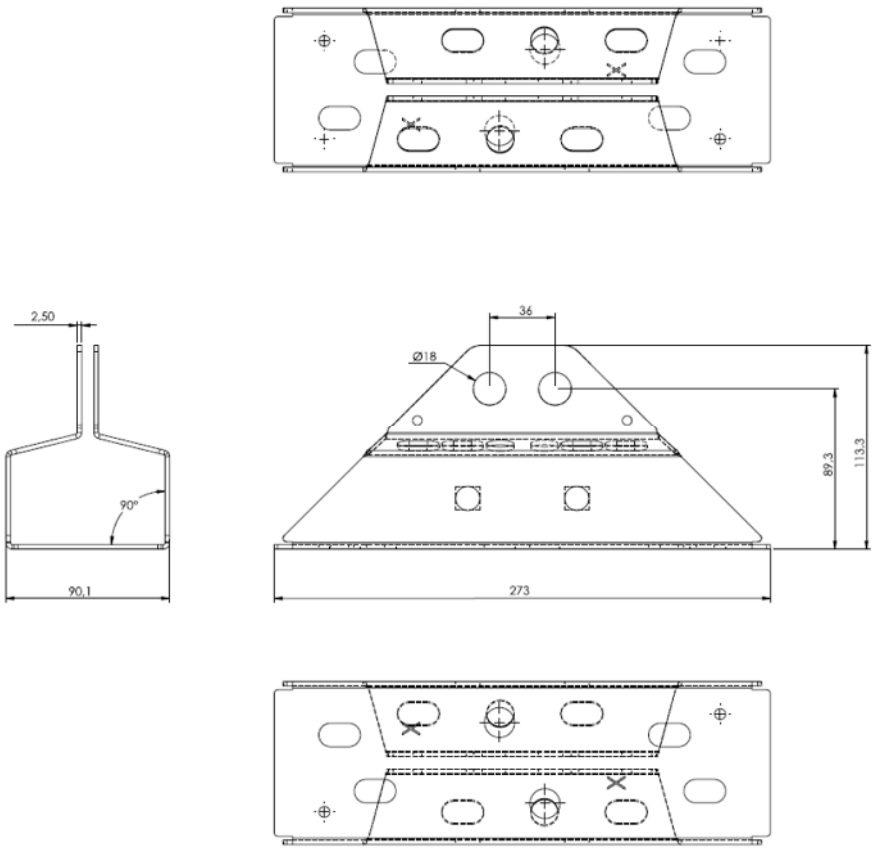


Figura 4: Box esterno in acciaio.

E' presente una lamiera aggiuntiva che viene posizionata nella zona di infissione delle viti tuttofiletto. Scopo della lamiera è rinforzare la piastra per prevenire la penetrazione della testa delle viti per punzonamento della piastra metallica.

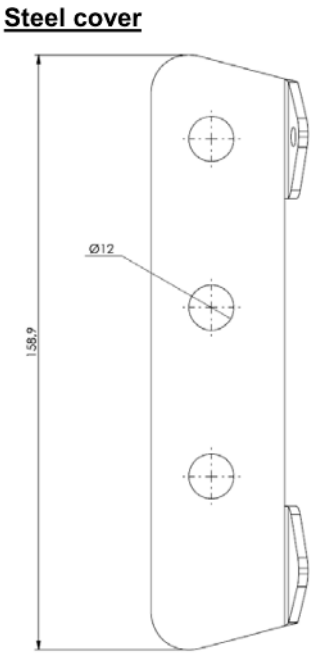


Figura 5: Lamiera aggiuntiva per il box esterno.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

2.1.2. Inserto in LVL

E' un elemento in legno LVL sagomato come il box esterno e inserito all'interno di questo. L'inserto ha una fresata centrale per ospitare la piastra interna ed è preforato per ospitare i bulloni Ø12. Sono presenti anche 6 prefori per l'inserimento delle viti tuttofiletto VGS ed ulteriori 2 prefori per il posizionamento delle viti HBS di montaggio.

2.1.3. Piastra interna

E' costituita da una piastra in acciaio DX51D, o equivalente, con le seguenti caratteristiche geometriche.

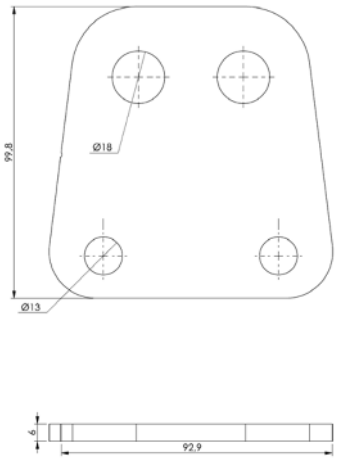


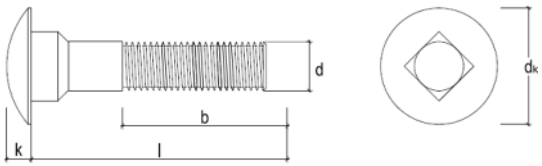
Figura 6: Piastra interna

2.1.4. Bulloni Ø12

I bulloni Ø12 che collegano il box esterno, l'inserto in LVL e la piastra interna, hanno le seguenti caratteristiche geometriche e meccaniche.

Bolt 8.8 M12x110 mm	
Tensile strength	≥ 600 N/mm²
E-Modulus	210 000 N/mm²
Head diameter d_k	30.65 mm
Head height k	6.95 mm
Nominal diameter d	12 mm
Length l	110 mm
Threaded length b	30 mm
Pitch	1.75 mm

Bolt



rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Special nut	
Thread diameter d	M12
Head dimension sw	24 mm
Head thickness t	5 mm
Height h	15 mm
Outer diameter D	18 mm

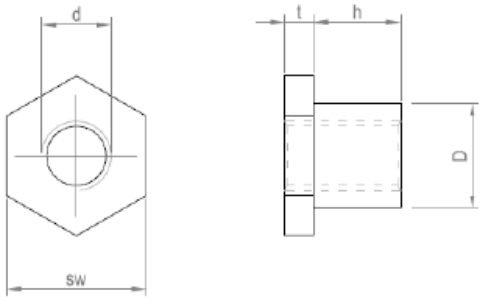
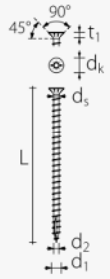


Figura 7: Caratteristiche dei bulloni Ø12

2.1.5. Viti tuttofiletto VGS

Nella connessione sono presenti 6 viti tuttofiletto VGS, per le quali si riportano alcune caratteristiche.

GEOMETRIA E CARATTERISTICHE MECCANICHE



CONNETTORE VGS			
Diametro nominale	**d_1 [mm]**	**9**	**11**
Diametro testa	d_k [mm]	16,00	19,30
Diametro nocciolo	d_2 [mm]	5,90	6,60
Diametro gambo	d_s [mm]	6,50	7,70
Spessore testa	t_1 [mm]	6,50	8,20
Diametro preforo *	d_f [mm]	5,0	6,0
Momento caratteristico di snervamento	$M_{y,k}$ [Nmm]	27244,1	45905,4
Parametro caratteristico di resistenza ad estrazione	$f_{ax,k}$ [N/mm^2]	11,7	11,7
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{tens,k}$ [kN]	25,4	38,0
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{y,k}$ [N/mm^2]	1000	1000

(*) Obbligo di preforo per connettori con Ø11 ≥ 400 mm

Come si vedrà in seguito, nel caso di sollecitazioni di trazione delle viti, si assiste alla rottura del gambo della vite stessa, in quanto:

- la profondità di infissione della vite nell'CLT è sufficiente a mobilitare tutta la resistenza del gambo a trazione;
- il box esterno e la piastra di rinforzo metallici si comportano come una "rondella", ripartendo il carico su una superficie maggiore e portando la vite a rottura per trazione

La resistenza caratteristica a trazione della vite VGS Ø11 è pari a:

$$f_{tens,k} = 38,0kN$$

Nel caso di sollecitazioni di compressione il meccanismo resistente è quello del filetto della vite. In questo caso ci vengono in aiuto le prove eseguite presso il CNR-IVALSA le quali hanno determinato una resistenza media a estrazione del filetto nell'LVL pari a:

$$f_{comp,k} = 35,0kN$$

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

2.2. Caratteristiche dei materiali

*2.2.1. **Legno LVL** (Laminated veneer lumber)*

L'inserto in legno interno al box metallico è costituito da un microlamellare (LVL) con densità caratteristica $\rho k \geq 680$ kg/m^3

2.2.2. Acciaio

Sono presenti le seguenti piastre in acciaio:

- Box esterno, costituito da una lamiera piegata, di spessore 2,5 mm;
- Piastra interna, di spessore 6 mm.

Le due piastre sono in acciaio DX51D in accordo a EN10346 o equivalente.
L'acciaio DX51D viene prodotto in conformità alle seguenti 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 meccaniche minime dell'acciaio sono quindi fornite dalla UNI EN 10346:2009 alla tabella 6:

Table 6 — Mechanical properties (transverse direction) of low carbon steels for cold forming

Designation			Yield strength	Tensile strength	Elongation	Plastic strain ratio	Strain hardening exponent
			R_e[a]	R_m	A_{80}[b]	r_{90}	n_{90}
Steel grade		Symbols for the types of available coatings	MPa	MPa	%		
Steel name	Steel number				min.	min.	min.
DX51D	1.0226	+Z,+ZF,+ZA,+AZ,+AS	–	270 to 500	22	–	–

Figura 8: estratto EN 10346:2009

Per la definizione delle resistenze da utilizzare in fase di calcolo, a favore di sicurezza si considerano le resistenze dell'acciaio S275 (EN 10025) , che sono comunque inferiori alle reali resistenze ricavate dalle prove sperimentali eseguite sulle lamiere metalliche:

$$R_{u,k} = 410 MPa$$

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

$$R_{y,k} = 275MPa$$

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

3. I DATI DI INPUT

Si riporta una breve descrizione dei dati di input, i quali sono stati utilizzati per sviluppare la presente relazione tecnica.
Le indagini sperimentali sono state condotte in tre differenti centri di ricerca:

- *Lignum Test Center* dell'Università di Graz (TU-GRAZ).
- *Istituto per la valorizzazione del legno e delle specie arboree* di San Michele A.A. (CNR-IVALSA).
- *Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università* degli Studi di Trento.

Presso il Lignum Test Center dell'Università di Graz sono state eseguite delle prove monotone in conformità alla norma EN 26891:1991. Scopo delle prove è fornire i parametri utili all'elaborazione del Benestare Tecnico Europeo (ETA 15/0632). In accordo con il TU-GRAZ, è stata eseguita una campagna di prove cicliche presso il CNR-IVALSA, eseguite in conformità alla norma EN 12512:2006. Tali prove hanno l'obiettivo di definire il livello di duttilità della connessione e il suo comportamento in campo sismico, informazioni anch'esse contenute nel documento ETA di riferimento.
Le prove eseguite presso l'Università degli Studi di Trento hanno lo scopo di testare un sistema complesso parete-connessione, per studiare il comportamento globale del sistema.
Le prove di laboratorio sono state integrate con una campagna di analisi FEM sulla connessione.

3.1. Prove eseguite presso il TU-GRAZ

Presso il Lignum Test Center dell'Università di Graz sono state eseguite prove monotone in conformità alla EN 26891, sia in configurazione di trazione che in configurazione di taglio. Si riportano gli schemi di prova e i principali risultati per le due sollecitazioni di trazione e taglio.
Le prove sono state condotte lungo le due direzioni principali x e y.

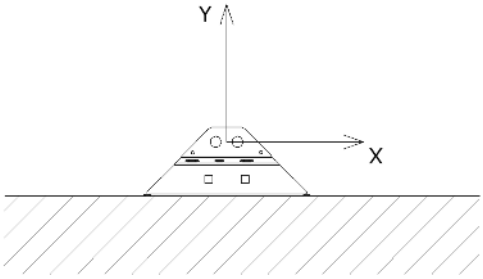


Figura 9: Sistema di riferimento locale dell'X-RAD

3.1.1. Prove monotone LUNGO Y

Si riporta un'immagine schematica del set-up di prova.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

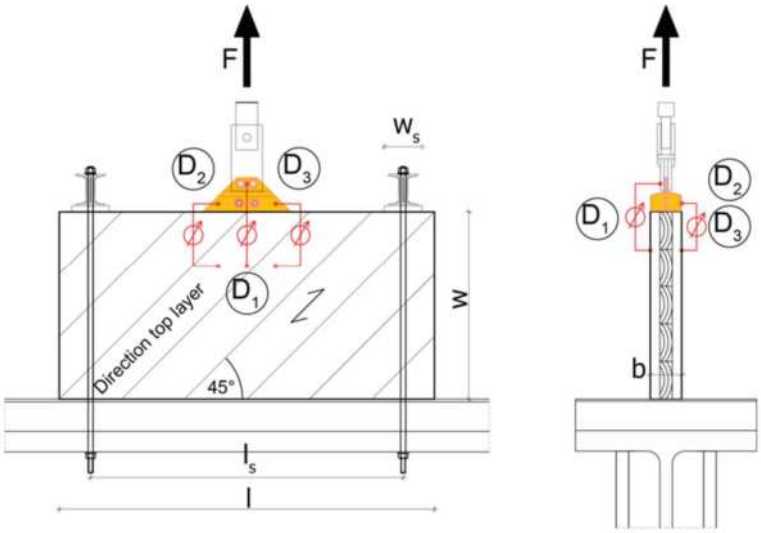


Figura 10: Schema di prova lungo y

Il report di prova fornisce i valori di rigidezza e di resistenza caratteristica della connessione nelle due configurazioni.

Nella figura che segue sono rappresentate le curve forza-spostamento per le prove lungo y.

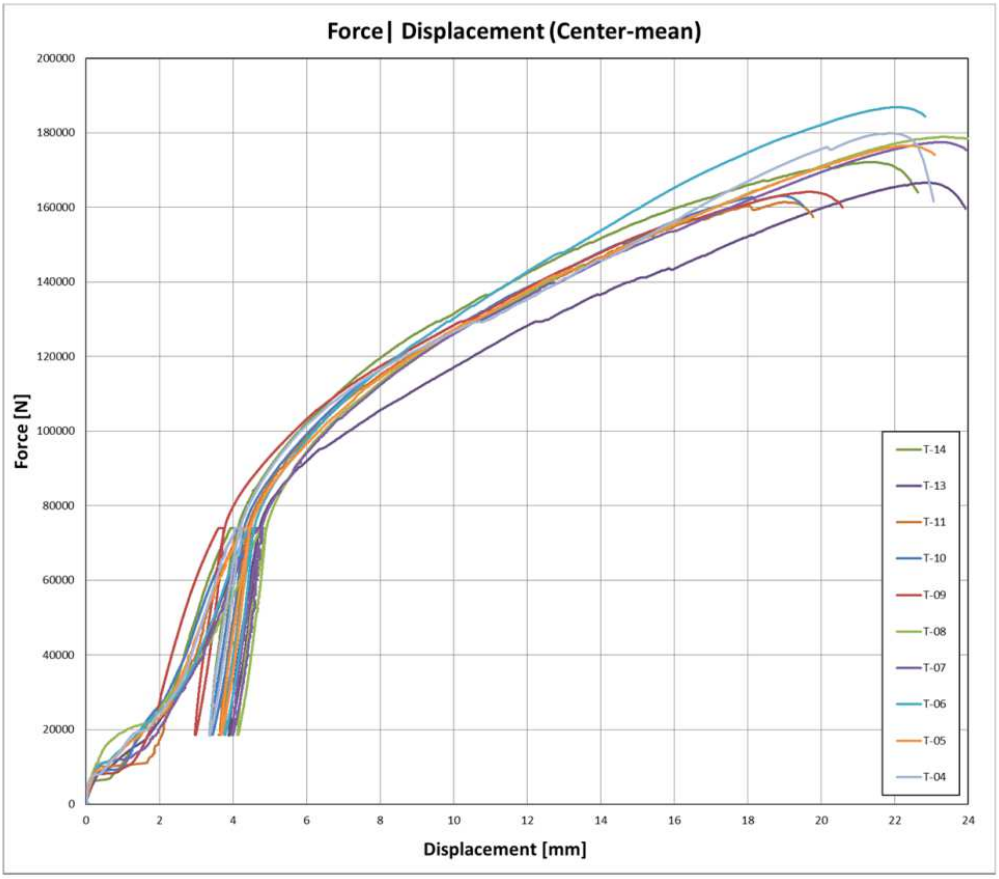


Figura 11: Curve forza-spostamento per le prove lungo y

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

3.1.2. Prove monotone LUNGO X

Si riporta un'immagine schematica del set-up di prova.

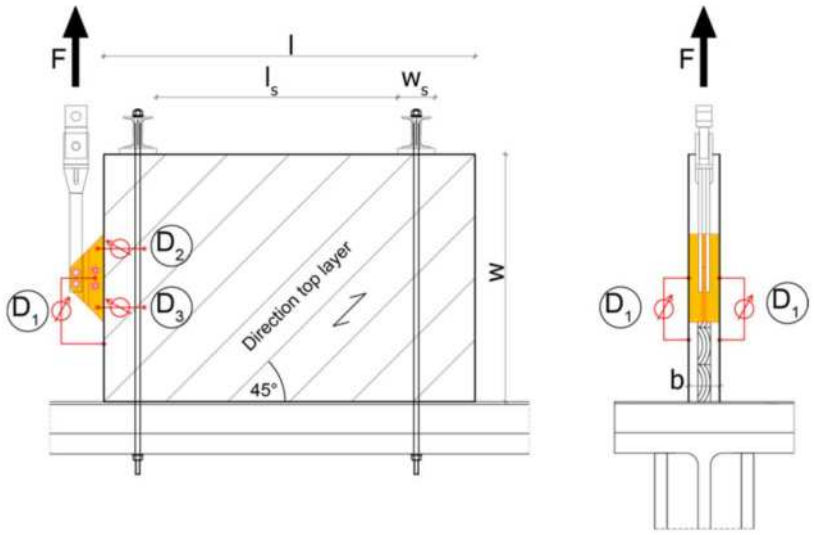


Figura 12: Schema di prova lungo x

Il report di prova fornisce i valori di rigidezza e di resistenza caratteristica della connessione.

Nella figura che segue sono rappresentate le curve forza-spostamento per le prove lungo x.

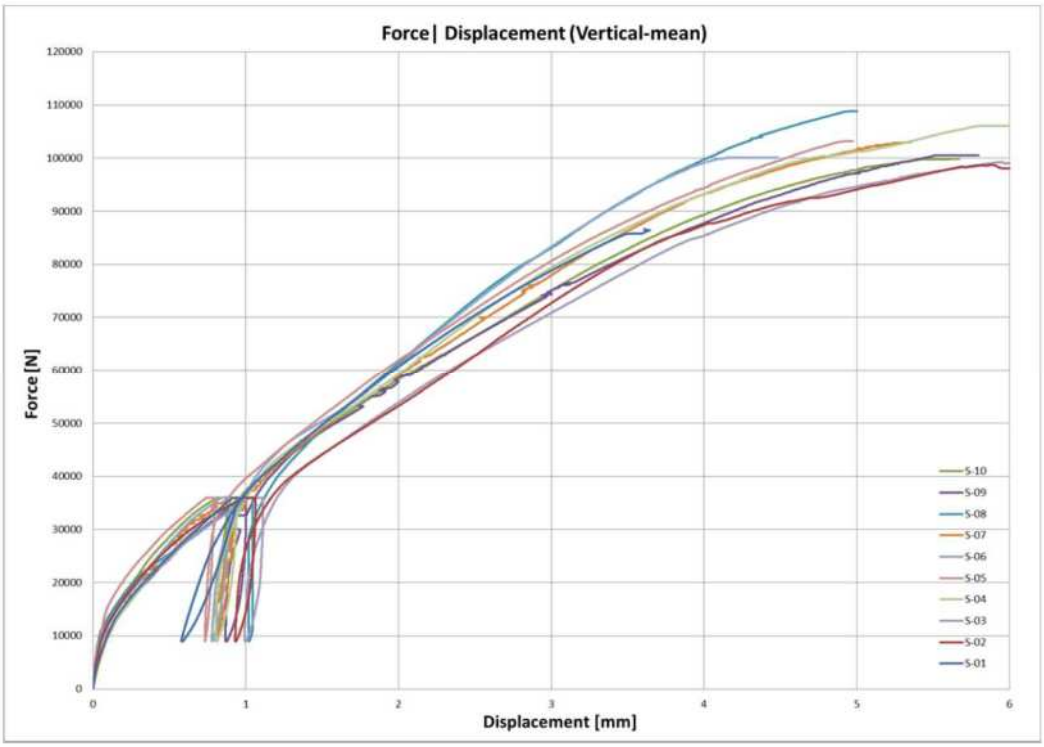


Figura 13: Curve forza-spostamento per le prove a lungo x

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

3.2. Prove eseguite presso il centro CNR-IVALSA (San Michele A.A.)

Presso i laboratori del centro CNR-IVALSA di San Michele All'Adige sono state eseguite le seguenti prove:

- **Prove di estrazione di viti tuttofiletto**: le prove hanno avuto l'obiettivo di testare diversi tipi di viti tuttofiletto VGS, inserite in diversi tipi di legni duri, al fine di determinare la combinazione vite-legno più adatta all'utilizzo all'interno della connessione e caratterizzare così il tipo di legno ottimale ai fini del comportamento meccanico.
- **Prove monotone e cicliche sulla connessione X-ONE**: sono state eseguite in differenti fasi dello sviluppo del sistema (dal prototipo alla versione definitiva) al fine di ottimizzarne geometrie e comportamento meccanico. Le prove cicliche lungo x e lungo y sono state eseguite in conformità alla norma EN 12512.

3.2.1. Prove cicliche LUNGO Y

Si riporta un'immagine della geometria di prova.

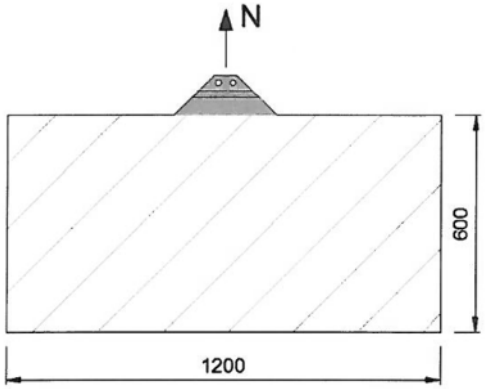


Figura 14: Schema di prova lungo y

Il report di prova fornisce resistenze, spostamenti e duttilità.

Figura 15: Risultati di maggiore interesse per le prove lungo y

A titolo di esempio si riporta una curva forza-spostamento

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

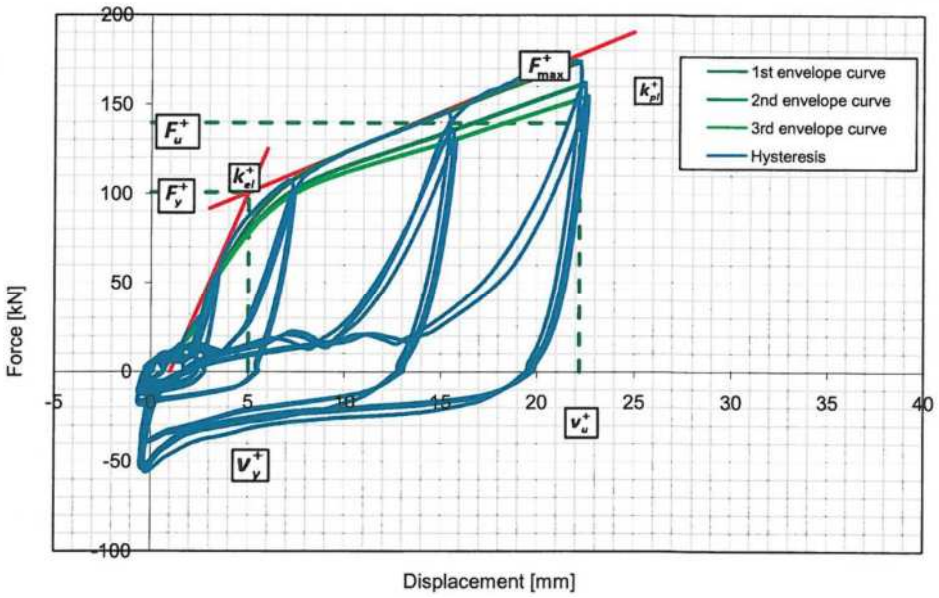


Figura 16: Diagramma forza-spostamento per una delle prove lungo y

3.2.2. Prove cicliche LUNGO X

Si riporta un'immagine della geometria di prova.

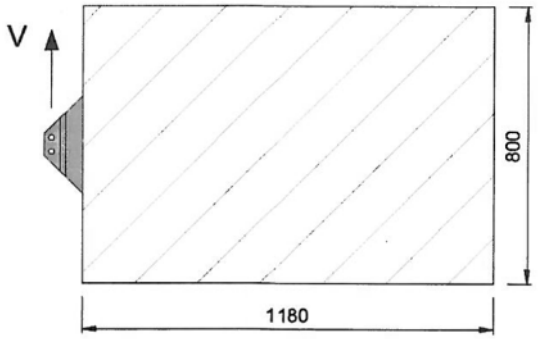


Figura 17: Schema di prova lungo x

Il report di prova fornisce resistenze, spostamenti e duttilità.

A titolo di esempio si riporta una curva forza-spostamento.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

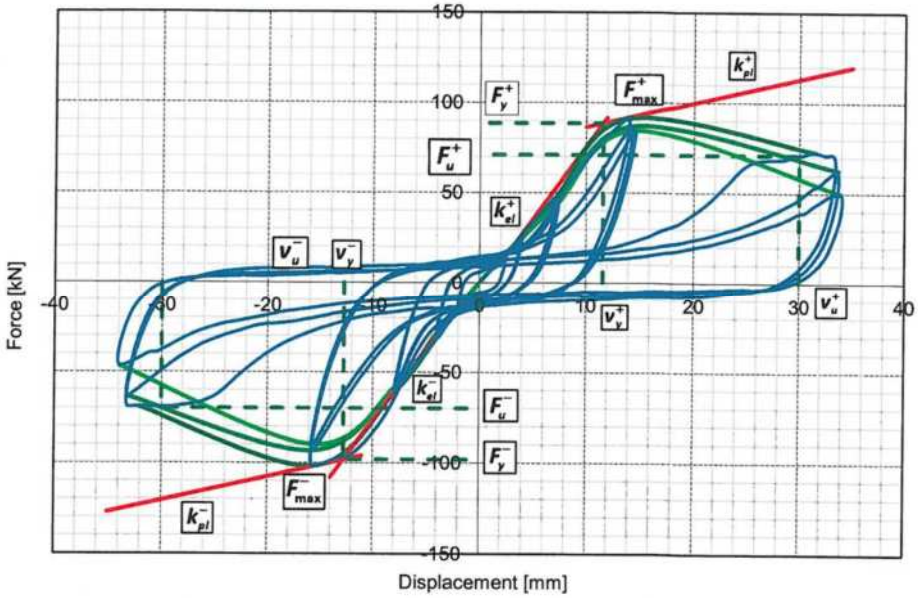


Figura 18: Diagramma forza-spostamento per una delle prove lungo x

3.3. Prove eseguite presso l'Università degli Studi di Trento

Presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento sono state eseguite tre prove su due campioni costituiti da pareti in CLT collegate con il sistema X-RAD. I test hanno riguardato 2 differenti configurazioni. La prima è composta da una parete in CLT equipaggiata con due elementi X-RAD agli angoli; la seconda configurazione è composta da quattro elementi in CLT uniti ai loro quattro angoli da connessioni X-RAD.

3.3.1. Prove sul pannello singolo

Si riporta un'immagine del set-up di prova, in cui la parete, di dimensioni 250 cm x 250 cm, è stata vincolata a terra con due X-RAD e in sommità è stato applicato uno spostamento attraverso martinetto idraulico. Il carico verticale sulla parete, pari a 20 kN/m^2, è stato applicato tramite un sistema a leve, in grado di mantenere costante il carico verticale durante l'esecuzione della prova. Sul campione in questa configurazione sono state eseguite due prove: una monotona ed una ciclica.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

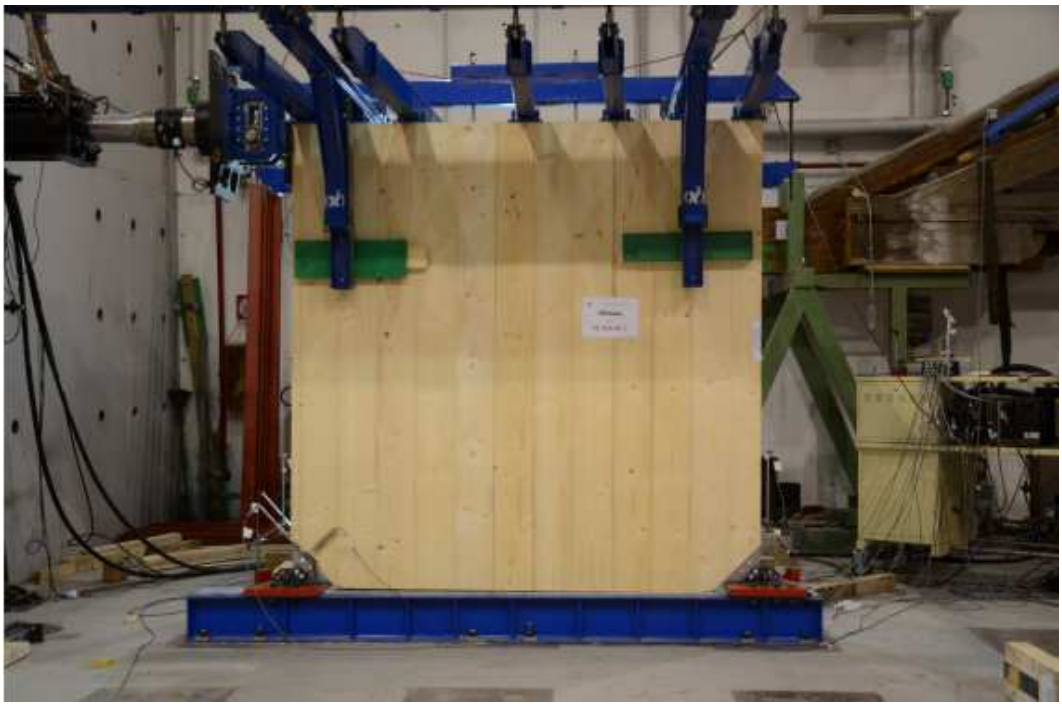


Figura 19: Set-up di prova per il pannello singolo

Si riportano le immagini dei diagrammi forza-spostamento al martinetto.

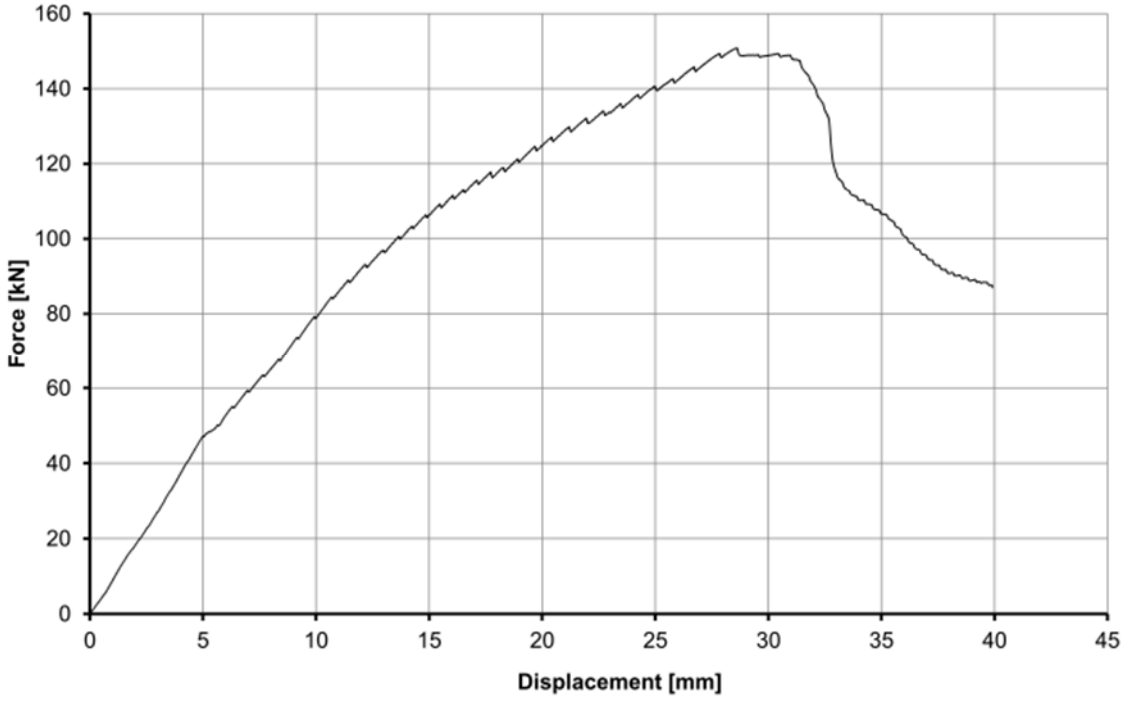


Figura 20: Diagramma forza-spostamento per la prova monotona

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

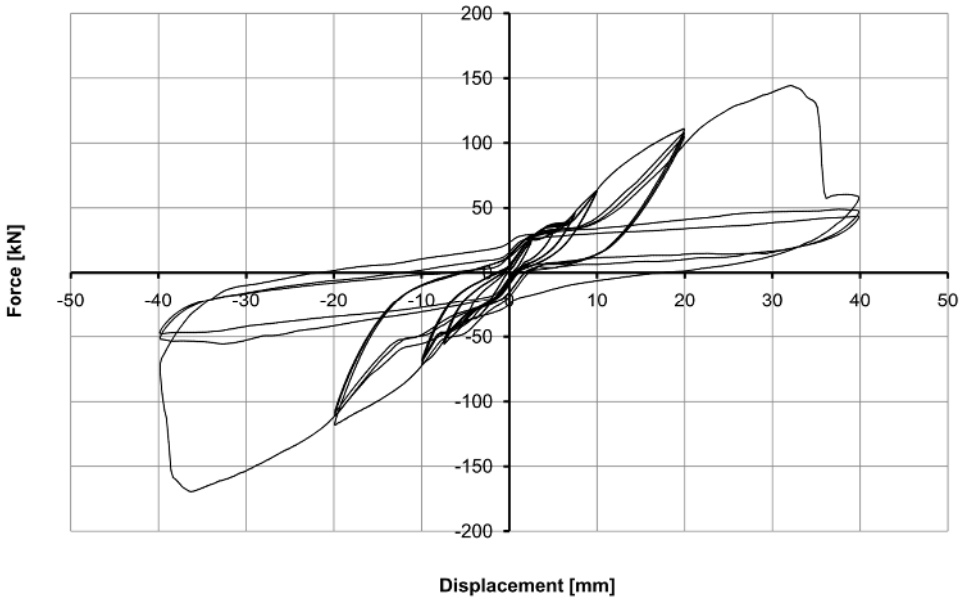


Figura 21: Diagramma forza-spostamento per la prova ciclica

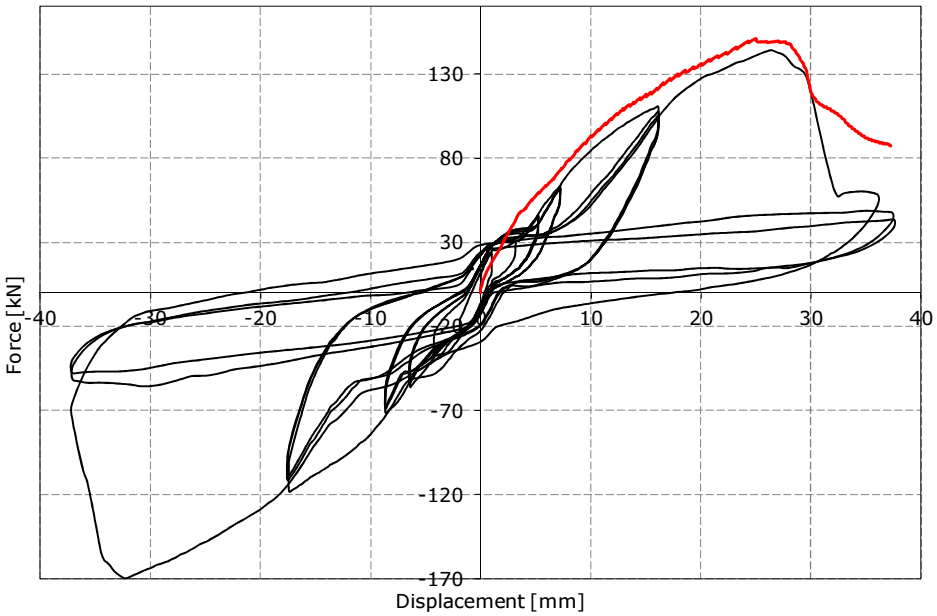


Figura 22: Sovrapposizione delle curve forza-spostamento

3.3.2. Prove sul pannello composto

Si riporta un'immagine del set-up di prova, in cui la parete è stata suddivisa in quattro pannelli di dimensioni 125 cm x 125 cm vincolati reciprocamente con delle connessioni X-RAD. Come nelle prove precedenti è stato applicato uno spostamento attraverso martinetto idraulico. Il carico verticale sulla parete, pari a 20 kN/m^2, è stato applicato tramite un sistema a leve, in grado di mantenere costante il carico verticale durante l'esecuzione della prova. Sul campione in questa configurazione è stata eseguita una prova ciclica.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

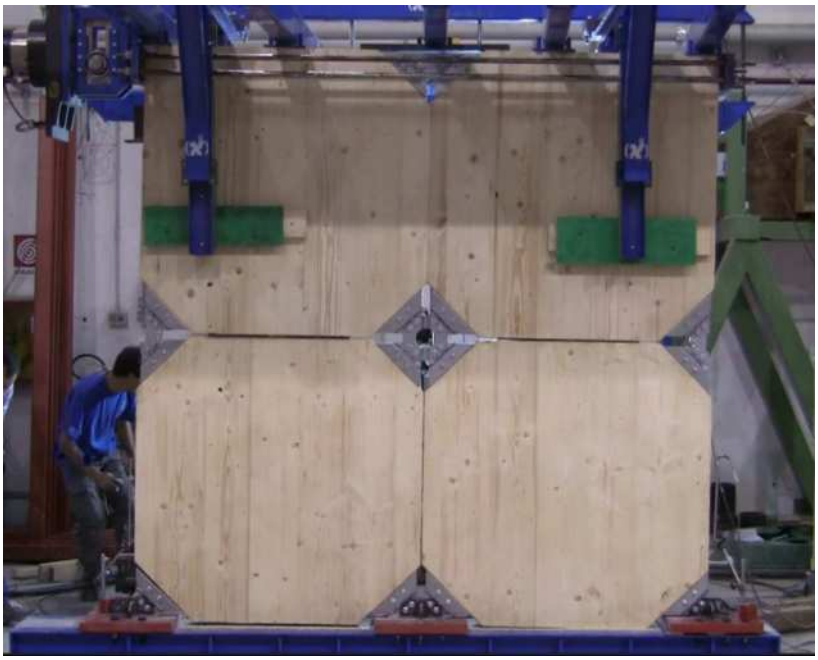


Figura 23: Sut-up di prova per il pannello diviso in 4

3.4. Analisi FEM

È stata condotta una campagna di simulazioni FEM della connessione, allo scopo di comprendere meglio i vari meccanismi interni che condizionano il comportamento globale della connessione e di ottenere informazioni sul comportamento della connessione soggetta a spostamenti lungo differenti direzioni.

Il modello FEM è stato tarato sulle prove condotte presso il centro CNR-IVALSA nelle due direzioni X e Y. Si riporta un'immagine del modello FEM.

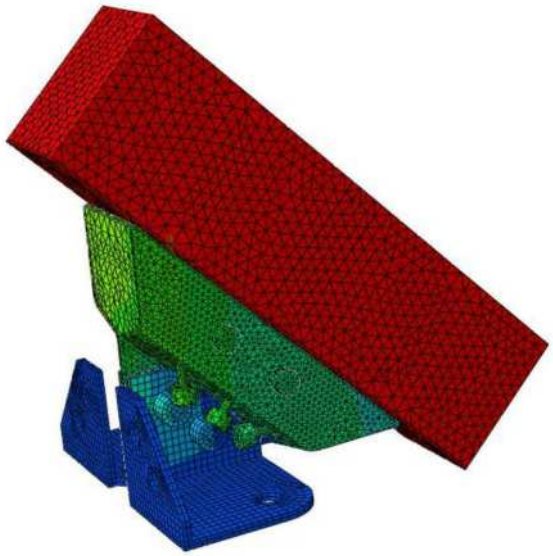


Figura 24: Immagine del modello FEM

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

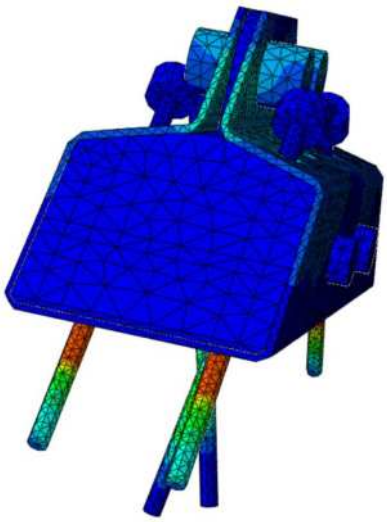


Figura 25: Immagine del modello FEM

3.4.1. Casi di analisi

Sono state eseguite 11 simulazioni, ciascuna con una differente direzione di applicazione dello spostamento. Sono state quindi eseguite 11 analisi push-over, applicando uno spostamento lungo le direzioni rappresentate in figura.

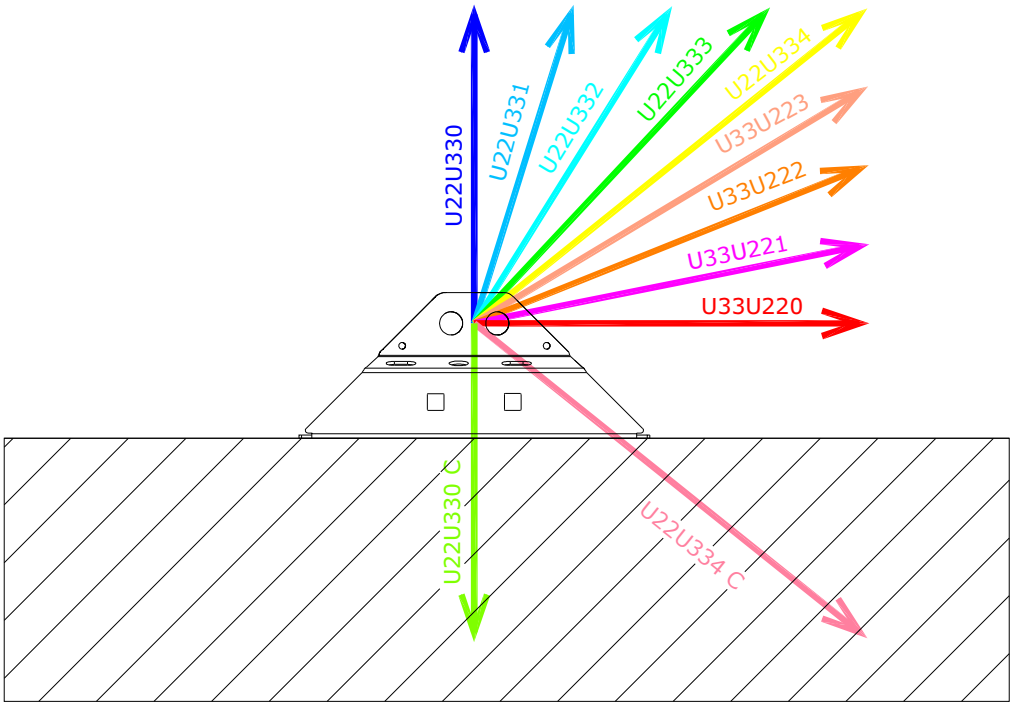


Figura 26: vettori spostamento applicati al modello FEM

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

3.4.2. Risultati principali

Per ciascuna simulazione è stato plottato un diagramma forza spostamento (curva di capacità), come quello riportato di seguito. Le curve di capacità sono state poi linearizzate attraverso delle bilatere.

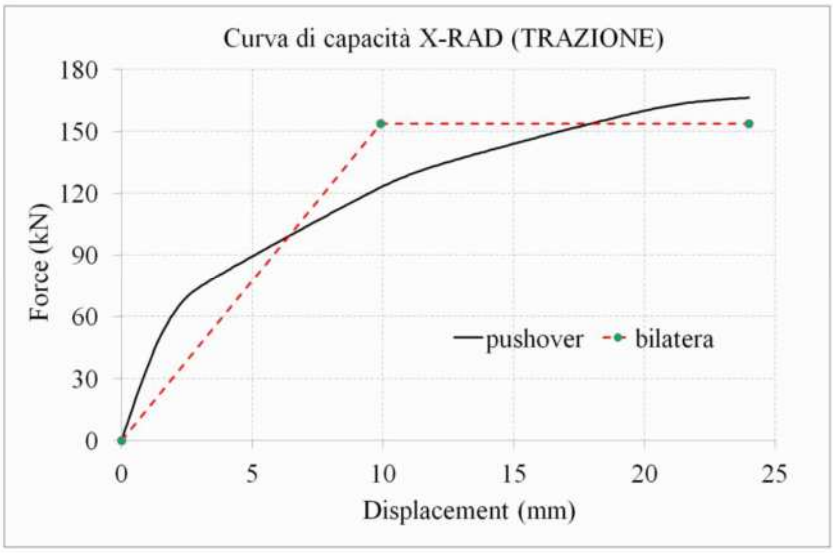


Figura 27: esempio di curva di capacità, con relativa linearizzazione

La tabella che segue riporta, per ciascuna analisi:

- F_{max}, corrispondente alla resistenza massima ricavata dalla curva di capacità;
- u_{max}, corrispondente allo spostamento massimo della curva di capacità;
- F_y, corrispondente alla resistenza a snervamento della bilatera;
- u_y, corrispondente allo spostamento a snervamento della bilatera;
- k_y, corrispondente alla rigidezza elastica della bilatera;
- D, corrispondente alla duttilità della bilatera.
-

	PARAMETRI DELLE BILATERE						
	Prova numerica	F_{max}	u_{max}	F_y	u_y	k_y	D
		kN	mm	kN	mm	kN/mm	-
Prev. Trazione	U22U330	166,22	24,00	153,62	9,91	15,50	2,42
	U22U331	161,66	25,14	153,62	10,68	14,38	2,35
	U22U332	151,71	28,30	153,62	12,81	11,99	2,21
	U22U333	136,23	32,89	126,14	9,55	13,21	3,44
	U22U334	126,18	38,42	117,54	9,43	12,46	4,07
Prev. Taglio	U33U223	118,78	30,02	109,27	8,75	12,49	3,43
	U33U222	116,90	32,31	108,50	9,90	10,96	3,26
	U33U221	110,92	30,59	103,06	9,62	10,71	3,18
	U33U220	104,99	30,00	99,47	10,09	9,86	2,97
Prev. Compr.	U22U334 C	233,63	38,42	209,75	6,24	33,62	-
	U22U330 C	247,26	24,00	225,85	5,24	43,08	-

Figura 28: Parametri delle bilatere

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Nell' immagine seguente si riportano le varie bilatere, con i relativi parametri.

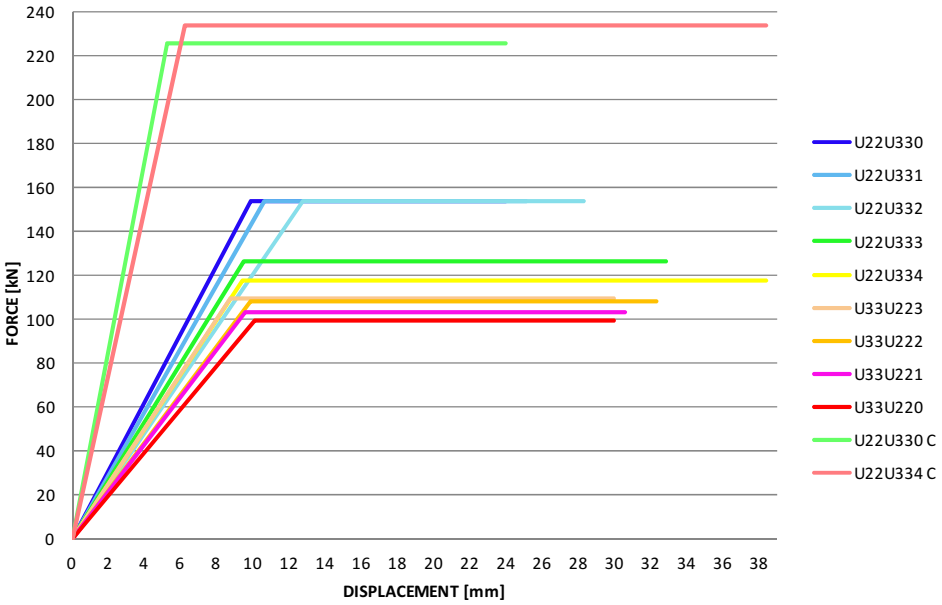


Figura 29: Bilatere

All'interno dei modelli FEM sono stati ricavati i valori di resistenza massima nelle due componenti di sollecitazione; si riportano i valori nella tabella che segue.

	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

Figura 30: Proiezione delle resistenze massime nel piano x-y

Dove il sistema di riferimento x-y è rappresentato in figura.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

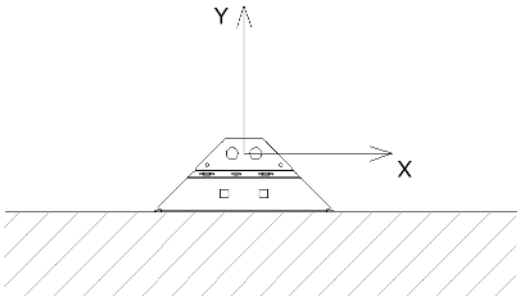


Figura 31: Sistema di riferimento locale dell'X-RAD

A questo punto è stato possibile rappresentare graficamente i punti rappresentativi delle varie simulazioni, nel piano x-y.

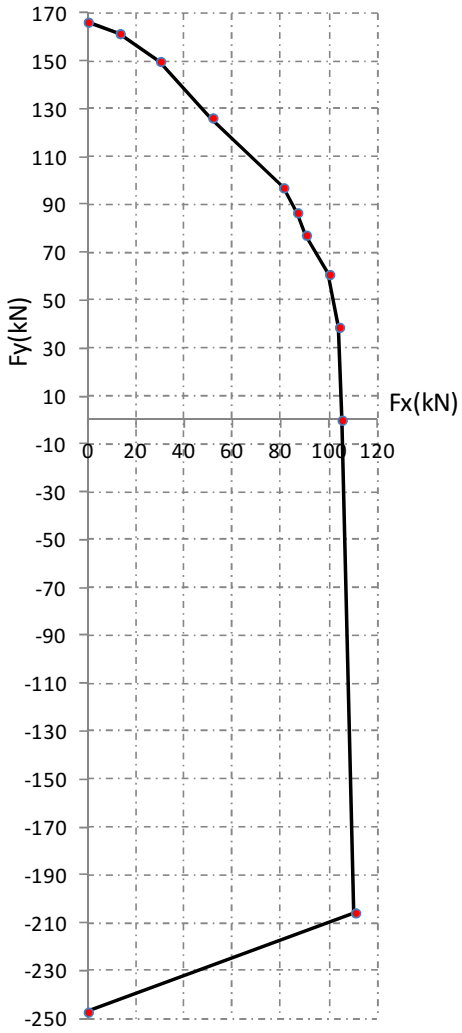


Figura 32**: Dominio d'interazione taglio-trazione ricavato dalle simulazioni FEM**

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

4. STUDIO DELLE VARIE CONDIZIONI DI SOLLECITAZIONE

Partendo dai risultati ottenuti dalle prove di laboratorio e dalle analisi FEM, si riporta uno studio sul comportamento della connessione nelle varie condizioni di sollecitazione.

4.1. Sistemi di coordinate e definizioni

Ai fini della presente trattazione, si adotta un sistema di riferimento convenzionale in cui le sollecitazioni sull'X-RAD vengono definite come segue:

- TRAZIONE: è una forza verticale diretta lungo l'asse Z positivo, che quindi tende a far lavorare in trazione le viti tuttofiletto.
- COMPRESSIONE: è una forza verticale diretta lungo l'asse Z negativo, che quindi tende a far lavorare in compressione le viti tuttofiletto.
- TAGLIO-TRAZIONE: è una forza orizzontale diretta lungo l'asse X positivo, che quindi tende a far lavorare in trazione le viti tuttofiletto.
- TAGLIO-COMPRESSIONE: è una forza orizzontale diretta lungo l'asse X negativo, che quindi tende a far lavorare in compressione le viti tuttofiletto.

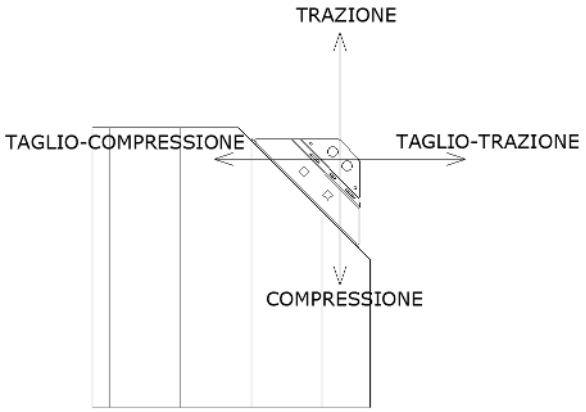


Figura 33: sollecitazioni sull'X-RAD nel sistema di riferimento della parete CLT

Vista la simmetria del sistema si possono formulare le seguenti osservazioni:

- Per l'X-RAD la sollecitazione di trazione è equivalente alla sollecitazione di taglio-trazione.
- Per l'X-RAD la sollecitazione di compressione è equivalente alla sollecitazione di taglio-compressione.

Oltre alle quattro sollecitazioni appena viste c'è la necessità di definire altre quattro sollecitazioni, denominate come segue.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

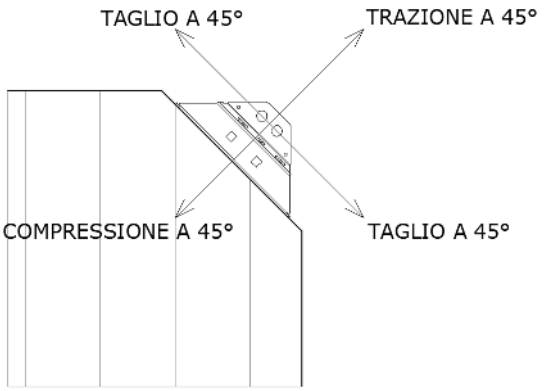


Figura 34: sollecitazioni sull'X-RAD nel sistema di riferimento della parete CLT

Si noti che le sollecitazioni di taglio a 45° e di trazione a 45° corrispondono rispettivamente alle direzioni X e Y testate in laboratorio.
Nel sistema di riferimento della parete CLT, le otto sollecitazioni appena viste hanno le seguenti inclinazioni, se si misurano gli angoli in maniera antioraria a partire dall'asse X.

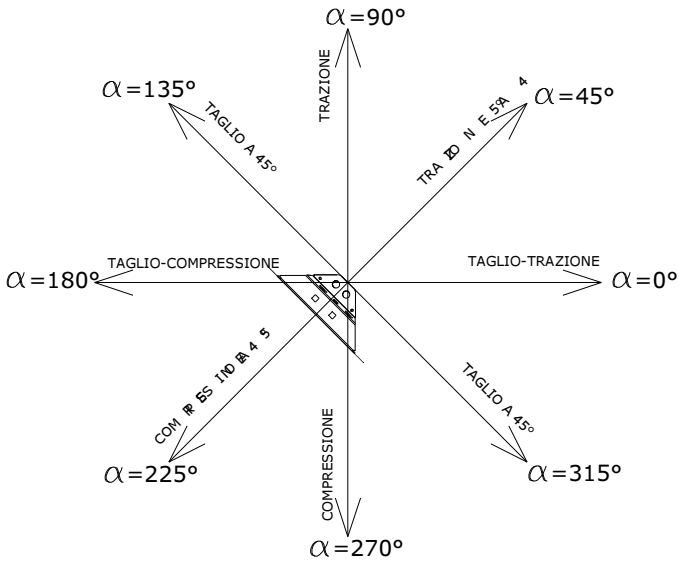


Figura 35: sollecitazioni sull'X-RAD nel sistema di riferimento della parete CLT

4.2. Sintesi dei dati sperimentali al momento disponibili

Come visto nei capitoli precedenti, sono state eseguite sulla connessione singola numerose prove; si riporta dunque un prospetto riepilogativo dei risultati maggiormente significativi:

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Sollecitazione	Angolo	Note	F_k [kN]	F_{min} [kN]	F_{mean} [kN]	F_{max} [kN]	$k_{s,mean}$ [kN/mm]
taglio-trazione	0°	monotone	-	119,0	129,0	143,1	*11,8*
trazione a 45°	45°	monotone	141,0	140,6	151,7	160,4	21,0
		cicliche	-	162,5	171,2	180,0	23,6
trazione pura	90°	monotone	-	119,0	122,0	127,5	11,8
taglio a 45°	135°	monotone	97,0	101,0	107,5	114,9	33,0
		cicliche	-	101,9**	108,9**	126,1**	9,0**
taglio-compressione	180°	monotone	-	168,9	185,9	199,4	*13,4*
compressione a 45°	225°	miste***	-	207,7	254,1	289,7	23,0
compressione pura	270°	monotone	-	168,9	181,3	199,4	13,4
taglio a 45°	315°	monotone	97	101,0	107,5	114,9	33,2
		cicliche	-	101,9**	108,9**	126,1**	9,0**

Figura 36: sintesi delle prove eseguite sulla connessione

** Le prove a compressione a 45° sono state interrotte al carico massimo del martinetto idraulico; l'andamento della prova nel piano forza-spostamento è pressoché lineare fino a tale punto. Questo lascia presumere che la reale resistenza della connessione sia molto più alta dei valori rilevati dalle prove.*

4.3. Modalità di rottura della connessione

Come visto, il sistema di connessione X-RAD si compone di una molteplicità di componenti base, quali:

- 6 viti tuttofiletto VGS caricate assialmente e a taglio, che realizzano la connessione legno-legno tra il pannello CLT e il nucleo in LVL dell'X-ONE;
- un inserto in LVL, sollecitato a compressione ortogonale alla fibra e a rifollamento dai bulloni interni;
- 2 bulloni interni, che collegano la piastra interna all'inserto in LVL, creando una connessione a taglio legno-acciaio-legno;
- un box metallico esterno, che va ad avvolgere l'inserto in LVL, la quale è sollecitata principalmente a rifollamento in corrispondenza dei bulloni di collegamento alla piastra esterna;
- una piastra interna, collegata alla piastra esterna e al box metallico per mezzo dei due bulloni esterni;
- 2 bulloni esterni che collegano la piastra esterna alla piastra interna e alla lamiera piegata;

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

- una serie di piastre esterne X-PLATE che consentono il collegamento a terra o i collegamento reciproci tra connessioni. Le piastre esterne non sono oggetto del presente studio.

Si riportano alcune immagini dei componenti.

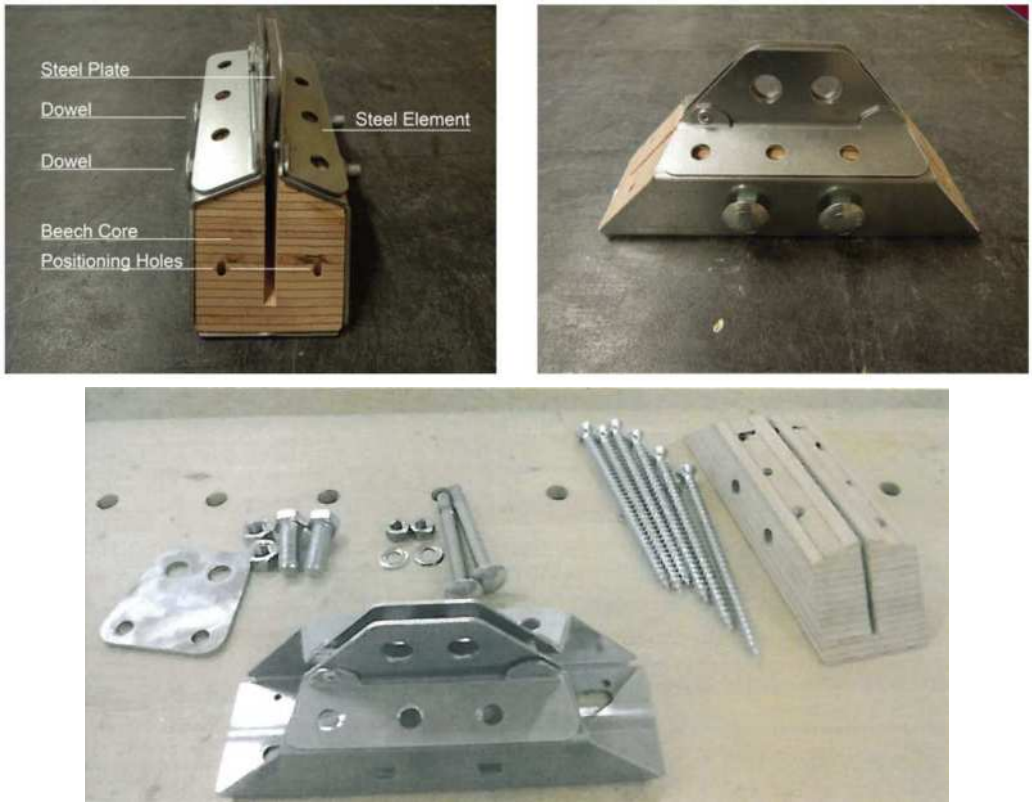


Figura 37: Componenti del sistema X-RAD

Se si vanno ad analizzare i vari meccanismi resistenti, si possono individuare almeno tre connessioni elementari:

- connessione legno-legno per mezzo di viti tuttofiletto. A sua volta, questa connessione può collassare con diverse modalità di rottura, tra le quali:
  a) rottura a taglio delle viti;
  b) rottura per estrazione del filetto delle viti dal pannello CLT;
  c) rottura per estrazione del filetto delle viti dall'inserto in LVL;
- connessione bullonata legno-acciaio-legno tra la piastra interna e l'LVL. A sua volta, questa connessione può collassare con diverse modalità di rottura, quali:
  a) rottura lato legno della connessione a taglio bullone-LVL;
  b) rottura della piastra per rifollamento in corrispondenza dei bulloni;
- connessione bullonata acciaio-acciaio tra il box metallico + piastra interna e la piastra esterna. A sua volta, questa connessione può collassare con diverse modalità di rottura, quali:
  c) rottura per rifollamento in corrispondenza dei bulloni;
  d) rottura per "block-tearing".

La fase di prototipazione della connessione ha però consentito di dare una sovraresistenza ad alcune delle modalità di collasso, per concentrare le possibili rotture in alcuni punti ben precisi, quali:

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

- tranciamento delle viti nella connessione legno-legno con viti tuttofiletto;
- "block tearing" del box metallico e della piastra interna nella connessione box metallico + piastra interna / piastra esterna.

E' importante definire la modalità di rottura della connessione soggetta alla generica sollecitazione, in quanto il progettista avrà bisogno di definire il pertinente coefficiente di sicurezza.
Le prove di laboratorio confermano le considerazioni appena viste, infatti la rottura avviene con le modalità di cui ai paragrafi seguenti. Per maggior chiarezza si riporta un'immagine con la definizione delle varie sollecitazioni.

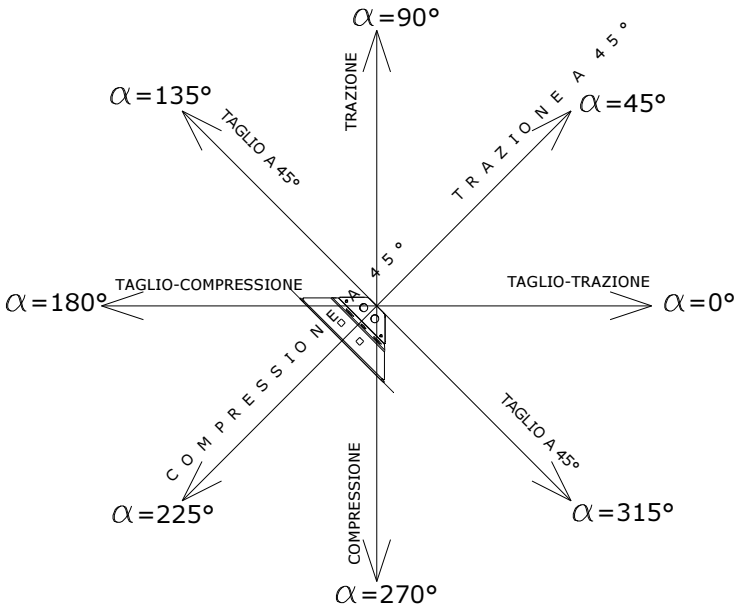


Figura 38: sollecitazioni sull'X-RAD nel sistema di riferimento della parete CLT

4.3.1. Taglio-trazione (α=0°)

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

4.3.2. Trazione a 45° (α=45°)

La rottura avviene per block-tearing delle piastre sui bulloni Ø16. In particolare, si ha la rottura contemporanea della piastra interna e del box metallico. La rottura coinvolge quindi un meccanismo resistente lato acciaio.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Figura 39: Rottura per block-tearing sui bulloni Ø16

4.3.3. Trazione (α=90°)

La configurazione è la stessa della sollecitazione di taglio-trazione (α=0°). Valgono quindi le considerazioni viste sopra, con una rottura lato acciaio sulle viti.

4.3.4. Taglio a 45° (α=135° oppure α=315°)

La rottura avviene per trazione delle viti sottoposte ad azione assiale. Il meccanismo di rottura è quindi lato acciaio.

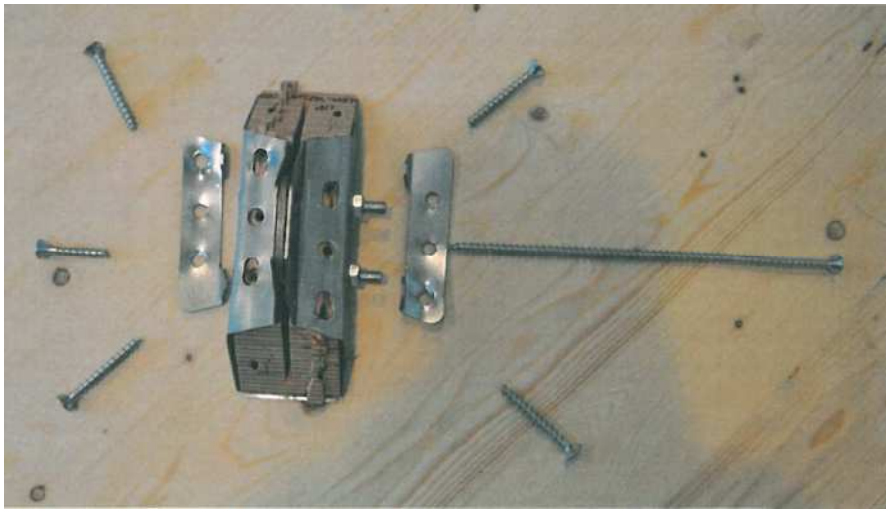


Figura 40: X-RAD portato a rottura per taglio a 45° - si noti il tranciamento delle viti.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

4.3.5. Taglio-compressione (α=180°)

In questo caso la rottura avviene con meccanismi che possono variare da prova a prova:

- 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).

A favore di sicurezza si considera quindi che queste prove esibiscano una rottura lato legno, con l'utilizzo del conseguente coefficiente di sicurezza.

4.3.6. Compressione a 45° (α=225°)

La rottura avviene per compressione del legno, con eventuale rottura per estrazione del filetto nell'LVL. Il meccanismo di rottura è quindi lato legno.

4.3.7. Compressione (α=270°)

La configurazione è la stessa della sollecitazione di taglio-compressione (α=180°). Valgono quindi le considerazioni viste sopra, con rottura lato legno.

4.4. Calcolo a rottura

Al fine di estendere ulteriormente l'indagine sul comportamento meccanico della connessione, si è elaborato un calcolo analitico partendo dalle analisi sperimentali e ricostruendo a ritroso analiticamente i risultati ottenuti in accordo a schemi statici semplificati.
Il calcolo è eseguito in conformità al *teorema statico dell'analisi limite*, che permette di eseguire una sottostima (quindi a favore di sicurezza) del carico di collasso della connessione. Secondo il teorema statico, la struttura non perviene al collasso sotto un sistema di carichi in corrispondenza del quale:

- esista un insieme di azioni interne in equilibrio con i carichi.
- tali azioni interne siano all'interno del dominio di ammissibilità, cioè siano compatibili con la resistenza degli elementi strutturali.

L'individuazione della configurazione di equilibrio da analizzare può essere eseguita partendo dall'osservazione delle modalità di collasso sperimentali, in maniera da eseguire un calcolo a rottura mirato sulla modalità di rottura sperimentale.
Come visto in precedenza, i meccanismi di rottura coinvolgono le viti VGS oppure le piastre in acciaio con meccanismi tipo block-tearing.
Si riportano di seguito gli schemi limite ipotizzati nelle varie configurazioni di sollecitazione [1].

[1] Gli schemi limite ipotizzati possono risultare in alcuni casi arditi ma hanno come unico scopo il tentativo di giustificare analiticamente l'effettivo comportamento meccanico evidenziato in fase sperimentale.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

4.4.1. Taglio-trazione (α=0°)

Osservando i campioni portati a rottura, si nota una rottura delle viti. Lo schema limite ipotizzato per il calcolo a rottura è riportato in figura.

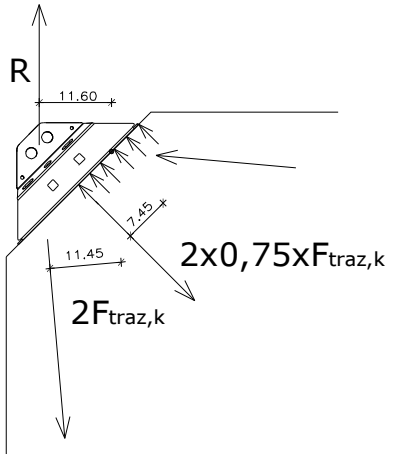


Figura 41: Schema limite per il taglio-trazione

$$R_{u,k} = 111{,}6\ kN$$

4.4.2. Trazione a 45° (α=45°)

Osservando i campioni portati a rottura, si presentano due possibili modalità di rottura, una lato viti, con il tranciamento di una coppia di viti VGS, uno lato acciaio, con la rottura per "block tearing" delle piastre collegate ai due bulloni Ø16.

ROTTURA LATO VITI

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

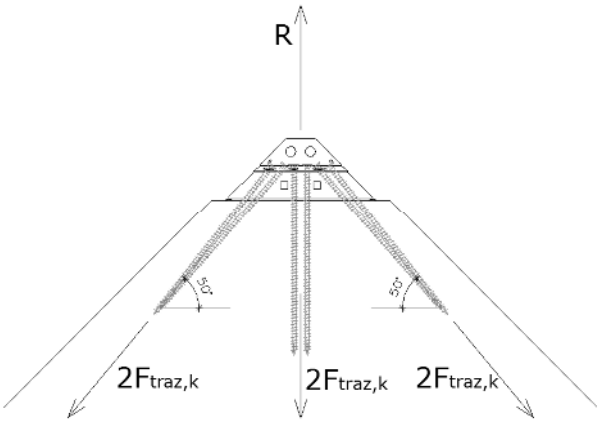


Figura 42: Schema limite per la trazione a 45°

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

E' presente una coppia di viti in direzione approssimativamente parallela alla forza esterna, mentre le altre due coppie di viti sono approssimativamente a 50° rispetto alla forza esterna. A rottura, nell'ipotesi di perfetta plasticità, le 3 coppie di viti saranno sollecitate con il carico massimo, pari a:

$$R_{u,k} = 192{,}4\ kN$$

ROTTURA LATO ACCIAIO

La rottura avviene per un meccanismo tipo "block tearing", per il quale si fa riferimento al punto 3.10.2 della UNI EN 1993-1-1 (Eurocodice 3). In figura è rappresentato lo schema utilizzato per la verifica.

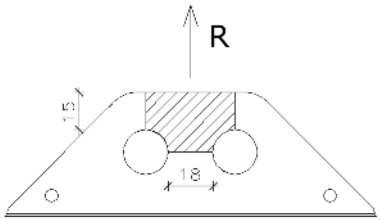


Figura 43: Meccanismo resistente a block tearing

La resistenza caratteristica, applicando gli opportuni coefficienti, vale quindi:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{410\ x\ 198}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{275\ x\ 330}{\gamma_{M0}} = \frac{81{,}18}{\gamma_{M2}} + \frac{852{,}39}{\gamma_{M0}}$$

RESISTENZA DELLA CONNESSIONE

La resistenza della connessione sarà la minore tra quelle appena viste. Considerando i coefficienti di sicurezza γ_{M0}=1,05 e γ_{M2}=1,25 previsti sia dal D.M. 14-01-2008 sia dalla UNI EN 1995-1-1, si ha la seguente resistenza di progetto:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{81{,}18}{1{,}25} + \frac{52{,}39}{1{,}05} = 114{,}8kN$$

Per quanto riguarda la rottura lato legno, si ottiene la seguente resistenza di progetto:

$$R_{u,d} = \frac{R_{u,k}}{\gamma_M} = \frac{192{,}4}{1{,}25} = 153{,}9\ kN$$

Come si vede, la resistenza di progetto lato acciaio è inferiore a quella lato legno.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

4.4.3. Trazione (α=90°)

La configurazione geometrica, e quindi la resistenza, è esattamente identica a quella vista per il taglio-trazione. La resistenza vale quindi:

$$R_{u,k} = 111,6kN$$

4.4.4. Taglio a 45° (α=135° oppure α=315°)

Osservando i provini portati a rottura si vede come la rottura avvenga lato viti. Si riporta comunque anche il meccanismo resistente lato acciaio.

ROTTURA LATO VITI

Si riporta un'immagine dello schema limite adottato.

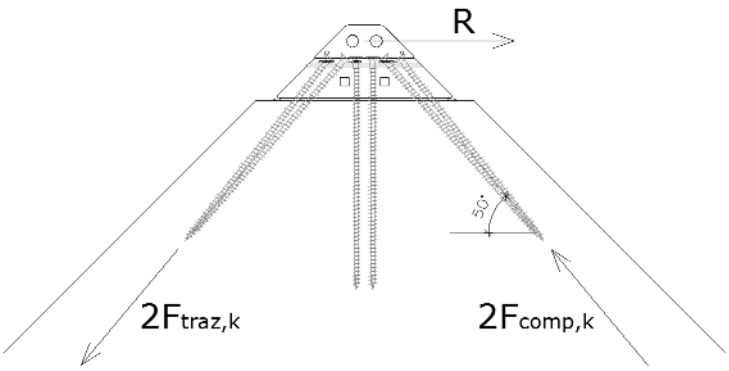


Figura 44: Schema limite per il taglio a 45°

Si ipotizza che le viti di sinistra lavorino a trazione, quelle di destra a compressione mentre quelle centrali lavorerebbero a taglio. A favore di sicurezza si trascura totalmente la resistenza a taglio delle viti centrali, anche perché è ragionevole pensare che la resistenza a taglio di tali viti si manifesti per spostamenti molto maggiori di quelli compatibili con la resistenza a trazione delle rimanenti 4 viti.
La forza esterna sollecitante a rottura si ricava per proiezione delle 4 forze assiali sulle viti.

$$R_{u,k} = 93,9\ kN$$

ROTTURA LATO ACCIAIO

La rottura avviene per un meccanismo tipo "block tearing", per il quale si fa riferimento al punto 3.10.2 della UNI EN 1993-1-1 (Eurocodice 3).
In figura è rappresentato lo schema utilizzato per la verifica.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

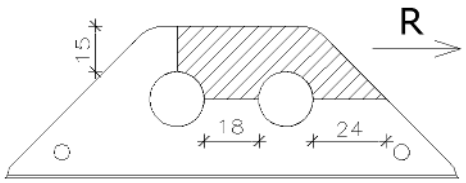


Figura 45: Meccanismo resistente a block tearing

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0{,}5\ x\ 410\ x\ 165}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}}\ \frac{275\ x\ 462}{\gamma_{M0}} = \frac{33{,}82}{\gamma_{M2}} + \frac{73{,}35}{\gamma_{M0}}$$

RESISTENZA DELLA CONNESSIONE

4.4.5. Taglio-compressione (α=180°)

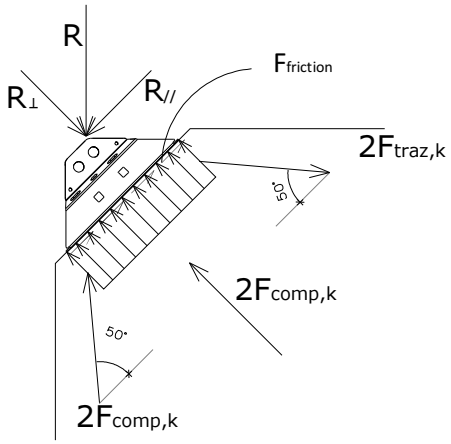


Figura 46:Schema limite per il taglio-compressione

La resistenza totale vale:

$R_{u,k} = 165{,}9\ kN$

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

4.4.6. Compressione a 45° (α=225°)

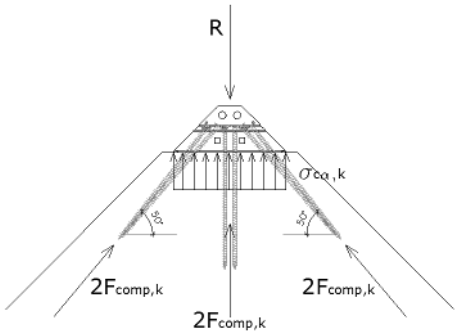


Figura 47: Schema limite per la compressione a 45°

La resistenza totale vale:

$$R_{u,k} = 279{,}6\ kN$$

4.4.7. Compressione (α=270°)

La configurazione geometrica, e quindi la resistenza, è esattamente identica a quella vista per il taglio-compressione. La resistenza vale quindi:

$$R_{u,k} = 165,9 kN$$

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

5. DEFINIZIONE DI UN CRITERIO DI RESISTENZA

Nel capitolo 4 è stato eseguito il calcolo della resistenza della connessione nelle 8 configurazioni geometriche di maggiore interesse, corrispondenti ad 8 inclinazioni della forza sollecitante. Scopo del seguente capitolo è elaborare un criterio di resistenza che consenta di coprire tutto lo spettro dei 360°.

5.1. Costruzione del dominio di rottura

Il dominio di interazione, o dominio di rottura, è una figura piana in cui tutti i punti interni rappresentano stati di carico che la connessione è in grado di sostenere. Si può dimostrare che il dominio limite risulta sempre una figura convessa, chiusa e limitata. In altre parole, la figura chiusa che delimita il dominio è una frontiera di rottura, oltre la quale si ha il superamento della resistenza della connessione, mentre i punti interni ad essa sono compatibili con la resistenza.
Nei paragrafi che seguono saranno costruiti tre domini di rottura, utilizzando tre metodi diversi:

- resistenze sperimentali;
- resistenze da modellazione FEM;
- resistenze da calcolo analitico a rottura.

5.1.1. Dominio basato sulle resistenze sperimentali

Le resistenze sperimentali viste in figura 45 possono essere rappresentate nel piano X-Z come visto in figura 44. Sulla base di questi valori puntuali è possibile costruire un diagramma, collegando tra loro i vari punti. Congiungendo i vari punti così rappresentati si ottiene un dominio di interazione taglio-trazione (o compressione) che rappresenta la frontiera di rottura della connessione. Tale scelta è suffragata dalle considerazioni esposte nei paragrafi che seguono.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

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

Figura 48: Resistenze sperimentali della connessione

Il diagramma è rappresentato in figura.

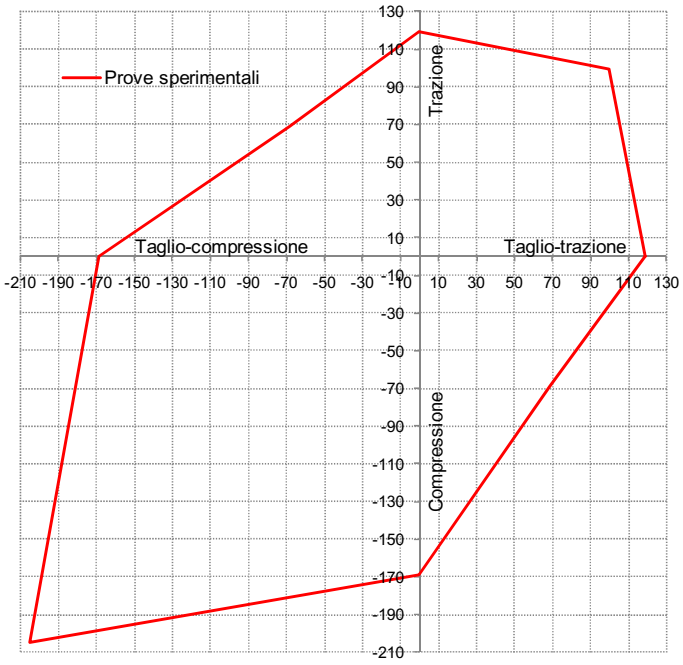


Figura 49: Dominio di rottura sperimentale

Il dominio di rottura così ottenuto può essere utilizzato per eseguire una verifica della connessione. Rappresentando il punto identificativo della sollecitazione su questo diagramma, è possibile eseguire una verifica grafica della connessione.

Infatti, se il punto rappresentativo della sollecitazione giace all'interno del dominio di rottura la verifica di resistenza è soddisfatta, mentre se il punto si trova all'esterno del dominio, la verifica non è soddisfatta.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

5.1.2. *Dominio basato sulle resistenze da modellazione FEM*

In figura 37 è stato rappresentato un diagramma con le resistenze da modellazione FEM, nel piano X-Y. Ruotando e specchiando questo diagramma si ottiene un dominio di interazione.

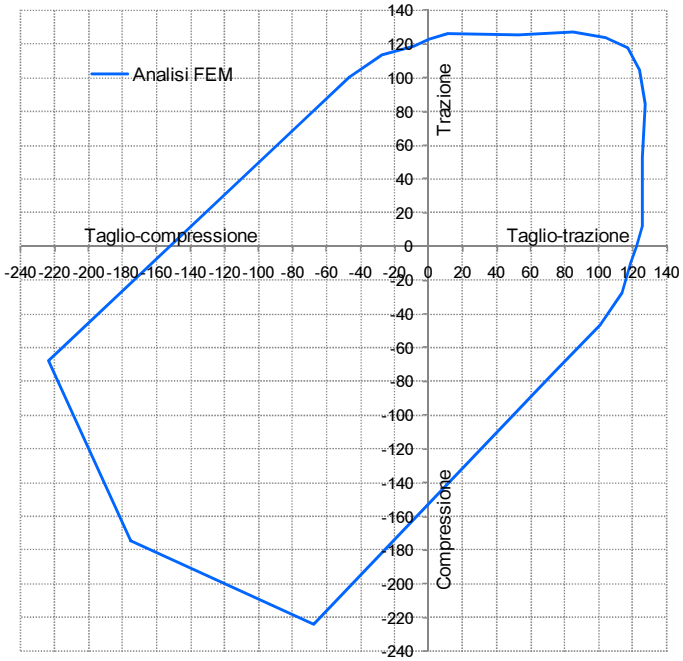


Figura 50: Dominio di rottura da analisi FEM

5.1.3. *Confronti dati sperimentali-modellazioni FEM*

Sovrapponendo i due domini è possibile formulare alcune osservazioni.

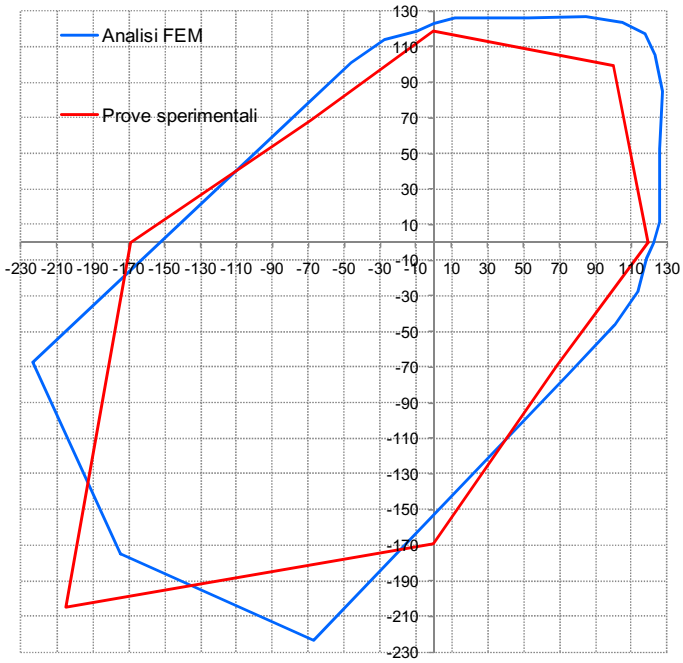


Figura 51: Sovrapposizione dei due domini

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Le modellazioni FEM hanno permesso di eseguire delle prove virtuali sulla connessione X-RAD, fatte con inclinazioni difficilmente riproducibili in laboratorio. Scopo di queste prove era quindi di interpolare i risultati sperimentali, per ricostruire il diagramma d'interazione nelle zone non coperte dalle prove sperimentali stesse.

Osservando la sovrapposizione dei diagrammi si vede come, in questa parte di piano (quella in alto a destra), il diagramma ricostruito partendo dalle prove sperimentali sia sempre contenuto all'interno del diagramma derivante dalle analisi FEM. Questo significa che l'andamento lineare ipotizzato tra un valore sperimentale e il successivo, è a favore di sicurezza.

Nel quadrante in basso a sinistra del dominio si nota una certa divergenza fra l'andamento dei due grafici. Si desumo le seguenti considerazioni:

- La sollecitazione a 225° (compressione a 45°) vede il trasferimento della forza sia per compressione delle viti tuttofiletto all'interno del pannello CLT, sia per contatto diretto della base dell'X-ONE sulla superficie del pannello CLT. Questi due meccanismi di trasferimento, che lavorano in parallelo, sono particolarmente complicati da modellare in maniera fedele.
- Le sollecitazioni a 180° e a 270° (taglio-trazione e compressione) prevedono il trasferimento di parte della forza di taglio X-RAD/CLT attraverso una forza d'attrito. Tale forza d'attrito non è stata modellata, con una sottostima della resistenza della connessione.

Una considerazione può però essere fatta osservando che una delle due analisi FEM è stata svolta per un angolo di 197° (e per simmetria 253°). Questa analisi mostra, a livello qualitativo, che tra gli angoli 180° e 225° (e per simmetria tra i 225° e i 270°) l'andamento lineare utilizzato per interpolare i dati sperimentali sia molto a favore di sicurezza. In queste zone in fatti il diagramma da analisi FEM è molto più "largo" del diagramma sperimentale.

Da quanto esposto si può affermare che la scelta di interpolare i risultati sperimentali con un andamento lineare tra una prova e l'altra, sia a favore di sicurezza.

5.1.4. Dominio basato sulle resistenze da calcolo a rottura

Si riporta una tabella riepilogativa con le resistenze calcolate con gli schemi analitici visti nei paragrafi precedenti.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

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

Figura 52: Resistenze analitiche della connessione

Il dominio di rottura così ottenuto è rappresentato in figura.

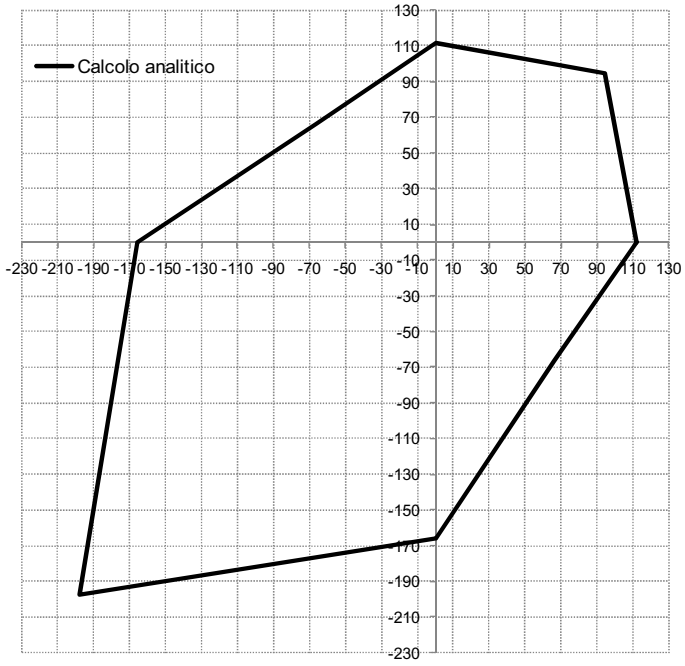


Figura 53: Dominio d'interazione da calcolo analitico

5.1.5. Confronti dati sperimentali - calcolo a rottura

Si riporta una sovrapposizione tra il dominio di rottura sperimentale e il dominio ottenuto da calcolo a rottura. Come si vede, il dominio da calcolo analitico è in ogni caso a favore di sicurezza.

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

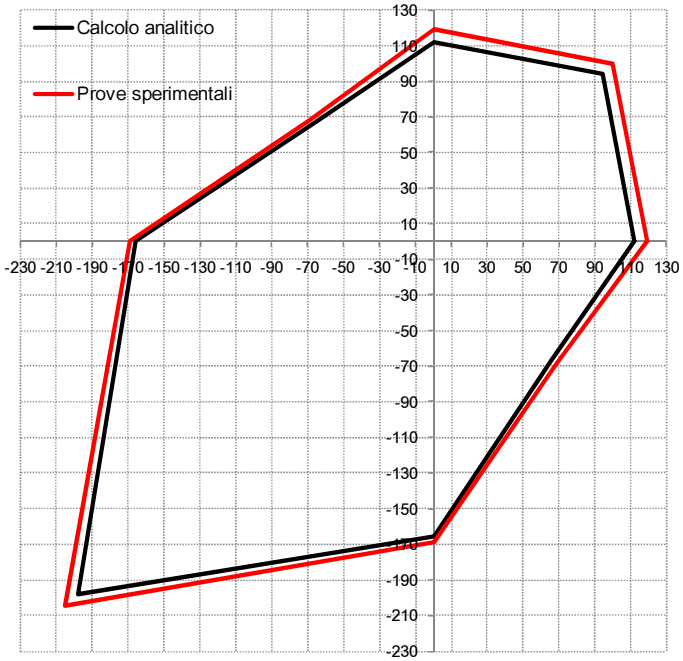


Figura 54: Sovrapposizione tra dominio sperimentale e da calcolo analitico

5.1.6. Interpretazione grafica del dominio

Nella figura che segue è rappresentato il dominio di resistenza caratteristico, sul quale è stata sovrapposta un'immagine della connessione X-RAD. Osservando l'immagine si comprende meglio a quali sollecitazioni corrispondono i vari punti sul dominio. Nella figura, a titolo esemplificativo, sono riportati i vettori corrispondenti a due stati di sollecitazione.

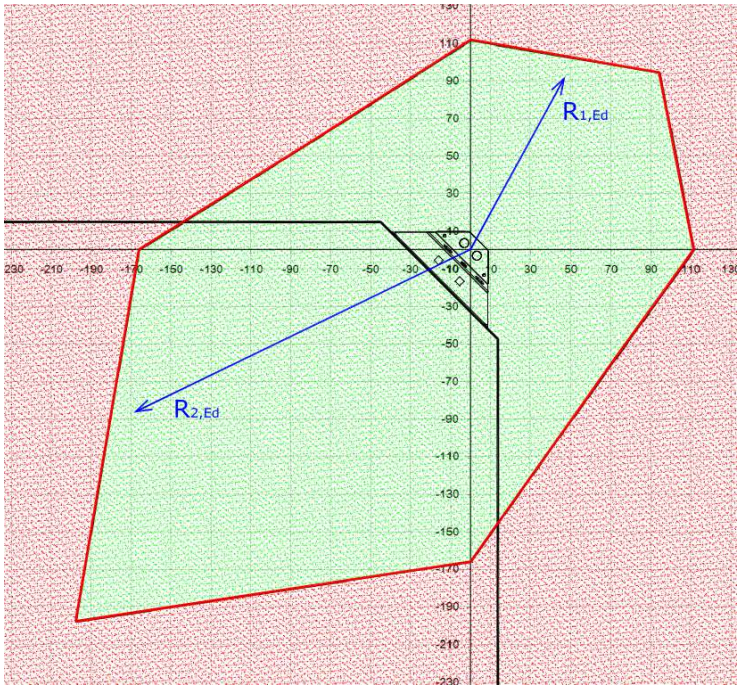


Figura 55: Interpretazione grafica del dominio

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

5.2. Dominio di rottura per il progettista

Partendo dal dominio di rottura caratteristico della connessione, il progettista dovrà definire un dominio di rottura di progetto, al fine di eseguire le verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo. Il passaggio dalle resistenze caratteristiche alle resistenze di progetto è diverso a seconda che la rottura coinvolga una connessione in legno (come ad esempio una connessione legno-legno con viti tuttofiletto) oppure una connessione in acciaio (come ad esempio una connessione bullonata tra due piastre in acciaio, oppure la rottura per trazione di una vite). Il passaggio tra resistenze caratteristiche e di progetto avviene nei seguenti modi:

- **ROTTURA LATO LEGNO**: in questo caso si applicano le formulazioni previste dal capitolo 4.4.6 del D.M. 14-01-2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni), o dal capitolo 2.4.1 della UNI EN 1995-1-1 (Eurocodice 5):

$$R_d = k_{\mathrm{mod}} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M}$$

dove:

$\gamma_M = 1,5$ per il D.M. 14-01-2008;

$\gamma_M = 1,3$ per la EN 1995-1-1 e la EN 1998-1-1, nel caso di comportamento strutturale non dissipativo (ductility class L);

$\gamma_M = 1,0$ per la EN 1995-1-1 e la EN 1998-1-1, nel caso di comportamento strutturale dissipativo (ductility class M/H).

Nelle immagini che seguono, prese dalla normativa europea, è meglio spiegato il corretto coefficiente di sicurezza da utilizzare per le connessioni in legno.

8.6 **Verifiche di sicurezza**

(1)P I valori di resistenza del materiale di legno devono essere determinati tenendo conto dei valori k_{mod} relativi a carichi istantanei in conformità alla EN 1995-1-1:2004.

(2)P Per la verifica allo stato limite ultimo di strutture progettate in conformità al concetto di comportamento strutturale di tipo non-dissipativo (classe di duttilità L), si applicano i coefficienti parziali di sicurezza γ_M per le caratteristiche del materiale impiegato relativi alle combinazioni di carico fondamentali indicate nella EN 1995.

(3)P Per la verifica allo stato limite ultimo di strutture progettate in conformità al concetto di comportamento strutturale di tipo dissipativo (classe di duttilità M o H), si applicano i coefficienti parziali di sicurezza γ_M relativi alle caratteristiche del materiale impiegato relativi alle combinazioni di carico accidentali indicate nella EN 1995.

Figura 56: Estratto dalla UNI EN 1998-1-1

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

prospetto 2.3 **Coefficienti parziali γ_M raccomandati per le proprietà e le resistenze dei materiali**

Combinazioni fondamentali:	
Legno massiccio	1,3
Legno lamellare incollato	1,25
LVL, compensato, OSB,	1,2
Pannelli di particelle	1,3
Pannelli di fibre, alta densità	1,3
Pannelli di fibre, media densità	1,3
Pannelli di fibre, MDF	1,3
Pannelli di fibre, bassa densità	1,3
Connessioni	1,3
Mezzi di unione a piastra metallica punzonata	1,25
Combinazioni accidentali	1,0

Figura 57: Estratto dalla UNI EN 1995-1-1

- **ROTTURA LATO ACCIAIO**: in questo caso si applicano le formulazioni previste dal capitolo 4.2.8.1.1 del D.M. 14-01-2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni), o dal capitolo 2.2 della UNI EN 1993-1-8 (Eurocodice 3) che prevedono l'utilizzo dei medesimi coefficienti di sicurezza:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

in questo caso si utilizzerà un diverso coefficiente di sicurezza in funzione del tipo di rottura:

$\gamma_M = \gamma_{M0} = 1,05$ per la resistenza, nei riguardi della frattura, delle sezioni tese;

$\gamma_M = \gamma_{M2} = 1,25$ per la resistenza delle sezioni in generale.

Si riporta una tabella riepilogativa delle modalità di rottura sperimentali nelle varie configurazioni di sollecitazione:

Modalità di rottura				
Sollecitazione sull'X-Rad	**Angolo**	**Rottura**	**γ_M**	**k_{mod}**
taglio-trazione	0°	Trazione delle viti (lato acciaio)	γ_{M2}=1,25	-
trazione a 45°	45°	Block tearing della piastra interna sui fori Φ16	γ_{M0}=1,05 ; γ_{M2}=1,25	-
trazione pura	90°	Trazione delle viti (lato acciaio)	γ_{M2}=1,25	-
taglio a 45°	135°	Trazione delle viti (lato acciaio)	γ_{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)	γ_{M2}=1,25	-
taglio-trazione	360°	Trazione delle viti (lato acciaio)	γ_{M2}=1,25	-

Figura 58: Modalità di rottura della connessione

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

5.2.1. Campo di utilizzo della connessione

La connessione per mezzo di X-ONE funge da collegamento tra pareti CLT per prevenirne il ribaltamento e lo scorrimento in presenza di azioni sismiche e del vento (classe di durata istantanea). Le forze verticali statiche vengono trasmesse per la maggior parte direttamente per contatto parete-parete, senza sollecitare la connessione.L'utilizzo di X-ONE in presenza di carichi con classi di durata breve, media o permanente ($k_{mod} < 1$) richiede una rivalutazione da parte del progettista del dominio di progetto, in quanto la gerarchia delle resistenze potrebbe modificarsi. In questi casi, a favore di sicurezza, è possibile trattare tutte le resistenze di progetto come delle resistenze lato legno, con l'applicazione degli opportuni coefficienti k_{mod} e γ_M.
Non sono disponibili, al momento, dati sperimentali con carichi applicati a breve termine, medio termine o in maniera permanente, in quanto la UNI EN 26891:1991 prescrive l'esecuzione di prove "quasi istantanee".
Le considerazioni esposte in questo paragrafo si riferiscono all'utilizzo di X-RAD per carichi con classe di durata istantanea; nel caso in cui si volesse utilizzare X-RAD in presenza di classi di durata del carico brevi, medie o permanenti ($k_{mod}<1$) spetta al progettista la valutazione del coefficiente γ_M e k_{mod} da utilizzare.

5.2.2. Dominio di rottura caratteristico

Nei paragrafi precedenti sono stati presentati 3 domini di rottura:

- uno basato sulle prove sperimentali;
- uno basato sulle analisi FEM;
- uno basato su schemi analitici.

Si riportano i tre domini.

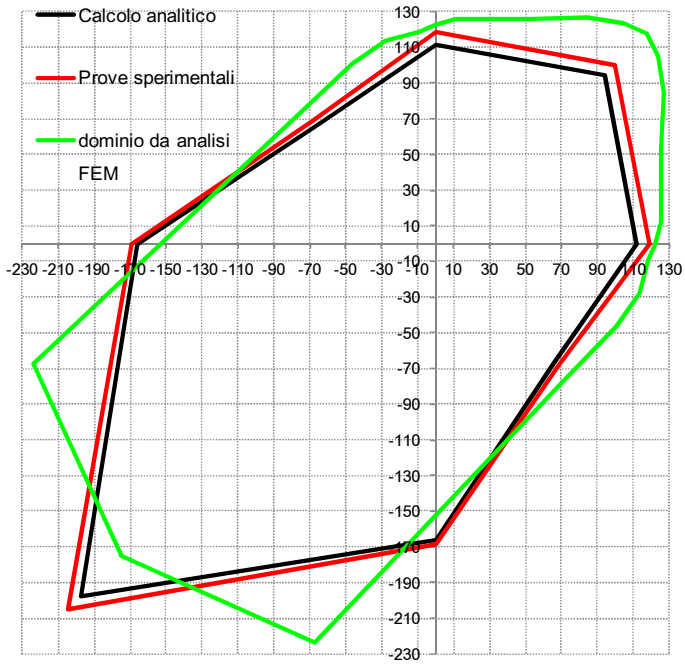


Figura 59:Sovrapposizione dei tre domini

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Il dominio di rottura caratteristico è perciò il seguente:

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

Figura 60: Dominio di rottura caratteristico

Il dominio di rottura così ottenuto è rappresentato in figura.

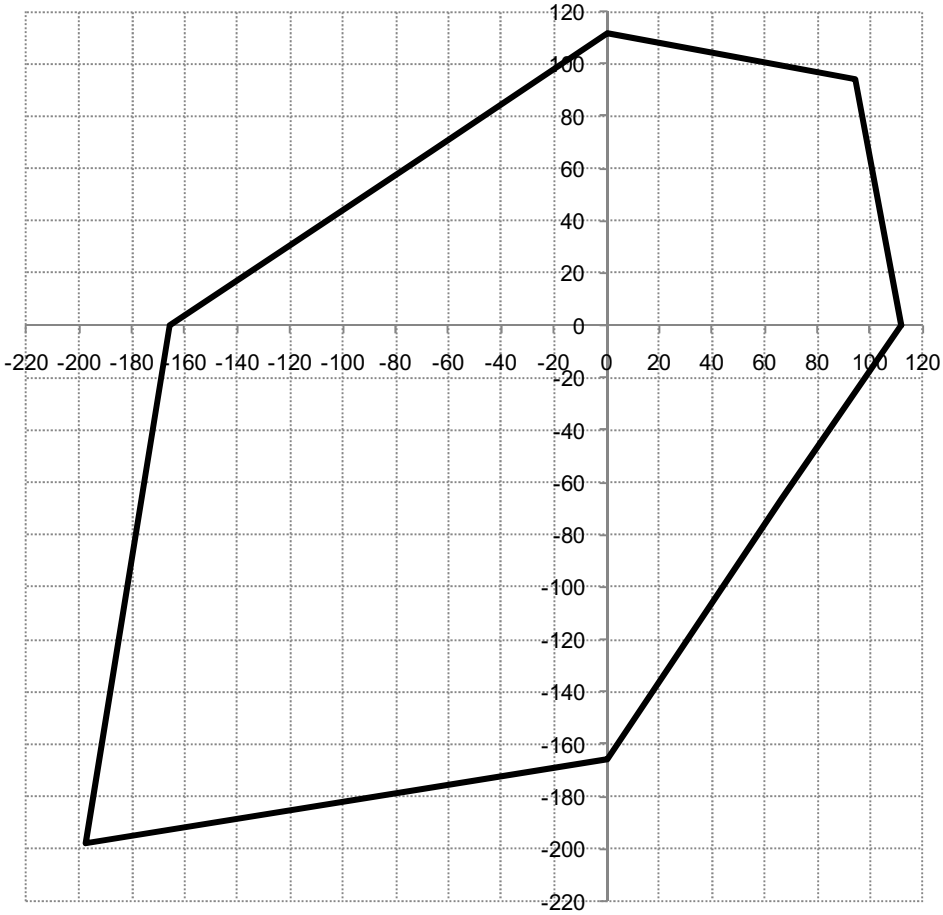


Figura 61: Dominio di rottura caratteristico

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

5.2.3. Dominio di rottura di progetto

Sulla base del dominio caratteristico appena visto ed utilizzando i coefficienti di sicurezza visti precedentemente, è possibile ottenere il seguente dominio di resistenza. Si riporta il calcolo in conformità alla normativa italiana (D.M. 14-01-2008) e a quella europea (EN 1995-1-1).

Dominio di rottura di progetto - D.M. 14-01-2008						
Sollecitazione sull'X-RAD	Angolo	γ_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

Figura 62: Resistenze di progetto - D.M. 14-01-2008

Dominio di rottura di progetto - EN 1995-1-1 + EN 1998-1-1						
Sollecitazione sull'X-RAD	Angolo	γ_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

Figura 63: Resistenze di progetto - EN 1995-1-1

** per il meccanismo resistente lato acciaio (block tearing) si dovrebbero utilizzare entrambi i coefficienti di sicurezza. Avendo considerato la resistenza da ETA, 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 γ_{M2}. N.B. se la resistenza della connessione fosse stata lato legno, nel caso di utilizzo della norma europea, si sarebbe potuto utilizzare un γ_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 γ_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 γ_M=1,30 relativo alle combinazioni statiche. Per gli angoli 180°, 225° e 270 ° l'ETA non fornisce una classe di duttilità, quindi, a favore di sicurezza, si ipotizza una classe di duttilità L con coefficiente γ_M=1,30. La normativa italiana,al contrario, non fa alcun cenno ad una diversificazione del γ_M in funzione della classe di duttilità, quindi si considera γ_M=1,50.*

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

Nel grafico che segue sono rappresentati i due domini di progetto, insieme al dominio caratteristico. Si vede chiaramente la differenza tra i domini di progetto nel caso di sollecitazioni con angoli 180°, 225° e 270°, per le quali la rottura è lato legno. In questo caso la norma italiana e quella europea seguono due strade diverse.

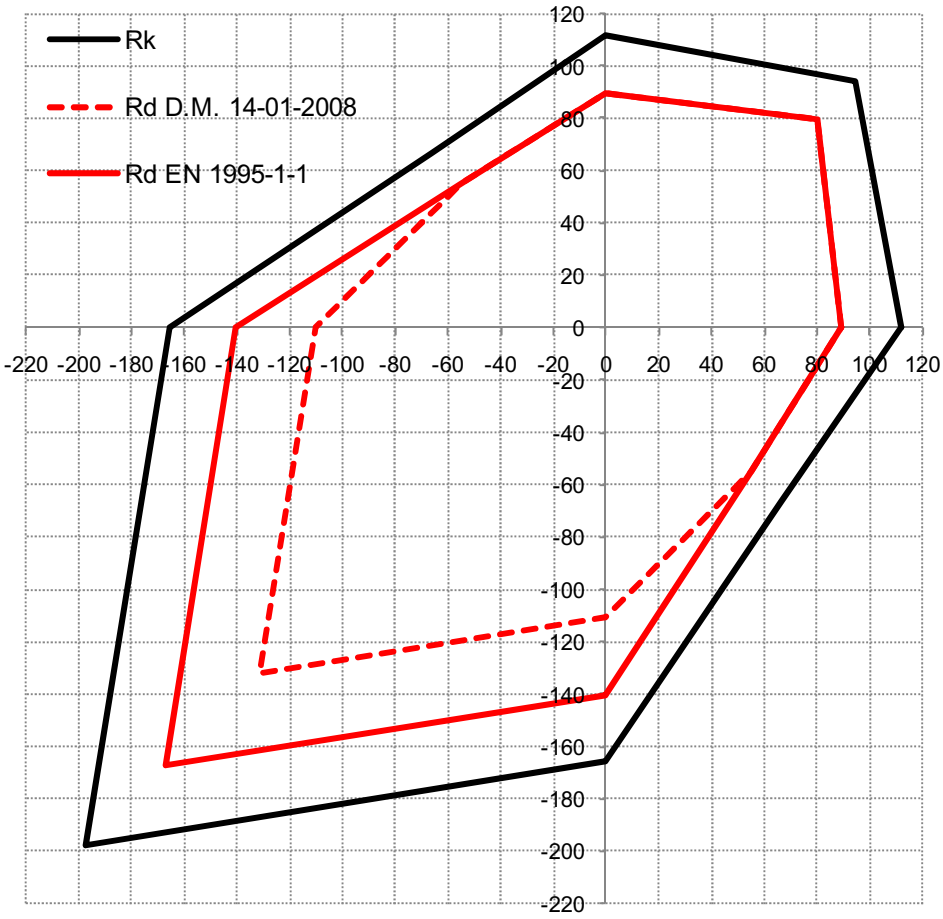


Figura 64: Domini di progetto

5.3. Prescrizioni progettuali da Benestare Tecnico Europeo (ETA-15/0632)

Il Benestare Tecnico Europeo (ETA) in fase di emissione, fornisce alcune indicazioni in merito all'uso previsto della connessione:

- 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, in accordo con la EN 1995-1-1.

In merito alla progettazione della connessione, l'ETA recita quanto segue:

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com

1. la progettazione di connessioni X-RAD deve essere condotta sotto la responsabilità di un ingegnere con esperienza nelle costruzioni in legno.
2. 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.
3. le connessioni X-RAD devono essere installate correttamente.
4. deve essere controllato che non intervengano fenomeni di splitting, in accordo con la EN 1995-1-1.

5.3.1. Fenomeni di splitting

Questa ultima prescrizione merita un approfondimento. Durante l'esecuzione delle prove, e in particolare in prossimità della rottura dei provini, sono intervenuti dei fenomeni di splitting più o meno marcati. Questi fenomeni hanno a volte comportato l'apertura del pannello CLT in corrispondenza della coppia di viti maggiormente sollecitate a trazione, con l'estrazione di un cuneo di legno. Le resistenze ricavate dalle prove sono quindi state determinate in presenza di splitting. Nonostante ciò, l'ETA prescrive una particolare attenzione nell'evitare la possibilità dell'instaurarsi di tali fenomeni.
Per questo motivo si prescrive che, nel caso in cui la connessione venga progettata per sfruttarne al massimo le prestazioni in termini di resistenza, vengano inserite delle viti in direzione perpendicolare all'asse del pannello (es. viti VGZ Ø7), in maniera da "cucire" lo stesso, per fornire un rinforzo nei confronti di possibili fenomeni di apertura di fessure. Tale precauzione avrà l'effetto di spostare verso l'alto la resistenza ultima, portando la connessione a rottura per trazione della vite, in maniera da sfruttarne a pieno la resistenza. Si riporta uno schema grafico con la posizione delle viti di rinforzo.

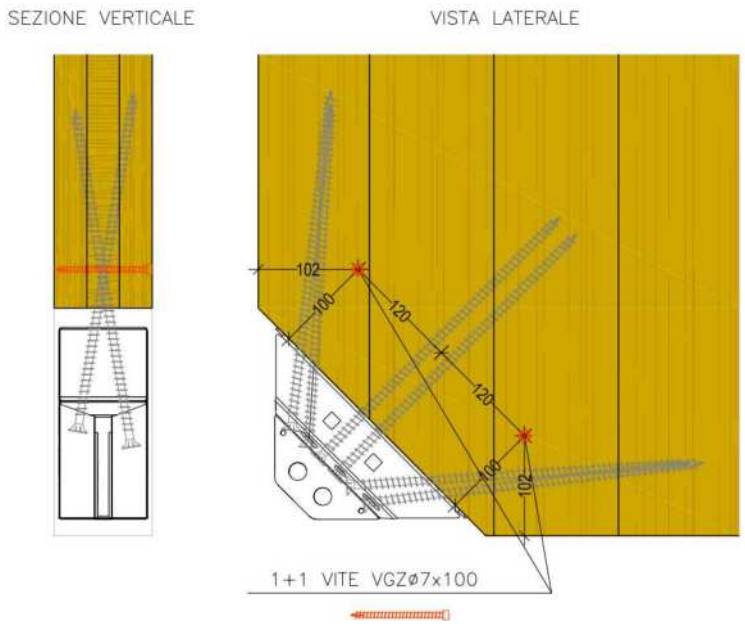


Figura 65: Viti di rinforzo contro lo splitting

rothoblaas
Rotho Blaas srl • I-39040 Cortaccia (BZ) • Via Dell'Adige 2/1 • Tel. +39 0471 81 84 00 • Fax +39 0471 81 84 84 • info@rothoblaas.com