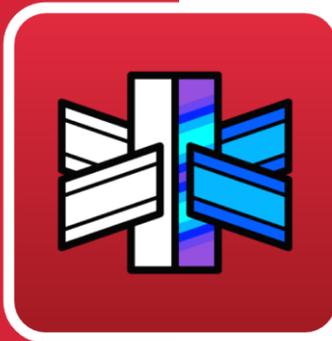




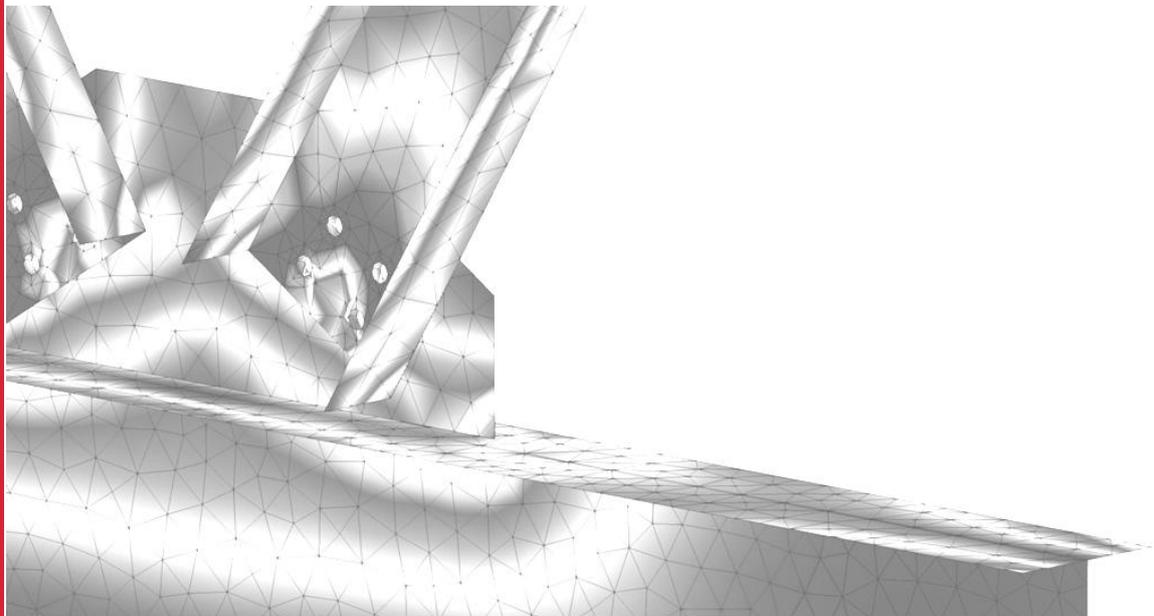
Software per Architettura,
Ingegneria ed Edilizia

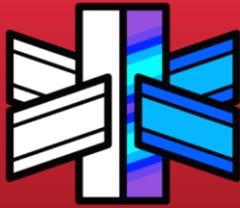


CYPE Connect

Relazione di calcolo

Modellazione e analisi congiunta per strutture in acciaio. Questa applicazione è integrata nel flusso di lavoro Open BIM attraverso la piattaforma BIMserver.center.





Indice

1	Analisi.....	3
1.1	Introduzione.....	3
1.2	Modello delle Piastre	4
1.3	Saldature	5
1.4	Bulloni	6
1.4.1	Comportamento del gambo.....	6
1.4.2	Trasmissione delle sollecitazioni a trazione sulla piastra.....	9
1.4.3	Comportamento dell'appoggio	10
1.4.4	Trasmissione delle sollecitazioni	11
1.5	Contatto	11
1.6	Carichi e condizioni al contorno.....	12
1.6.1	Appoggi	12
1.6.2	Carichi.....	12
2	Riferimenti.....	15

1 Analisi

1.1 Introduzione

Il calcolo delle connessioni è uno dei problemi più complessi dell'ingegneria strutturale. Il modo abituale di affrontare questo problema nel corso degli anni è stato attraverso l'uso di ipotesi semplificate o attraverso l'esperienza degli strutturisti, con calcoli manuali o fogli di calcolo. Fino a poco tempo fa non esisteva la necessità legale di convalidare decine o centinaia di combinazioni di carico ed i coefficienti di sicurezza erano più alti di quelli vigenti.

Oggi, ci sono più vincoli di progettazione ed i coefficienti di sicurezza sono stati ridotti, rendendo l'accuratezza del calcolo una questione cruciale.

Il modo tradizionale di affrontare la progettazione delle unioni può essere ancora utile in certe situazioni, ma in generale ci troviamo di fronte a progetti più complessi.

Quando la struttura viene analizzata con un modello di barre, non si arriva ad un modello dettagliato delle connessioni che compongono la struttura. Per progettare correttamente l'unione, è necessario generare un modello di connessione che rispetti la disposizione reale dell'unione, considerando anche le forze esercitate alle estremità delle membrature che compongono l'unione, che si ottengono dalla risoluzione del calcolo della struttura.

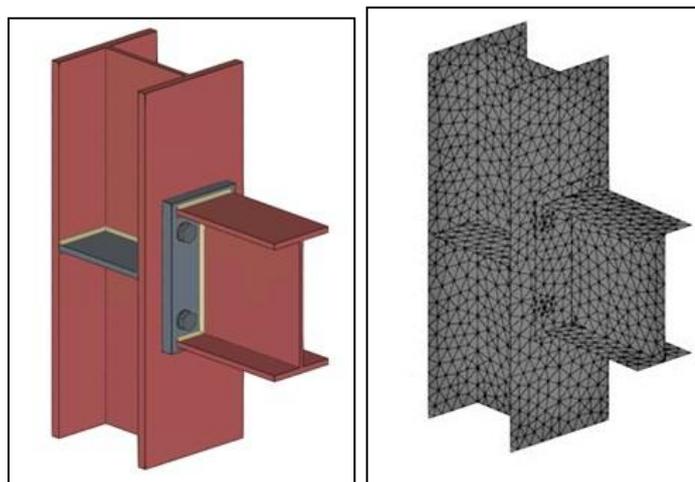
Attraverso l'uso dell'analisi agli elementi finiti è possibile affrontare questo problema con maggiore efficienza e precisione.

CYPE Connect è uno strumento che permette la generazione di modelli ad elementi finiti delle connessioni di strutture in acciaio, così come il loro calcolo e la verifica secondo i criteri normativi, con un intervento minimo o nullo da parte dell'utente, utilizzando il software agli elementi finiti di fama mondiale OpenSees [1] come motore di calcolo.

Nei modelli a elementi finiti generati da CYPE Connect, si possono distinguere tre elementi principali: piastre, saldature e bulloni.

Le piastre costituiscono tutti quegli elementi piatti (con due dimensioni prevalenti (lunghezza e larghezza) rispetto alla terza (lo spessore) che sono coinvolti nel modello strutturale dell'unione, come per esempio, gli elementi piatti che formano i profili metallici, le piastre che vengono utilizzate per realizzare unioni bullonate, irrigidimenti, ecc. Nella figura 1.1 è possibile vedere un confronto tra il modello geometrico reale dell'unione e il modello discretizzato dell'unione. Questo modello di piastra sarà descritto più in dettaglio nella sezione 1.2.

I bulloni e le saldature costituiscono gli elementi di connessione del modello e le loro caratteristiche saranno descritte più in dettaglio nelle sezioni 1.3 e 1.4.



(a) Modello geometrico reale dell'unione (b) Modello discretizzato dell'unione.

Figura 1.1. Discretizzazione di piastre ad elementi finiti.

1.2 Modello delle Piastre

Nelle strutture in cui lo spessore è significativamente inferiore alle altre dimensioni, come nel caso delle piastre che formano strutture metalliche, gli elementi di tipo *Shell* sono una buona soluzione (sezione 29.6.1 in [2]). L'elemento utilizzato sarà l'elemento shell triangolare NLDKGT [3] con tre nodi.

Questi elementi tengono conto del comportamento della membrana (tensione sul piano, compressione, taglio e momento torsionale) e della piastra (momento fuori piano). Nel rango non lineare, il comportamento della piastra è modellato usando sezioni stratificate. Lo spessore della piastra è diviso in un numero di strati (in questo caso 5) dove il problema da risolvere è la deformazione piana. Il calcolo dei momenti flettenti viene eseguito sommando gli effetti di ogni strato e non è più possibile considerare che le sollecitazioni nello spessore della piastra siano ottenute sommando gli effetti della membrana e del comportamento flettente come avverrebbe nell'analisi lineare (sezione 9.2.4 in [4]).

Negli elementi finiti, le tecniche di integrazione numerica sono utilizzate per calcolare gli integrali necessari. Se la non linearità del materiale è attivata, l'integrazione numerica necessaria per calcolare la matrice di rigidità non viene eseguita solo sulla superficie (dove si usano punti gaussiani), ma anche sullo spessore.

Questo modello di piastre sarà usato per discretizzare gli elementi piatti che formano i profili metallici e per discretizzare altre piastre che intervengono nel modello strutturale, come le piastre usate per unioni bullonate o irrigidimenti. In breve, questo modello di piastra sarà utilizzato per discretizzare qualsiasi elemento piatto coinvolto nel modello strutturale dell'unione.

I diagrammi dei materiali più comuni usati nella modellazione ad elementi finiti dell'acciaio strutturale sono il modello plastico ideale o il modello elastico ideale con indurimento per deformazione. La legge costitutiva scelta per piastre e sezioni deve essere una legge costitutiva bilineare con una pendenza nella sezione plastica $\tan^{-1}(E/1000)$.

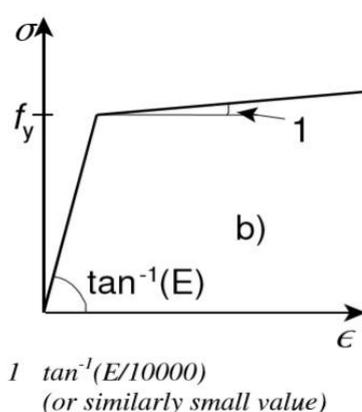


Figura 1.2. Legge costitutiva dell'acciaio nelle piastre [5].

1.3 Saldature

Le saldature sono uno degli elementi di collegamento nelle unioni. Ci sono diverse opzioni per modellare le saldature.

Un'opzione molto usata per la modellazione, che è quella utilizzata in CYPE Connect, è la connessione diretta tra le piastre da saldare per mezzo di vincoli di forza-deformazione, noti anche come *Vincoli Multi-punto* (Multi Point Constraints). La tecnica di modellazione della saldatura a collegamento rigido è stata suggerita da Fayard e Bignonnet (1996) [6], e si basa sulla modellazione della rigidità locale della connessione saldata unendo due elementi *shell* adiacenti attraverso i loro nodi lungo la lunghezza della saldatura. L'uso di collegamenti rigidi per modellare le saldature è riportato in diversi articoli scientifici come riportato nei riferimenti [7], [8], [9] o [10].

In CYPE Connect, i nodi di estremità della superficie da saldare sono proiettati perpendicolarmente sulla superficie da saldare. I collegamenti rigidi collegano ciascuno dei nodi di estremità della superficie da saldare con i nodi proiettati. Inoltre, questi nodi proiettati sono collegati tramite MPC ai nodi circostanti tenendo conto delle funzioni di

interpolazione del campo di deformazione dell'elemento su cui il nodo è proiettato. Applicando questo metodo, lo spessore della gola di saldatura è rispettato così come la configurazione reale della saldatura.

Il vantaggio principale di questo metodo è che permette di collegare maglie di densità diverse. La figura 1.3 mostra la modellazione di una saldatura utilizzando elementi rigidi e MPC in CYPE Connect.

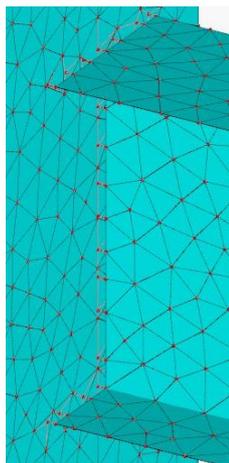


Figura 1.3. Modellazione di saldatura in CYPE Connect.

1.4 Bulloni

Tre comportamenti sono differenziati negli elementi che modellano i bulloni. Comportamento a trazione ed a taglio del gambo del bullone, trasmissione delle forze di trazione alla piastra e comportamento dell'appoggio della piastra sul bullone.

1.4.1 *Comportamento del gambo*

Per modellare il comportamento del gambo si fa riferimento a molle non lineari che simulano il comportamento a trazione e molle lineari che simulano il comportamento a taglio. Le rigidità iniziali sono ottenute dalle norme corrispondenti. Per modellare il comportamento elastoplastico del gambo in tensione, verrà utilizzata una legge materiale bilineare, che si basa sulle curve sforzo-deformazione dei bulloni proposte in diversi lavori di ricerca come riportato al riferimento [11], in cui si considera che lo sforzo ultimo si verifica per una deformazione del 5%. La legge bilineare di questo comportamento può essere vista nella figura 1.4.

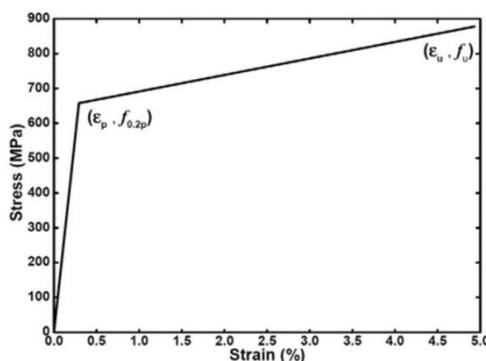


Figura 1.4. Diagramma Tensione-deformazione del bullone [11]

Questo modello per il gambo del bullone che utilizza elementi di tipo molla con rigidità ottenute da standard si trova anche in altri articoli scientifici come al punto 7.5 del riferimento [4].

Un esempio delle equazioni che rappresentano queste leggi bilineari usando le rigidità riportate nell' Eurocodice sarà mostrato qui di seguito.

Comportamento a trazione

La legge bilineare forza-spostamento del comportamento a trazione che è basata sulla legge di comportamento menzionata nella sezione 1.4.1 è mostrata nella figura 1.5.

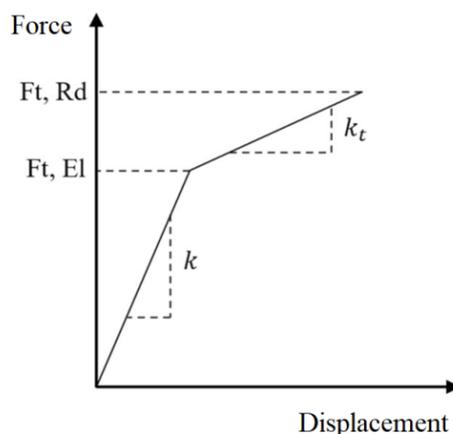


Figura 1.5. Diagramma Forza-deformazione del bullone caricato a trazione

Nel rispetto della EN1993-1-8 tabella 6.3.2 [12] la rigidità iniziale k sarà:

$$k = \frac{EA_s}{L_s} \quad (1.1)$$

dove E è il modulo di elasticità del bullone, A_s è l'area della sezione trasversale effettiva del bullone teso (area filettata) e L_b è l'allungamento del gambo, ossia il tiro del gambo (somma

degli spessori degli elementi uniti dal bullone), lo spessore della rondella e la metà dello spessore della testa del bullone.

Le equazioni che descrivono la legge bilineare sono:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.2)$$

$$F_{t,EI} = \frac{k_2 f_{yb} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.3)$$

$$c = \left(\frac{f_{us} - f_{yb}}{0,05 - \frac{f_{yb}}{E}} \right) / E \quad (1.4)$$

$$k_t = c \cdot k \quad (1.5)$$

dove

- $F_{t,Rd}$: Resistenza di progetto a trazione del gambo del bullone EN1993-1-8 tabella 3.4 [12]
- $k_2 = 0.9$ (0.63 per bulloni a testa svasata)
- f_{ub} : Resistenza ultima a trazione del bullone (ISO 898:2013 [13])
- f_{yb} : Resistenza ultima a snervamento del bullone (ISO 898:2013 [13])
- γ_{M2} : Coefficiente parziale di sicurezza EN1993-1-8 tabella 2.1 [12] (valore raccomandato $\gamma_{M2} = 1,25$)

Comportamento a taglio

Secondo il riferimento menzionato [4] il comportamento a taglio del gambo del bullone può essere modellato con una molla lineare con una data rigidità.

Nel rispetto della EN1993-1-8 tabella 6.3.2 la rigidità del bullone a taglio k sarà:

$$k = \frac{16n_b d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (1.6)$$

- n_b : Numero di file di bulloni che lavorano a taglio
- d : Diametro del bullone
- d_{M16} : Diametro M16, 16 mm

Se si considera le ipotesi [4], la rigidità a taglio può essere ottenuto come

$$k = \frac{8d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (1.7)$$

1.4.2 *Trasmissione delle sollecitazioni a trazione sulla piastra*

La maglia di una piastra con foro per bulloni si rappresenta come segue nella figura 1.6.

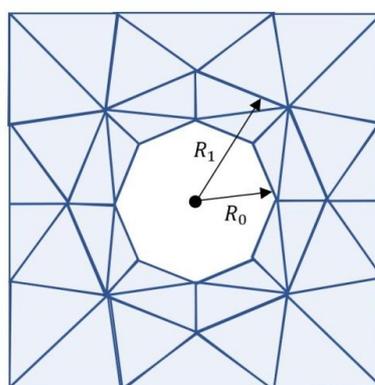


Figura 1.6. Maglia di una piastra forata

Il diametro del foro è $D = 2R_0$ mentre il parametro R_1 rappresenta la lunghezza dei collegamenti descritti in seguito.

Il comportamento di trasmissione delle forze di trazione alla piastra è modellato da collegamenti rigidi tra il nodo dal centro dell'apertura e i nodi dell'ottagono esterno che trasmettono le forze di trazione nella direzione perpendicolare al piano delle piastre collegate.

Nella figura 1.7 si rappresenta la connessione di questi collegamenti di interpolazione con il nodo della piastra.

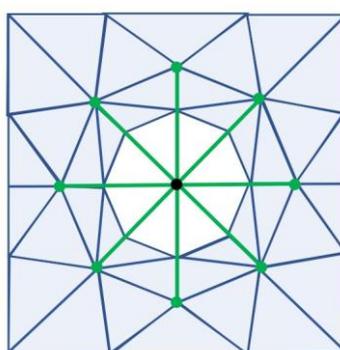


Figura 1.7. Rappresentazione dei collegamenti (elementi verdi) con i nodi della piastra.

1.4.3 Comportamento dell'appoggio

Il comportamento dell'appoggio è modellato da collegamenti tra il nodo interno dell'apertura e i nodi situati sul bordo dell'apertura. In questi collegamenti è considerata la rigidità di sostegno della vite sulla piastra. Questa maglia viene mostrata in figura 1.8.

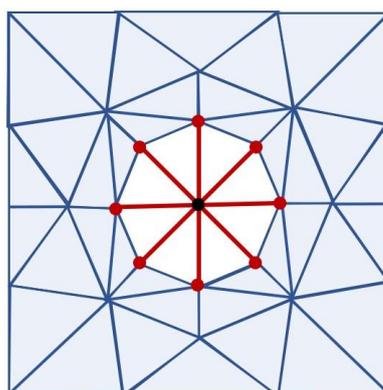


Figura 1.8. Rappresentazione dei collegamenti (elementi rossi) che rappresentano la superficie di appoggio tra la piastra ed il bullone

La rigidità complessiva esercitata da questi otto elementi di collegamento (elementi rossi figura 1.8) è quattro volte la rigidità assiale di ciascuno di questi elementi (sezione 10.3.3 in [4]). Questo significa che qualunque sia la direzione della forza applicata al nodo centrale comune a tutti gli otto elementi, la rigidità apparente sarà sempre quattro volte la rigidità assiale di un elemento radiale.

Se si considera che questi otto elementi lavorano solo a compressione, come nel caso di CYPE Connect, la rigidità di ogni raggio, come descritto nella sezione 10.3.3 di [4], è uguale a:

$$k_N = 0,5k \quad (1.8)$$

con k rigidità dell'appoggio descritto in diverse normative.

Per l'Eurocodice la rigidità dell'appoggio viene descritta nella EN1993-1-8 tabella 6.3.2 [12]

$$k = 24n_b k_b k_t d f_u \quad (1.9)$$

Se si considera il punto 7.5.1. di [4], la rigidità iniziale dell'appoggio può calcolarsi come

$$k = \frac{22,5 t d f_u}{d_{M16}} \quad (1.10)$$

dove

- f_u : Resistenza ultima dell'acciaio dell'appoggio
- t : Spessore del componente che costituisce l'appoggio
- d : Diametro del bullone
- d_{M16} : Diametro M16

1.4.4 *Trasmissione delle sollecitazioni*

In CYPE Connect il modello di connessione bullonata è realizzato collegando le piastre con un modello di bullone in cui i carichi sono trasmessi dai nodi della prima piastra a un unico nodo, questo nodo trasmette i carichi a un secondo nodo attraverso un elemento che simula il comportamento del gambo e questo secondo nodo trasmette questi carichi ai nodi della seconda piastra.

Questo modo di trasmettere i carichi tra le connessioni da nodo a nodo può essere trovato in numerosi articoli scientifici come [4], [14], [15], [16], [17] o [18].

1.5 Contatto

Il comportamento di contatto tra i componenti dell'unione è realizzato tramite l'inclusione di elementi di connessione tra i nodi che lavorano solo in compressione con una rigidità molto alta. Se la mesh non è conforme, i nodi sono proiettati da una superficie all'altra nella direzione perpendicolare alle superfici ed i gradi di libertà sono messi in relazione usando le funzioni di forma degli elementi ed i Multi Point Constraints. I nodi sono collegati con i loro corrispondenti nodi proiettati e questi elementi di sola compressione (figura 1.9) con rigidità molto elevate sono inclusi, evitando l'avvicinamento tra i due nodi.

La modellazione delle relazioni di contatto per mezzo di connessioni da nodo a nodo è menzionata in numerosi articoli scientifici come [15], [19] o [20].

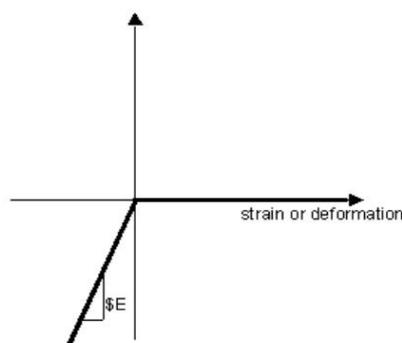


Figura 1.9. Materiale con comportamento a compressione [21]

1.6 Carichi e condizioni al contorno

1.6.1 Appoggi

Un membratura dell'unione è sempre considerato come portante. Tutti gli altri membri sono collegati ad esso.

-**Portante:** l'elemento portante può essere *passante* o *non passante* nel giunto. I membri *non passanti* sono collegati esternamente ad una estremità e i membri *passanti* sono collegati esternamente ad entrambe le estremità. I collegamenti esterni che vengono introdotti costringono a spostamenti e torsioni.

-**Collegati:** i membri collegati sono collegati all'elemento portante e non hanno collegamenti esterni. I carichi sono applicati a questi elementi.

1.6.2 Carichi

Quando la struttura viene analizzata utilizzando un modello di barre, non c'è un modello dettagliato dei giunti che compongono la struttura. Se un giunto viene analizzato in un tale modello, la risultante delle forze in quel giunto è zero perché il modello è in equilibrio.

Per progettare correttamente l'unione, è necessario generare un modello di connessione che rispetti la disposizione reale della connessione, tenendo conto anche delle forze esercitate alle estremità delle membrature che la compongono, che si ottengono dalla risoluzione del calcolo strutturale.

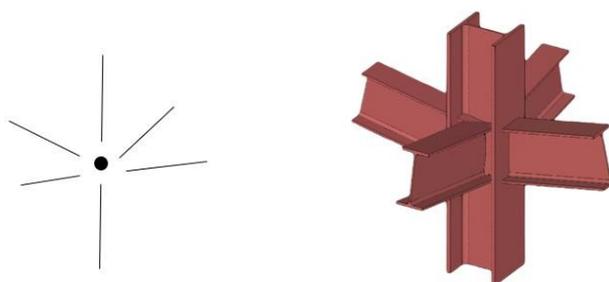
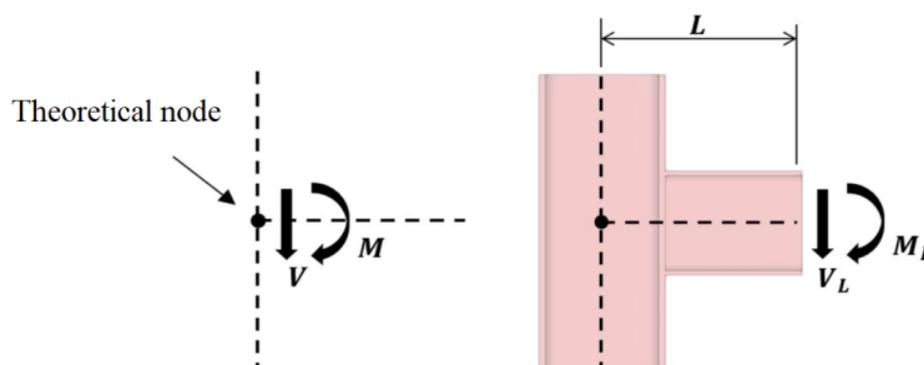


Figura 1.10. Rappresentazione dell'unione teorica delle membrature e dell'unione reale modellata con CYPE Connect.

Le forze ottenute negli elementi dell'analisi strutturale sono trasmesse alle estremità delle membrature. Le eccentricità delle membrature causate dalla progettazione effettiva dell'unione sono rispettate in questa trasmissione dei carichi alle estremità. Nei modelli di connessioni realizzate, si deve considerare una lunghezza limitata delle membrature che compongono l'unione.

Gli effetti causati dal modello preciso dell'unione sono importanti per la progettazione della connessione. Gli effetti sono illustrati nella figura 1.11.



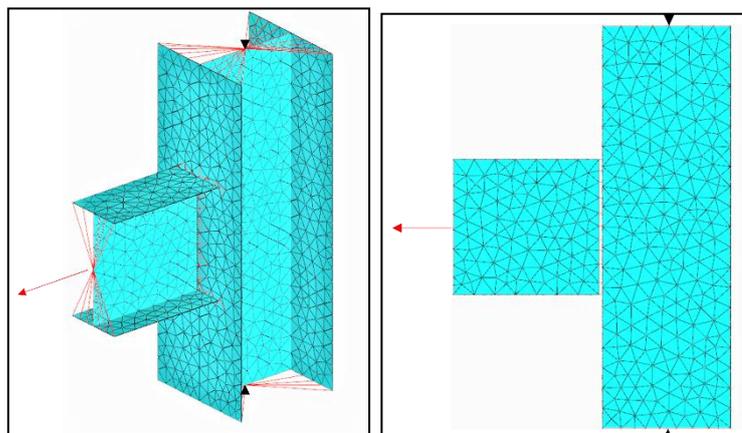
(a) Applicazione dei carichi nel nodo teorico. (b) Applicazione dei carichi negli estremi delle membrature.

Figura 1.11. Effetti del modello dettagliato dell'unione nella trasmissione dei carichi nelle estremità e nei membri.

Quando si calcola la connessione, si deve considerare che i momenti e le forze di taglio che agiscono sul nodo teorico devono essere trasferiti alle estremità delle membrature in modo da ottenere i carichi desiderati al nodo teorico. Nell'esempio mostrato nella figura 1.11, la trasformazione dei carichi risulta

$$V_L = V \quad M_L = M - V \cdot L \quad (1.11)$$

Per modellare l'applicazione dei carichi alle estremità delle membrature, si segue la procedura descritta nella sezione 10.4.1 di [4]. I nodi fittizi situati sugli assi ideali delle membrature devono essere inclusi e questi nodi devono essere collegati ai nodi finali delle membrature per mezzo di elementi rigidi fittizi. Un esempio di questa modellazione del carico può essere visto nella figura 1.12.



(a) Vista Generale. (b) Vista Laterale.

Figura 1.12. Modellazione degli elementi rigidi fittizi.

Questo modo di modellare i carichi ha il vantaggio di ridurre le concentrazioni di stress locali, al contrario dei modelli in cui i carichi sono applicati direttamente ai nodi, ed il vantaggio di applicare facilmente carichi e condizioni al contorno sui diversi elementi. In un certo senso, questa forma di modellazione tiene conto dell'ipotesi di Navier o delle sezioni piane in cui si afferma che le sezioni che sono piane e perpendicolari all'asse della trave prima della deformazione rimangono piane e perpendicolari all'asse della trave dopo la deformazione.

2 Riferimenti

- [1] Frank Mckenna, Michael Scott y Gregory Fenves. "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition". En: *Journal of Computing in Civil Engineering J COMPUT CIVIL ENG* 24 (ene. de 2010). DOI: 10.1061 / (ASCE) CP. 1943-5487. 0000002.
- [2] Dassault Systemes. "Abaqus/CAE User's Guide." En: (2014).
- [3] Xinzheng Lu y col. "Development and Application of a High-Performance Triangular Shell Element and an Explicit Algorithm in Opensees for Strongly Nonlinear Analysis". En: *Computer Modeling in Engineering and Sciences* 120 (ene. de 2019), pags. 561-582. DOI: 10.32604/ cmes.2019.04770.
- [4] Paolo Rugarli. *Steel Connection Analysis*. John Wiley and Sons, 2018.
- [5] "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: General rules-Plated structural elements". En: (2006).
- [6] Jean-Luc Fayard y Andre Bignonnet. "Fatigue Design Criterion For Welded Structures". En: *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 19 (jun. de 1996), pags. 723-729.
- [7] M. Bennebach, P. Klein y E. Kirchner. "Several seam weld finite element idealizations challenged in fatigue within a French industrial collaborative workgroup". En: *Procedia Engineering* 213 (2018). 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, pags. 403-417. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818302716>.
- [8] Jean Abry y col. "Enhanced fatigue structural stress analysis of a heavy vehicle seam welded steel chassis frame: FEA model preparation, weld model description, fatigue stress calculation and correlation with 10 year operating experience". En: *Procedia Engineering* 213 (2018). 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, pags. 539-548. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.050>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818302819>.
- [9] Didier Turlier y col. "Seam weld shell element model for thin walled structure FE fatigue design". En: *MATEC Web of Conferences* 165 (ene. de 2018), pag. 21007. DOI: 10.1051/mateconf/ 201816521007.
- [10] Didier Turlier y col. "New FEA shell element model for seam weld static and fatigue structural assessment". En: *Fatigue design* 165 (nov. de 2011). DOI: 10.1051/mateconf/ 201816521007.

- [11] Ying Hu y col. "FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension". En: *Journal of Constructional Steel Research* 126 (2016), pags. 174-186. ISSN: 0143-974X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.021>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302061>.
- [12] "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints". En: (2005).
- [13] ISO 898-1:2013. "Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes, Coarse Thread and Fine Pitch Thread". En: *ISO* (2013).
- [14] S. Xu y X. Deng. "An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints". En: *Finite Elements in Analysis and Design* 40.9 (2004), pags. 1175-1194. ISSN: 0168-874X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2003.08.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X03001598>.
- [15] Jeong Kim, Joo-Cheol Yoon y Beom-Soo Kang. "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints". En: *Applied Mathematical Modelling* 31.5 (2007), pags. 895-911. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.020>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X0600062X>.
- [16] Mohamed El Aghoury, Essam Amoush y Mohamed Soliman. "Numerical Study of Bolted Moment Connections in Cold-Formed Steel Frames". En: *Future Engineering Journal* (2020).
- [17] Alexandra Korolija. "FE-modeling of bolted joints in structures". En: *Master Thesis in Solid Mechanics. Linkopings Universitet* (2012).
- [18] Jun Ye y col. "Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames". En: *Thin-Walled Structures* 150 (2020). ISSN: 0263-8231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382311830942X>.
- [19] "ANSYS. Theory Reference Release 5.6." En: (1999).
- [20] A.M. Habraken y S. Cescotto. "Contact between deformable solids: The fully coupled approach". En: *Mathematical and Computer Modelling* 28.4 (1998). Recent Advances in Contact Mechanics, pags. 153-169. ISSN: 0895-7177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00115-0). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717798001150>.
- [21] *Elastic-No Tension Material*. https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Elastic-No_Tension_Material. 2010.