

Copyright



Aedes
Software per Ingegneria Civile

2020

Aedes.ACM
APERTURE E CERCHIATURE
IN MURATURE PORTANTI
Vers. 2020
© 1997-2020 AEDES Software
www.aedes.it
Questo software è protetto
dalle Norme Internazionali sul copyright

Aggiornato al D.M. 17.1.2018
e alla Circ. 7 del 21.1.2019

Supporto tecnico:
assistenza@aedes.it

 **Aedes.ACM**

APERTURE E CERCHIATURE IN MURATURE PORTANTI

Analisi strutturale di pareti in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

Giunti nei telai di cerchiatura

Ultima revisione di questo documento: 22.07.2020

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale, a norma di legge e delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o mezzo elettronico o meccanico, per alcun uso, senza il permesso scritto della AEDES Software per Ingegneria Civile.

© 1997-2020 AEDES Software per Ingegneria Civile

Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)

Tel.: +39 0571 401073 - www.aedes.it

Amministrazione: info@aedes.it - Supporto tecnico: assistenza@aedes.it

AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma ACM, descritto nella documentazione ad esso associata, in qualsiasi momento e senza preavviso.

Il software e la documentazione allegata, anche se curati con scrupolosa attenzione, non possono comportare specifiche responsabilità di AEDES per involontari errori o inesattezze: pertanto, l'utilizzatore è tenuto a controllare l'esattezza e la completezza del materiale utilizzato. Le correzioni relative ad eventuali errori tipografici saranno incluse nelle versioni di aggiornamento.

ACM è di esclusiva proprietà della AEDES e viene concesso in uso non esclusivo secondo i termini e le condizioni riportati nel contratto di licenza d'uso. L'utente non avrà diritto ad utilizzare ACM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'utente è responsabile della scelta di ACM al fine del raggiungimento dei risultati voluti, nonché dell'installazione, dell'uso dello stesso e dei relativi risultati.

Le sole garanzie fornite dalla AEDES in merito a ACM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in ACM soddisfino le esigenze dell'utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso da parte dell'utente.

I nomi dei prodotti citati nella documentazione di ACM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

INDICE

Contenuto

Questo documento è dedicato all'analisi dei collegamenti fra montanti e travi nei telai di cerchiatura. Vengono analizzate in dettaglio le capacità dei giunti di collegamento, in modo da generare un modello il più possibile rappresentativo del reale comportamento strutturale del telaio di cerchiatura.

Riferimenti Normativi

- DM 17.1.2018: Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"
- EN 1993-1-8: Design of steel structures – Design of joints
- EN 1998-1-1: Design of structures for earthquake resistance – General rules, seismic actions and rules for buildings.

Simbologia

b = base, h = altezza, t = spessore, a = altezza di gola della saldatura.

pedici:

b = trave (beam), c = colonna (column), p = plate (piastra di collegamento)

w = anima (web), f = ala (flangia), st = irrigidimento (stiffener)

A_v = area a taglio, W_{pl} = modulo di resistenza plastico

1. INTRODUZIONE

2. GIUNTO BULLONATO

2.1. GIUNTO BULLONATO NON IRRIGIDITO

2.2. GIUNTO BULLONATO IRRIGIDITO

3. GIUNTO SALDATO

4. IMPLEMENTAZIONE NEL SOFTWARE ACM

1. INTRODUZIONE

Il software ACM elabora la curva di capacità del complesso muratura+cerchiatura considerando il diagramma di comportamento dei maschi e del telaio. Per il telaio, la curva di capacità viene elaborata tramite l'analisi dello schema statico, considerando rigidità, resistenza e capacità deformativa dei suoi componenti: i profili (montante = colonna, architrave = trave, e traverso inferiore in caso di telaio chiuso) ed i collegamenti (= giunti).

Fra le possibili ipotesi di lavoro, è molto importante la modalità con cui viene schematizzato il vincolamento interno del nodo colonna/trave. La rotazione del nodo di sommità colonna-trave può essere considerata nulla a priori (lo schema statico del telaio è piano, e si tratta della rotazione del nodo nel piano verticale).

Questa ipotesi può essere applicata quando vi è un buon ammorsamento dell'architrave nella parete, in grado di garantire il **comportamento shear-type** del telaio. In tal caso, il giunto viene classificato trascurando le componenti di base relative alle ali e all'anima della trave e agli irrigidimenti nell'anima della trave.

Fra i risultati dell'elaborazione di calcolo relativa al comportamento della parete in cui è inserito il telaio di cerchiatura, ACM propone il confronto fra il momento resistente dovuto alla reazione della muratura nella zona di ammorsamento della trave, e il momento di progetto di nodo corrispondente allo spostamento corrispondente allo stato limite ultimo della parete.

Il comportamento shear-type è garantito quando il momento resistente è superiore al momento di progetto. Si osservi che il momento resistente non dipende solo dal prolungamento della trave nel muro, ma anche dallo spessore della parete e dalla resistenza a compressione della muratura.

Se l'architrave non è prolungata (o non lo è sufficientemente) nel muro adiacente o la resistenza a compressione della muratura nella zona di ammorsamento è scarsa, il blocco della rotazione al nodo colonna-trave non è garantito, ed è opportuno evitare l'ipotesi shear-type. In tal caso, al nodo si consente la rotazione nel piano verticale, e di conseguenza il giunto viene classificato considerando anche le componenti di base relative alla trave.

Nell'esempio svolto nel presente documento, il giunto viene classificato considerando tutte le possibili componenti, e facendo quindi riferimento ad un'ipotesi di nodi dotati di capacità rotazionale (schema non shear-type).

Si osservi che normalmente nelle strutture intelaiate in acciaio il giunto viene studiato per l'unione fra una colonna e una trave che viene collegata alla colonna, ad es. bullonata attraverso una piastra. Nel caso particolare del telaio di cerchiatura, il nodo si presenta ruotato di 90°, in quanto è la colonna che viene collegata alla trave. La trave attraversa con continuità la sommità della colonna stessa, fino a prolungarsi entro la muratura nella quale si appoggia. Nel caso di un giunto bullonato con piastra, la piastra è saldata in sommità alla colonna, e il collegamento bullonato si realizza attraverso i fori della piastra e quelli predisposti nell'ala della trave. In conseguenza di ciò, le illustrazioni che corredano il testo normativo di riferimento (EuroCodice EN 1993-1-8), riferite al giunto 'trave con piastra/colonna', devono essere pensate ruotate e cioè riferite al giunto 'colonna con piastra/trave'.

Ciò premesso, nel seguito si esamina in dettaglio il comportamento del giunto colonna/trave. Si considerano telai in acciaio, composti da un profilo di tipologia HE o IPE sia per il montante (=colonna) sia per l'architrave (=trave), tra loro non necessariamente uguali. Il giunto presenta

doppia simmetria, a causa della sollecitazione ciclica sismica.

L'analisi del collegamento (giunto) fra colonna e trave consiste nella classificazione del giunto in funzione della rigidità rotazionale e della capacità portante flessionale.

Classificazione in funzione della rigidità rotazionale:

1. rigido. Gli elementi sono collegati con continuità: non sono consentite rotazioni relative tra colonna e trave;
2. semi-rigido. Nello schema statico del telaio, al giunto corrisponde una cerniera con molla rotazionale: il giunto consente una rotazione relativa tra colonna e trave e nello stesso tempo trasmette azione flettente;
3. cerniera. Colonna e trave sono collegati con una cerniera interna che consente rotazioni relative senza trasmettere momento flettente.

Classificazione in funzione della capacità portante flessionale:

- A. giunto a completo ripristino di resistenza. Il momento resistente del giunto è superiore a quello degli elementi collegati; la cerniera plastica si forma nell'elemento strutturale più debole;
- B. giunto a parziale ripristino di resistenza: la cerniera plastica si forma nel giunto. Il giunto deve avere capacità rotazionale sufficiente per consentire lo sviluppo della cerniera plastica;
- C. giunto a cerniera: il nodo di collegamento fra colonna e trave non può essere sede di plasticizzazioni.

L'analisi strutturale del telaio di cerchiatura viene effettuata in **condizioni sismiche**.

La normativa vigente (D.M. 17.1.2018), relativamente ai collegamenti di strutture intelaiate nuove in acciaio sottoposte ad azioni sismiche, prescrive che essi siano progettati in modo da possedere una adeguata sovrarresistenza per consentire la formazione delle cerniere plastiche negli elementi collegati (non necessariamente nelle travi, poiché si tratta di telai monopiano: §7.5.4

D.M.17.1.2018). In particolare, il momento resistente del giunto deve essere superiore a $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot M_{pl,Rd}$, dove $M_{pl,Rd}$ è il momento resistente dell'elemento collegato e γ_{ov} è il fattore di sovrarresistenza del materiale.

Nel caso di comportamento shear-type (nodo di giunto a rotazione nulla), la sovrarresistenza è rispetto alla colonna; se le rotazioni nel nodo sono consentite, la sovrarresistenza è rispetto alla colonna e alla trave. La sovrarresistenza farà sì che la plasticizzazione avvenga nell'elemento collegato prima che nel collegamento (quindi, nel corso dell'analisi elastoplastica del telaio il momento resistente del collegamento non sarà mai raggiunto).

Questa condizione intende conseguire una sufficiente sicurezza nei confronti di azioni di tipo ciclico, quali sono le azioni sismiche. Il giunto, per essere idoneo al progetto antisismico, in base alla classificazione per capacità portante flessionale, dovrà risultare 'a completo ripristino di resistenza': in caso contrario, occorre riprogettarlo.

Aldilà della capacità portante flessionale, la classificazione del giunto in base alla rigidità consentirà di definire la rigidità del giunto, e nel caso semi-rigido sarà possibile modellarlo attraverso una molla rotazionale. La conoscenza del diagramma di comportamento del giunto permetterà di valutare correttamente resistenza e deformazione sviluppate dal telaio.

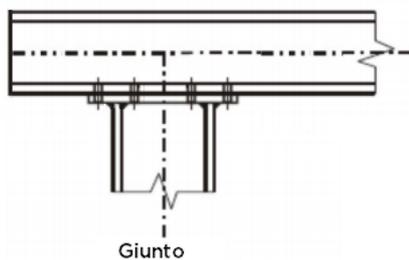
Occorre tuttavia osservare che il telaio di cerchiatura non corrisponde propriamente ad una nuova struttura in acciaio, quanto piuttosto ad una tecnica di intervento su una struttura in muratura entro la quale il telaio è confinato. Adottare la condizione di sovrarresistenza del giunto per i telai di cerchiatura equivale a scartare soluzioni intermedie che nell'ottica degli interventi su strutture esistenti possono essere considerate valide se comportano un miglioramento del comportamento

statico e sismico della struttura nel suo insieme (la parete muraria contenente il telaio di cerchiatura).

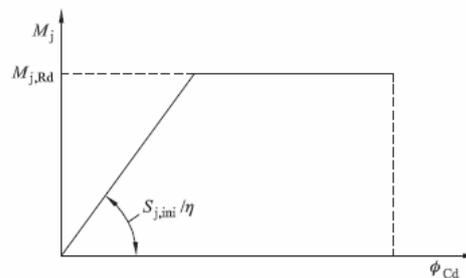
La scelta più appropriata è quindi considerare le strutture di rinforzo per ciò che sono, valutandone gli effetti sull'intervento: condizione indispensabile è ovviamente considerare le reali rigidezze e resistenze dei componenti strutturali, giunto incluso.

ACM consente la definizione della legge di comportamento del giunto attraverso la sua classificazione per rigidezza e per resistenza; fra i risultati dell'elaborazione, viene evidenziata la sua eventuale sovrarresistenza.

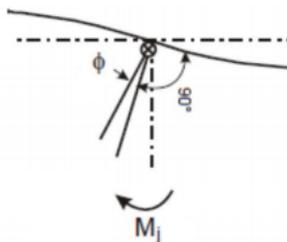
Poiché la curva di capacità del telaio viene definita mediante un'analisi elasto-plastica, sarà possibile adottare per il giunto un comportamento bilineare (elastico-perfettamente plastico), seguendo §5.1.4 EN 1993-1-8.



Giunto



Relazione momento-rotazione di progetto bilineare semplificata



Modellazione:
giunto semi-rigido
con molla rotazionale

ϕ è la rotazione relativa
fra colonna e trave

Coefficienti di modificazione della rigidezza η

Tipologia di connessione	Collegamenti trave-colonna
Saldata	2
Piastre di estremità bullonate	2

Alcune configurazioni strutturali di telai di cerchiatura non sono inclusi nella casistica di giunti classificati da ACM:

- telai in acciaio con colonna e/o trave non avente sezione HE o IPE;
- telai misti in acciaio e c.a.;
- telai in c.a.;
- per murature con grande spessore dove la cerchiatura prevede più telai uguali tra loro affiancati: il collegamento colonna/trave viene studiato facendo riferimento al singolo telaio; è necessario che il numero di colonne affiancate sia uguale al numero di travi affiancate.

Nei casi non inclusi nella classificazione automatica, il comportamento del giunto può essere considerato rigido e a completo ripristino della resistenza; è ovviamente opportuna una verifica a parte sulla soluzione strutturale adottata per il nodo. ACM consente comunque l'inserimento diretto in input di rigidezza iniziale e momento resistente del giunto.

Fin qui per quanto riguarda il giunto di sommità della colonna, alla cui classificazione è dedicato il

presente documento.

Per quanto riguarda il giunto di base, ACM consente le seguenti specifiche:

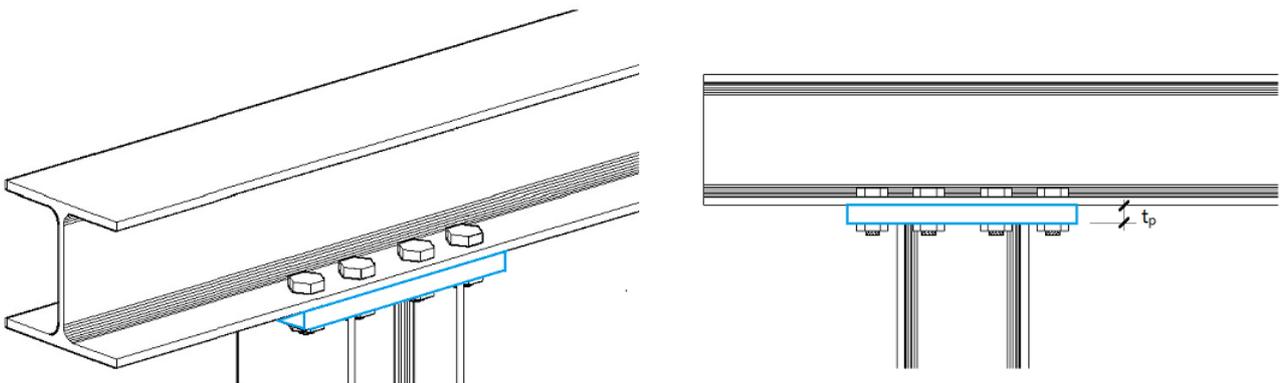
- è possibile assegnare gli stessi valori di rigidezza e resistenza del giunto di sommità (ciò corrisponde al caso in cui la colonna sia collegata al traverso inferiore con identiche modalità con cui viene collegata alla trave);
- in alternativa, si possono specificare direttamente rigidezza e/o resistenza, o qualificare il giunto di base come rigido e/o a completo ripristino, oppure a cerniera.

2. GIUNTO BULLONATO

Nei paragrafi seguenti viene esaminato anzitutto il caso del giunto bullonato non irrigidito, ed in seguito gli effetti di nervature di irrigidimento nella trave e di mensole in sommità della colonna.

2.1. GIUNTO BULLONATO NON IRRIGIDITO

Un primo caso di giunto colonna/trave fra profilati in acciaio HE o IPE è rappresentato in figura seguente, dove si ipotizza il prolungamento della trave nel muro oltre la colonna, e un collegamento realizzato con 4 file di bulloni, senza piatti di irrigidimento nell'anima della trave.



La procedura di classificazione del nodo viene illustrata con riferimento ad un esempio applicativo: colonna e trave sono entrambe di sezione HEB200; il procedimento illustrato è immediatamente generalizzabile anche a casi di profili diversi. L'esempio viene condotto con profili di tipo HE e stessa sezione per colonna e trave, situazione molto frequente nei casi reali.

Dati in input

Acciaio: S235 (stesso materiale per: colonna, trave, piastra):

$$f_{yc} = f_{yb} = f_{yp} = 235 \text{ N/mm}^2, f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

Coefficienti parziali di sicurezza:

resistenza delle sezioni (classe 1,2,3,4): $\gamma_{M0} = 1.05$

instabilità delle membrature: $\gamma_{M1} = 1.05$

resistenza dei bulloni: $\gamma_{M2} = 1.25$

resistenza delle saldature a parziale penetrazione e a cordoni d'angolo: $\gamma_{M2} = 1.25$

Colonna: sezione HEB200, avente le seguenti caratteristiche geometriche e statiche (dimensioni in mm):

base $b_c = 200$, altezza $h_c = 200$, spessore dell'ala $t_{fc} = 15$, spessore dell'anima $t_{wc} = 9$

raggio di raccordo $r_c = 18$, altezza dell'anima $h_{wc} = h_c - 2t_{fc} - 2r_c = 134$

area $A_c = 7810 \text{ mm}^2$

area a taglio $A_{Vc} = A_c - 2b_c t_{fc} + (t_{wc} + 2r_c) * t_{fc} = 7810 - 2 * 200 * 15 + (9 + 2 * 18) * 15 = 2485 \text{ mm}^2$

Sezione di classe 1, modulo di resistenza: plastico: $W_{pl,c} = 642500 \text{ mm}^3$

Momento d'inerzia: $I = 5696 \text{ cm}^4$

Trave: la sezione della trave è uguale a quella della colonna; nelle formule, i valori corrispondenti vengono indicati col pedice b.

Bulloni: M20, classe 8.8.

Altezza testa del bullone: $h_{bull} = 12.5$, spessore dado: $h_{dado} = 16$, spessore rondella: $s_{rond} = 4$

Resistenza a rottura dei bulloni di classe 8.8 (§3.1.1): $f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$

Area resistente di un bullone M20: $A_s = 245 \text{ mm}^2$

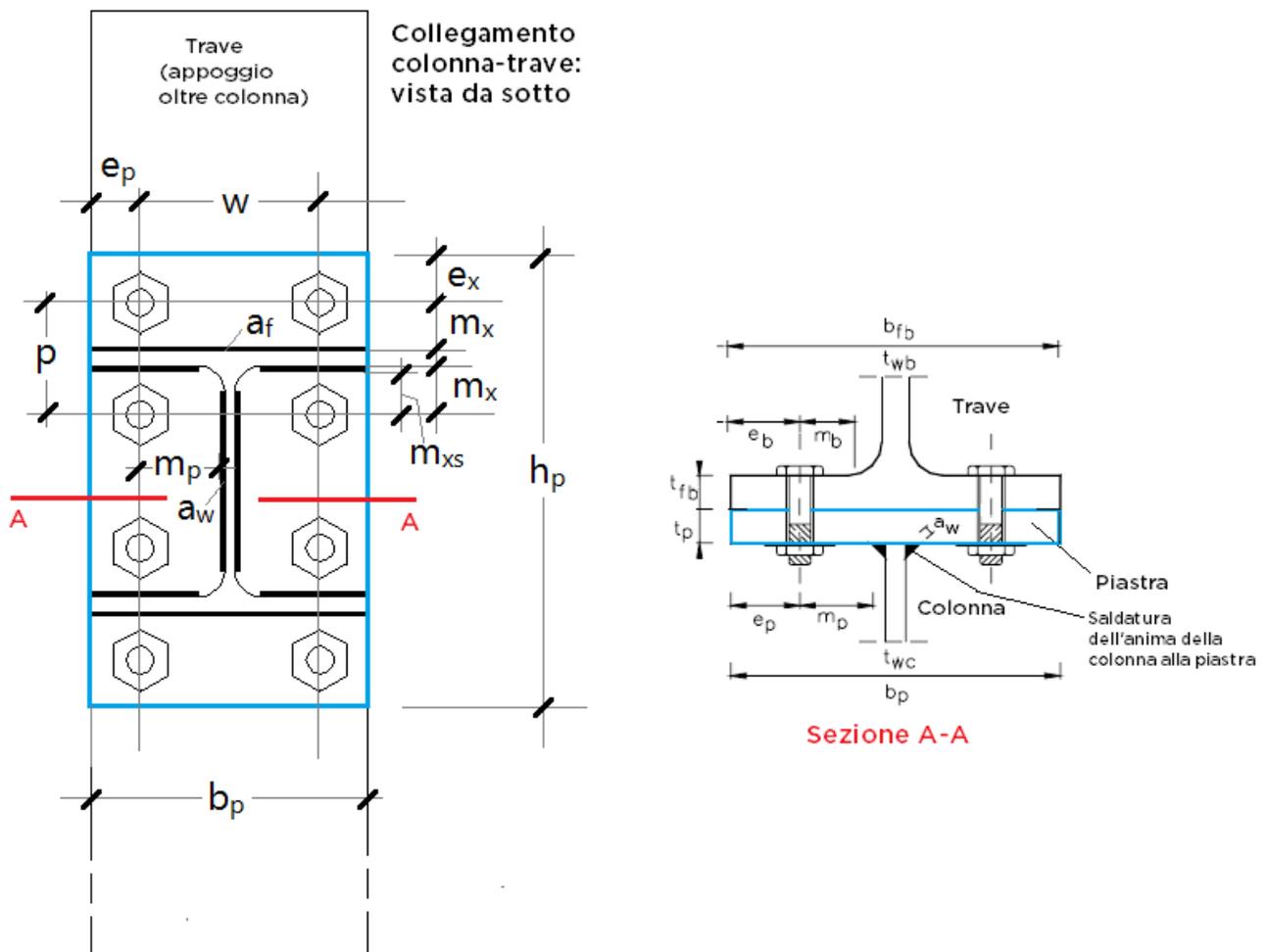
La lunghezza del tratto di allungamento del bullone è data dalla somma di: spessore dell'ala della trave, spessore della piastra, spessore delle due rondelle, metà di (altezza testa del bullone + spessore del dado) (cfr. prospetto 6.11 in §6.3.2, definizione del coefficiente di rigidità k_{10}):

$$L_b = t_{fb} + t_p + 2*s_{rond} + 0.5*(h_{bull} + h_{dado}) = 15+20+2*4+0.5*(12.5+16)=57.25 \text{ mm}$$

Piastra di collegamento: $b_p=200$ (corrispondente alla larghezza di base della sezione della colonna), $h_p=400$, $t_p=20$, $e_p=50$, $e_x=m_x=50$

Saldature: per le altezze di gola si assumono i seguenti valori:

anima della colonna: $a_w = 4 \text{ mm}$, ala della colonna: $a_f = 6 \text{ mm}$



Parametri derivati (dimensioni in mm):

$$p = 2 m_x + t_{fc} = 115,$$

$$m_p = b_p/2 - t_{wc}/2 - e_p - a_w * 0.8 * \sqrt{2} = 200/2 - 9/2 - 50 - 4 * 0.8 * \sqrt{2} = 40.99$$

(cfr. fig. 6.2, §6.2.4.1, EN-1993-1-8),

$$w = b_p - 2e_p = 200 - 2 \cdot 50 = 100,$$

$e_b = b_{fb}/2 - b_p/2 + e_p = 50$. Nel caso in esame: $b_{fb} = b_p$, e quindi $e_b = e_p$; la formula viene esplicitata in quanto ha valore anche per piastra con minore ingombro rispetto all'ala della trave ($b_p < b_{fb}$),

$$m_{xs} = m_x - a_f \cdot 0.8 \cdot \sqrt{2} = 50 - 6 \cdot 0.8 \cdot \sqrt{2} = 43.23,$$

$$m_b = b_{fb}/2 - t_{wb}/2 - e_b - 0.8 \cdot r_b = 200/2 - 9/2 - 50 - 0.8 \cdot 18 = 31.10$$

Verifica del posizionamento dei fori sulla piastra (cfr. prospetto 3.3, §3.5)

I fori devono avere diametro uguale a quello del bullone maggiorato al massimo di 1 mm, per bulloni sino a 20 mm di diametro, e di 1.5 mm per bulloni di diametro maggiore di 20 mm (D.M. 17.1.2018, §4.2.8.1.1). Si ha (misure in mm):

$$e_1 = e_p = 50, e_2 = e_x = 50, p_1 = p = 115, p_2 = w = 100, t = t_p = 20, d_0 = 21$$

$$e_1 > 1.2 d_0 = 1.2 \cdot 21 = 25.2; e_2 > 1.2 d_0 = 25.2$$

$$p_1 > 2.2 d_0 = 46.2$$

$$p_1 < \min\{14t; 200\} = \min\{280; 200\} = 200$$

$$p_2 > 2.4 d_0 = 50.4$$

$$p_2 < \min\{14t; 200\} = 200$$

Verifica del posizionamento dei fori sull'ala della trave:

$$e_1 = e_b = 50, e_2 = e_x = 50, p_1 = p = 115, p_2 = w = 100, t = t_{fb} = 15, d_0 = 21$$

$$e_1 > 1.2 d_0 = 1.2 \cdot 20 = 25.2; e_2 > 1.2 d_0 = 25.2$$

$$p_1 > 2.2 d_0 = 46.2$$

$$p_1 < \min\{14t; 200\} = \min\{210; 200\} = 200$$

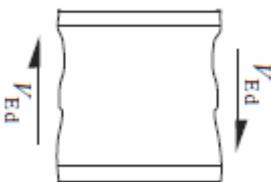
$$p_2 > 2.4 d_0 = 50.4$$

$$p_2 < \min\{14t; 200\} = 200$$

Classificazione del giunto

Nel giunto ci sono 2 file di bulloni tesi; le altre 2 file vengono considerate ai fini della resistenza a taglio. La classificazione del giunto si effettua applicando il metodo per componenti (§6, EN 1993-1-8; nel seguito i riferimenti normativi, se non espressamente indicato, fanno riferimento a EN 1993-1-8). Le componenti di base che devono essere considerate per il giunto in esame sono tratte dal prospetto 6.1, dove sono indicati i paragrafi di riferimento del testo normativo per il calcolo delle grandezze fondamentali, in base alle quali si definisce il comportamento del giunto: rigidità (§6.3.2), resistenza (paragrafi vari) e capacità rotazionale (§6.4.2 e §6.4.3).

Componente 1: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio (resistenza: §6.2.6.1).



Per evitare problemi di imbozzamento del pannello d'anima, la snellezza dell'anima della trave deve soddisfare la condizione: $h_{wb}/t_w \leq 69\varepsilon$

dove: $\varepsilon = \sqrt{(235/f_{yk})} = 1$ (acciaio S235). Si ha: $134/9 = 14.9 < 69$

(condizione soddisfatta per i profilati di comune impiego, tipo HE).

La resistenza a taglio plastica di progetto è data da:

$$V_{wp,Rd} = 0.9 f_{y,wb} A_{vb} / (\sqrt{3} * \gamma_{M0}) = 0.9 * 235 * 2485 * 10^{-3} / (\sqrt{3} * 1.05) = 289 \text{ kN}$$

Per la determinazione del momento resistente di progetto e della rigidità flessionale del giunto, relativamente al pannello d'anima soggetto a taglio, è necessario tenere conto del parametro di trasformazione β (§5.3(7)), che per la tipologia nodale adottata vale 1 (da prospetto 5.4).

La forza resistente di progetto corrispondente alla componente 1 vale dunque:

$$F_{Rd,1} = V_{wp,Rd} / \beta = 289 \text{ kN}$$

Il braccio della coppia z deve essere assunto come specificato in fig. 6.15 (§6.2.7.1): per la connessione bullonata con piastra di estremità estesa e due file di bulloni attive a trazione, z può essere assunto pari alla distanza fra il centro di compressione (posto nel baricentro dell'ala compressa) e la mediana delle due file di bulloni:

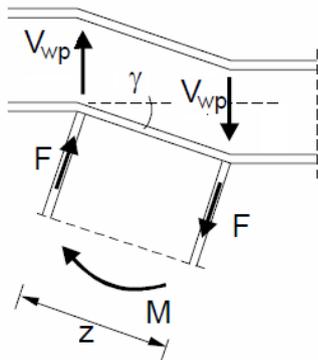
$$z = h_p - [(e_x + m_x) + t_{fc}/2] - [e_x + p/2] = 400 - [(50 + 50) + 15/2] - [50 + 115/2] = 185$$

(in base alla geometria assunta per la piastra, in pratica: $z = h_c - t_{fc} = 200 - 15 = 185$).

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,1} = F_{Rd,1} * z = 289 * 185 * 10^{-3} = 53.47 \text{ kNm}$$

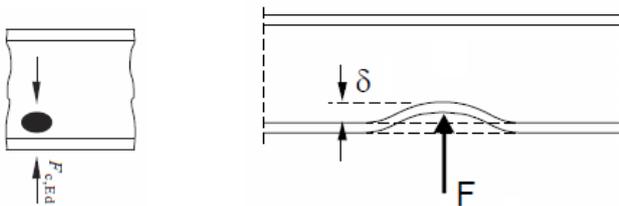
La figura seguente illustra qualitativamente il comportamento a taglio.



Coefficiente di rigidità:

$$k_1 = 0.38 A_{vb} / (\beta z) = 0.38 * 2485 / (1 * 185) = 5.104 \text{ mm}$$

Componente 2: anima della trave sollecitata a compressione trasversale (resistenza: §6.2.6.2).



(F_c = forza di compressione)

La trave non è irrigidita; la resistenza di progetto a compressione trasversale è data da:

$$F_{c,wb,Rd} = \omega k_{wb} b_{eff,c,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0} \leq \omega k_{wb} \rho b_{eff,c,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M1}$$

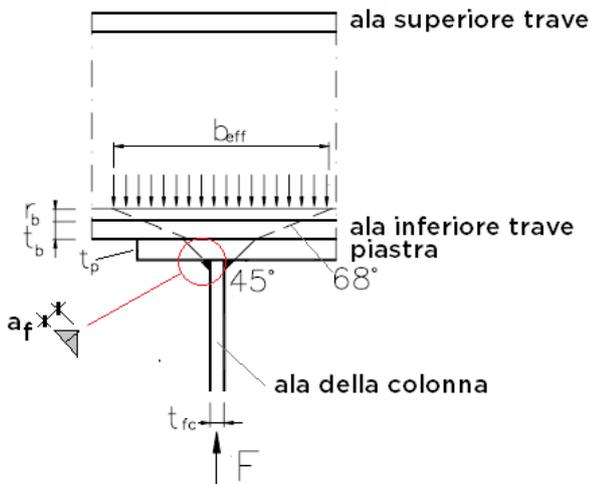
dove:

ω = fattore di riduzione per gli effetti di interazione a taglio nel pannello d'anima della trave. Con parametro di trasformazione $\beta=1$: $\omega = \omega_1$, con:

$$\omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1.3 (b_{eff,c,wb} t_{wb} / A_{vb})^2]}$$

per la connessione bullonata con piastra di estremità, la larghezza efficace a compressione dell'anima della trave è data da:

$$b_{eff,c,wb} = t_{fc} + 2 \sqrt{2} a_f + 5 (t_{fb} + r_b) + 2 t_p = 15 + 2\sqrt{2} * 6 + 5 * (15 + 18) + 2 * 20 = 236.97 \text{ mm}$$



$$\Rightarrow \omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1.3 (236.97 \cdot 9 / 2485)^2]} = 0.715.$$

k_{wb} viene assunto pari a 1.0.

La snellezza del pannello d'anima compresso vale:

$$\lambda_p = 0.932 \sqrt{[b_{\text{eff},c,wb} d_{wb} f_{y,wb} / (E t_{wb}^2)]}$$

dove: $d_{wb} \equiv h_{wb}$ (altezza interna) = 134

$\Rightarrow \lambda_p = 0.932 \sqrt{[236.97 \cdot 134 \cdot 235 / (210000 \cdot 9^2)]} = 0.617 < 0.72$, e quindi: $\rho = 1.0$, essendo ρ il fattore di riduzione per l'instabilità locale dell'anima compressa, definito da:

$\rho = 1.0$ per $\lambda_p \leq 0.72$; $\rho = (\lambda_p - 0.2) / \lambda_p^2$, per $\lambda_p > 0.72$.

Considerando che $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.05$, si ha:

$$F_{Rd,2} = F_{c,wb,Rd} = 0.715 \cdot 1.0 \cdot 236.97 \cdot 9 \cdot 235 \cdot 10^{-3} / 1.05 = 341 \text{ kN}$$

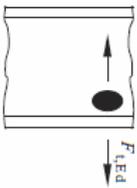
Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,2} = F_{Rd,2} \cdot z = 341 \cdot 185 \cdot 10^{-3} = 63.08 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_2 = 0.7 b_{\text{eff},c,wb} t_{wb} / h_{wb} = 0.7 \cdot 236.97 \cdot 9 / 134 = 11.141 \text{ mm}$$

Componente 3: anima della trave sollecitata a trazione trasversale (resistenza: §6.2.6.3).



(F_t = forza di trazione)

La trave non è irrigidita; la resistenza di progetto a trazione trasversale è data da:

$$F_{t,wb,Rd} = \omega b_{\text{eff},t,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0}$$

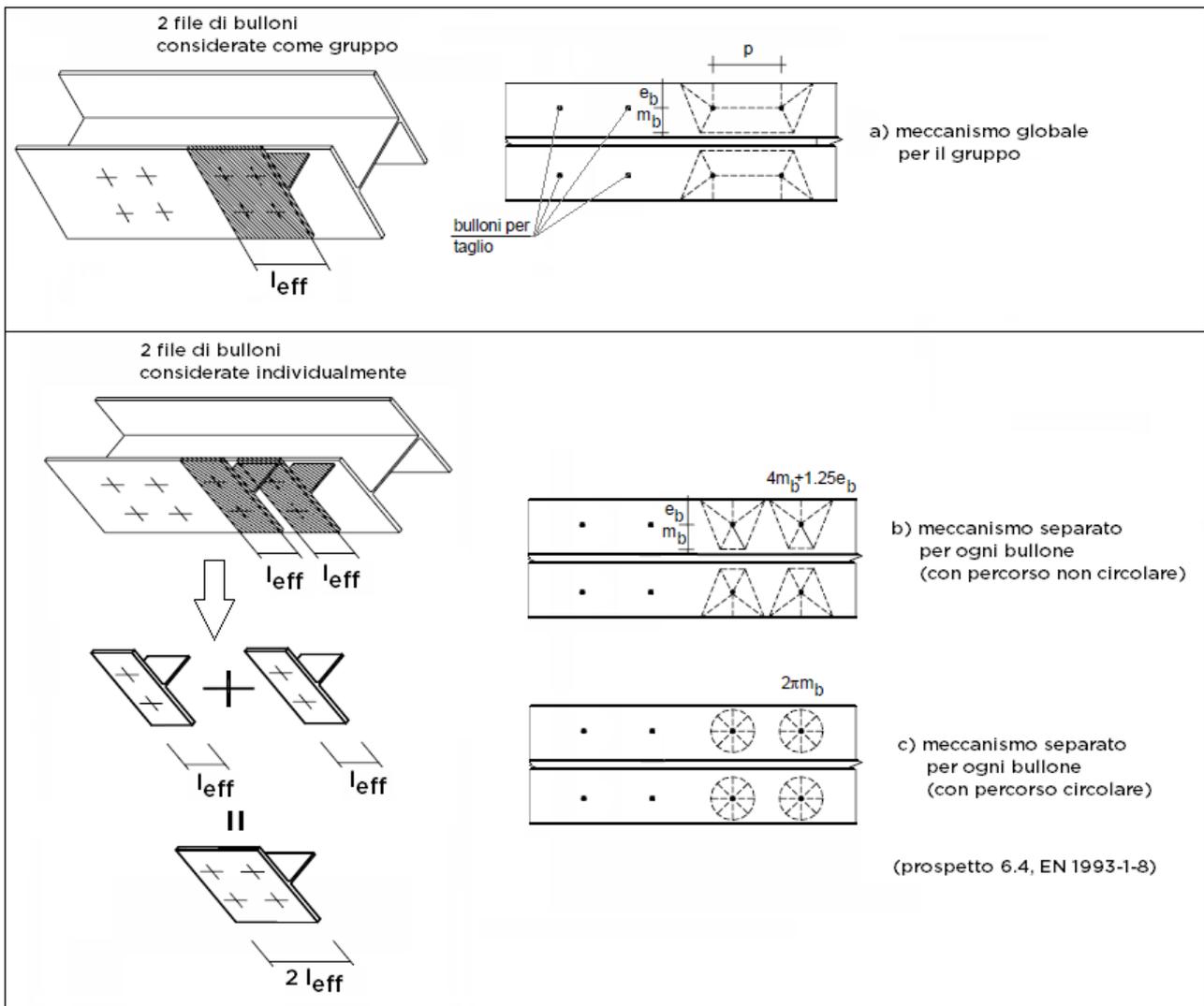
dove:

$$\omega = \omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1.3 (b_{\text{eff},t,wb} t_{wb} / A_{vb})^2]}$$

La larghezza efficace $b_{\text{eff},t,wb}$ dell'anima della trave soggetta a trazione è assunta uguale alla lunghezza efficace (l_{eff}) di un elemento a T (T-stub) equivalente. Poiché sono presenti 2 file di bulloni, l'elemento a T equivalente deve essere modellato sia per ogni fila presa singolarmente, sia per il gruppo di 2 file considerate nel loro insieme.

La lunghezza efficace è la minima fra i possibili meccanismi plastici, rappresentati in figura

seguinte.



Meccanismo separato (lunghezza efficace della singola fila):

$$l_{eff} = \min\{2\pi m_b ; 4m_b + 1.25e_b\} = \min\{2\pi \cdot 31.10 ; 4 \cdot 31.10 + 1.25 \cdot 50\} = \min\{195.4; 186.9\} = 186.9 \text{ mm}$$

Meccanismo di gruppo (lunghezza efficace competente alla singola fila):

$$l_{eff} = 0.5p + 2m_b + 0.625e_b = 0.5 \cdot 115 + 2 \cdot 31.10 + 0.625 \cdot 50 = 150.95 \text{ mm}$$

La lunghezza efficace minore per ciascuna fila di bulloni è quella del meccanismo di gruppo.

Si ha dunque:

$$\omega = 1 / \sqrt{1 + 1.3 (2 \cdot 150.95 \cdot 9 / 2485)^2} = 0.626$$

$$F_{Rd,3} = F_{t,wb,Rd} = \omega b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0} = 0.626 \cdot 2 \cdot 150.95 \cdot 9 \cdot 235 \cdot 10^{-3} / 1.05 = 381 \text{ kN}$$

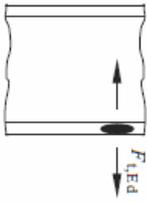
Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,3} = F_{Rd,3} \cdot z = 381 \cdot 185 \cdot 10^{-3} = 70.48 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidità:

$$k_3 = 0.7 b_{eff,t,wb} t_{wb} / h_{wb} = 0.7 \cdot 2 \cdot 150.95 \cdot 9 / 134 = 14.193 \text{ mm}$$

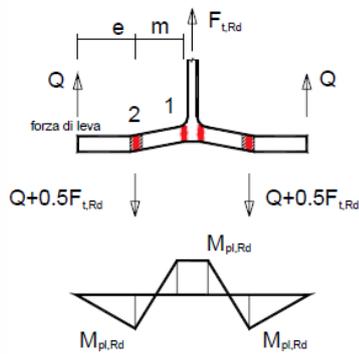
Componente 4: ala della trave sollecitata a flessione (resistenza: §6.2.6.4).



La resistenza di progetto a trazione $F_{t,Rd}$ di un elemento a T viene assunta pari al più piccolo dei valori delle tre seguenti modalità di collasso:

- 1) plasticizzazione completa dell'ala
- 2) rottura dei bulloni con snervamento dell'ala
- 3) rottura dei bulloni

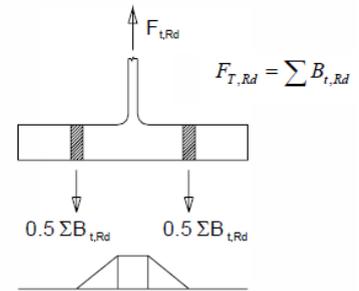
• Modalità 1: meccanismo plastico completo dell'ala



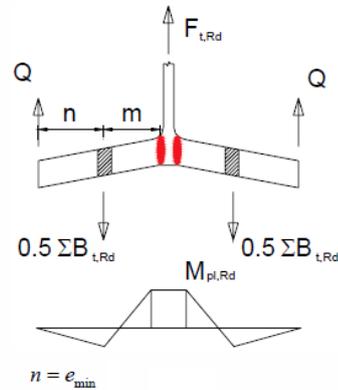
Momento nella cerniera plastica 1:
 $(Q + 0.5F_{t,Rd})m - Q(e + m) = M_{pl,Rd}$ da cui:
 $0.5F_{t,Rd} m - Qe = M_{pl,Rd}$ (a)

Momento nella cerniera plastica 2:
 $Q \cdot e = M_{pl,Rd}$ sostituendo nella (a) si ricava:
 $F_{t,Rd} = \frac{4M_{pl,Rd}}{m}$
 dove: $M_{pl,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$
 con $\sum l_{eff,1}$ = lunghezza efficace per la modalità 1.

• Modalità 3: rottura dei bulloni



• Modalità 2: rottura dei bulloni con snervamento dell'ala



Equilibrio alla traslazione:
 $\sum B_{t,Rd} - 2Q = F_{t,Rd} \rightarrow Q = (\sum B_{t,Rd} - F_{t,Rd}) / 2$
 Momento nella cerniera plastica:
 $0.5 \sum B_{t,Rd} m - Q(n + m) = M_{pl,Rd}$
 Sostituendo l'espressione di Q si ottiene:
 $F_{t,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd} + n \sum B_{t,Rd}}{m + n}$
 dove: $M_{pl,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$
 con $\sum l_{eff,2}$ = lunghezza efficace per la modalità 2

$\sum B_{t,Rd}$ = resistenza totale a trazione di tutti i bulloni dell'elemento a T.

Calcolo della resistenza di progetto per le tre modalità di collasso:

• Modalità di collasso 1: $F_{T,Rd1} = 4 M_{pl,Rd} / m$

dove:

$l_{eff} = 150.95 \cdot 2 = 301.90 \text{ mm}$

$M_{pl,Rd} = 0.25 l_{eff} t_{fb}^2 f_{yb} / \gamma_{M0} = (0.25 \cdot 301.90 \cdot 15^2 \cdot 235 / 1.05) \cdot 10^{-6} = 3.801 \text{ kNm}$

$m = m_b = 31.10 \text{ mm}$

$\Rightarrow F_{T,Rd1} = 4 \cdot 3.801 / (31.10 \cdot 10^{-3}) = 488 \text{ kN}$

• Modalità di collasso 2: $F_{T,Rd2} = (2 M_{pl,Rd} + n \Sigma B_{t,Rd}) / (m + n)$

dove:

$$n = e_{\min} = \min\{e_p; e_b\} = 50 \text{ mm}$$

$$B_{t,Rd} = 0.9 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} = 0.9 \cdot 800 \cdot 245 / 1.25 = 141120 \text{ N} = 141.12 \text{ kN}$$

$$\Sigma B_{t,Rd} = 4 B_{t,Rd} = 4 \cdot 141.12 = 564.48 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd2} = (2 \cdot 3.801 + 50 \cdot 10^{-3} \cdot 564.48) / [(31.10 + 50) \cdot 10^{-3}] = 441.75 \text{ kN}$$

• Modalità di collasso 3: $F_{T,Rd3} = \Sigma B_{t,Rd} = 564.48 \text{ kN}$

La resistenza dell'ala della trave a flessione è governata dalla modalità di collasso 2:

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,Rd1}; F_{T,Rd2}; F_{T,Rd3}\} = F_{T,Rd2} = 441.75 \text{ kN}$$

Calcolo della resistenza della singola fila esterna:

• Modalità di collasso 1: $F_{T,Rd1} = 4 M_{pl,Rd} / m$

$$l_{\text{eff}} = 186.9 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Rd} = 0.25 l_{\text{eff}} t_{fb}^2 f_{yb} / \gamma_{M0} = (0.25 \cdot 186.90 \cdot 15^2 \cdot 235 / 1.05) \cdot 10^{-6} = 2.353 \text{ kNm}$$

$$m = m_b = 31.10 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd1} = 4 \cdot 2.353 / (31.10 \cdot 10^{-3}) = 303 \text{ kN}$$

• Modalità di collasso 2: $F_{T,Rd2} = (2 M_{pl,Rd} + n \Sigma B_{t,Rd}) / (m + n)$

dove:

$$n = 50 \text{ mm}$$

$$B_{t,Rd} = 141.12 \text{ kN}$$

$$\Sigma B_{t,Rd} = 2 B_{t,Rd} = 2 \cdot 141.12 = 282.24 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd2} = (2 \cdot 2.353 + 50 \cdot 10^{-3} \cdot 282.24) / [(31.10 + 50) \cdot 10^{-3}] = 232.03 \text{ kN}$$

• Modalità di collasso 3: $F_{T,Rd3} = \Sigma B_{t,Rd} = 282.24 \text{ kN}$

La resistenza della fila esterna è governata dalla modalità di collasso 2.

Il momento resistente di progetto si calcola sfruttando la resistenza massima della fila esterna di bulloni, che ha il braccio maggiore, e attribuendo alla fila interna la resistenza rimanente.

Alla bullonatura della fila esterna si attribuisce la resistenza:

$$F_{T,fb,Rd}^{\text{est}} = 232.03 \text{ kN}$$

e alla bullonatura interna si attribuisce la differenza con la resistenza di gruppo:

$$F_{T,fb,Rd}^{\text{int}} = 441.75 - 232.03 = 209.72 \text{ kN}$$

Il momento resistente è:

$$M_{Rd,4} = F_{T,fb,Rd}^{\text{est}} \cdot z_{\text{est}} + F_{T,fb,Rd}^{\text{int}} \cdot z_{\text{int}}$$

dove:

$$z_{\text{est}} = h_c - t_{fc}/2 + m_x = 200 - 15/2 + 50 = 242.5 \text{ mm}$$

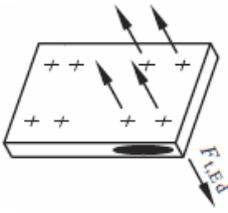
$$z_{\text{int}} = z_{\text{est}} - p = 242.5 - 115 = 127.5 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow M_{Rd,4} = 232.03 \cdot 242.5 \cdot 10^{-3} + 209.72 \cdot 127.5 \cdot 10^{-3} = 83.01 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidità:

$$k_4 = 0.9 l_{\text{eff}} t_{fb}^3 / m^3 = 0.9 \cdot 301.90 \cdot 15^3 / 31.10^3 = 30.49 \text{ mm}$$

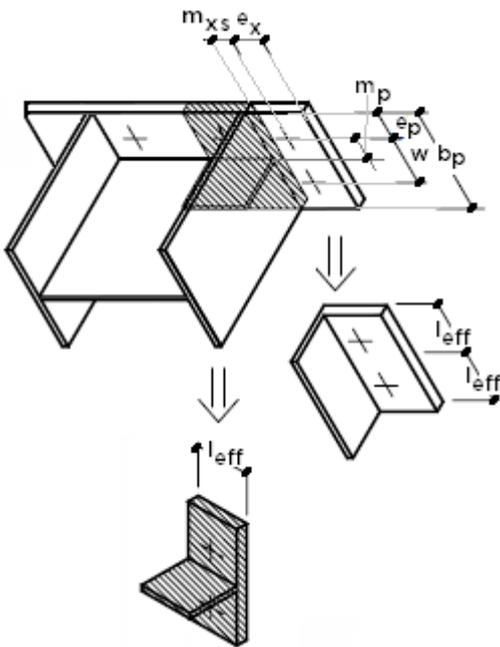
Componente 5: piastra sollecitata a flessione (resistenza: §6.2.6.5).



La piastra presenta valori diversi della lunghezza efficace dell'elemento a T equivalente per le due file di bulloni, in quanto la fila interna risente dell'irrigidimento dell'anima della colonna e quindi ha resistenza e rigidità superiori rispetto alla fila esterna.

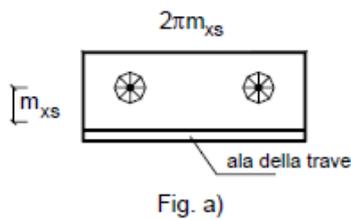
La parte di piastra estesa oltre la colonna (con la fila esterna di bulloni) e la porzione compresa fra le ali della colonna (con la fila interna di bulloni) sono modellate come due T-stub distinti.

Per la fila esterna, la lunghezza efficace è misurata in direzione parallela all'ala della colonna (le distanze utilizzate nelle formule sono e_x e m_{xs}); per la fila interna, la lunghezza efficace è misurata in direzione ortogonale, parallela all'anima della colonna (le distanze utilizzate nelle formule sono e_p e m_p).

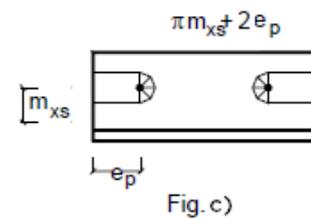
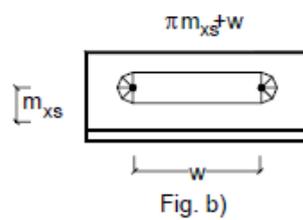


Per il T-stub relativo alla fila esterna, le lunghezze efficaci corrispondenti alle diverse ipotesi sui percorsi di snervamento sono riportate in figura seguente.

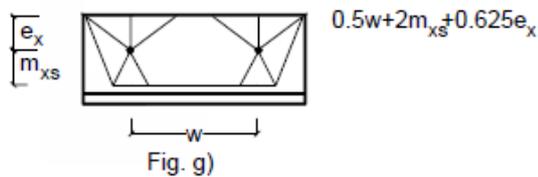
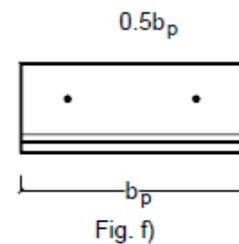
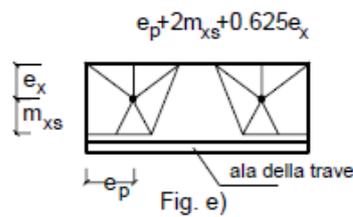
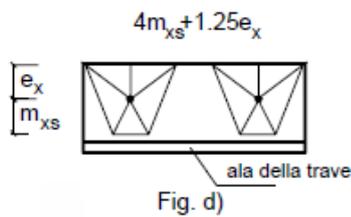
Lunghezze efficaci



Flangia d'estremità: fila esterna linea di snervamento circolare



altre linee di snervamento



- a) $l_{eff} = 2\pi m_{xs} = 2\pi \cdot 43.23 = 271.62 \text{ mm}$
 b) $l_{eff} = \pi m_{xs} + w = \pi \cdot 43.23 + 100 = 235.81 \text{ mm}$
 c) $l_{eff} = \pi m_{xs} + 2e_p = \pi \cdot 43.23 + 2 \cdot 50 = 235.81 \text{ mm}$
 d) $l_{eff} = 4m_{xs} + 1.25e_x = 4 \cdot 43.23 + 1.25 \cdot 50 = 235.42 \text{ mm}$
 e) $l_{eff} = e_p + 2m_{xs} + 0.625e_x = 50 + 2 \cdot 43.23 + 0.625 \cdot 50 = 167.71 \text{ mm}$
 f) $l_{eff} = 0.5 b_p = 0.5 \cdot 200 = 100 \text{ mm}$
 g) $l_{eff} = 0.5 w + 2m_{xs} + 0.625e_x = 0.5 \cdot 100 + 2 \cdot 43.23 + 0.625 \cdot 50 = 167.71 \text{ mm}$
 $\Rightarrow l_{eff} = 100 \text{ mm}$

Per il T-stub relativo alla fila interna, la lunghezza efficace è data dal minimo fra il valore corrispondente al percorso di snervamento circolare e ad altri tipi di percorso:

$$l_{eff} = \min\{ 2\pi m_p ; \alpha m_p \}$$

dove α viene ricavato dal diagramma riportato in figura seguente (§6.2.6.5), ed esprime il contributo di rigidità fornito dall'anima della colonna al T-stub mediante i parametri λ_1 e λ_2 così definiti:

$$\lambda_1 = m_p / (m_p + e_p) = 40.99 / (40.99 + 50) = 0.450$$

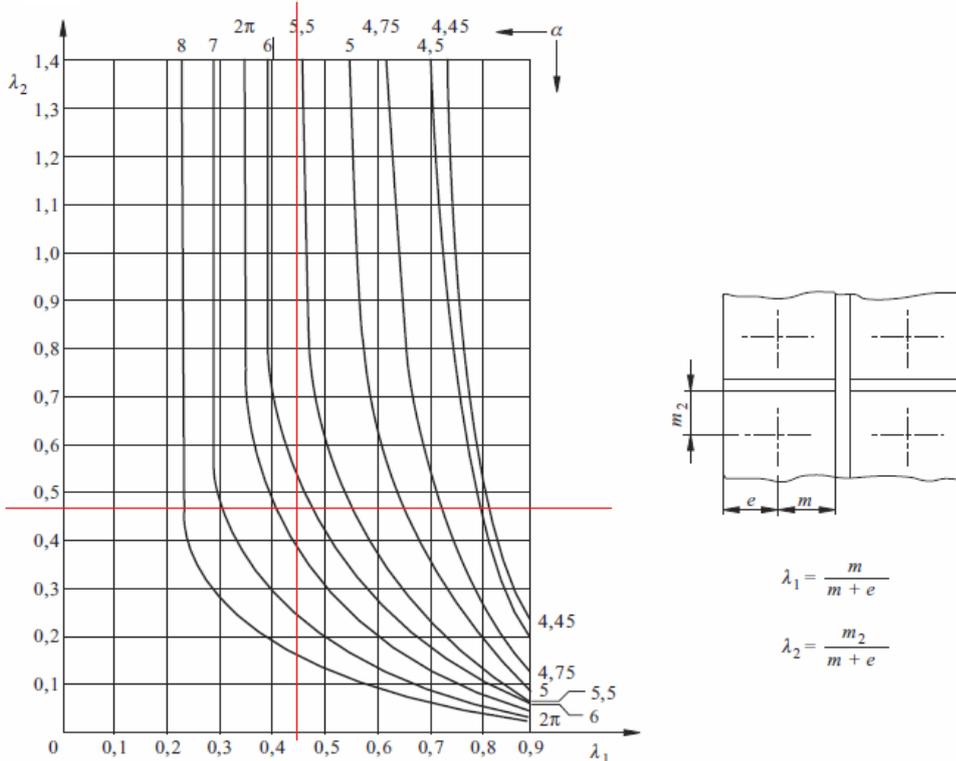
$$\lambda_2 = m_{xs} / (m_p + e_p) = 43.23 / (40.99 + 50) = 0.475$$

(valori riportati in colore rosso nel diagramma).

Risulta: $\alpha = 6.14$

$$\Rightarrow l_{eff} = \min\{ 2\pi \cdot 40.99 ; 6.14 \cdot 40.99 \} = 251.68 \text{ mm}$$

Valori di α per flange irrigidite di colonne e piastre di estremità



Si esegue il calcolo della resistenza a flessione della piastra in corrispondenza delle file di bulloni esterna e interna.

Calcolo della resistenza della fila esterna:

$$l_{\text{eff}} = 100 \text{ mm}$$

- Modalità di collasso 1: $F_{T,Rd1} = 4 M_{pl,Rd} / m$

$$M_{pl,Rd} = 0.25 l_{\text{eff}} t_p^2 f_{yp} / \gamma_{M0} = (0.25 \cdot 100 \cdot 20^2 \cdot 235 / 1.05) \cdot 10^{-6} = 2.238 \text{ kNm}$$

$$m = m_{xs} = 43.23 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd1} = 4 \cdot 2.238 / (43.23 \cdot 10^{-3}) = 207 \text{ kN}$$

- Modalità di collasso 2: $F_{T,Rd2} = (2 M_{pl,Rd} + n \Sigma B_{t,Rd}) / (m + n)$

dove:

$$n = e_x = 50 \text{ mm}$$

$$B_{t,Rd} = 141.12 \text{ kN}$$

$$\Sigma B_{t,Rd} = 2 B_{t,Rd} = 2 \cdot 141.12 = 282.24 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd2} = (2 \cdot 2.238 + 50 \cdot 10^{-3} \cdot 282.24) / [(43.23 + 50) \cdot 10^{-3}] = 199.38 \text{ kN}$$

- Modalità di collasso 3: $F_{T,Rd3} = \Sigma B_{t,Rd} = 282.24 \text{ kN}$

Pertanto, la resistenza della parte esterna della piastra è governata dalla modalità di collasso 2:

$$F_{T,p,Rd}^{\text{est}} = 199.38 \text{ kN}$$

Calcolo della resistenza della fila interna:

$$l_{\text{eff}} = 251.68 \text{ mm}$$

- Modalità di collasso 1: $F_{T,Rd1} = 4 M_{pl,Rd} / m$

$$M_{pl,Rd} = 0.25 l_{\text{eff}} t_p^2 f_{yp} / \gamma_{M0} = (0.25 \cdot 251.68 \cdot 20^2 \cdot 235 / 1.05) \cdot 10^{-6} = 5.632 \text{ kNm}$$

$$m = m_p = 40.99 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd1} = 4 \cdot 5.632 / (40.99 \cdot 10^{-3}) = 549 \text{ kN}$$

- Modalità di collasso 2: $F_{T,Rd2} = (2 M_{pl,Rd} + n \Sigma B_{t,Rd}) / (m + n)$

dove:

$$n = e_p = 50 \text{ mm}$$

$$B_{t,Rd} = 141.12 \text{ kN}$$

$$\Sigma B_{t,Rd} = 2 B_{t,Rd} = 2 * 141.12 = 282.24 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{T,Rd2} = (2 * 5.632 + 50 * 10^{-3} * 282.24) / [(40.99 + 50) * 10^{-3}] = 278.89 \text{ kN}$$

- Modalità di collasso 3: $F_{T,Rd3} = \Sigma B_{t,Rd} = 282.24 \text{ kN}$

Pertanto, la resistenza della zona interna della piastra è governata dalla modalità di collasso 2:

$$F_{T,p,Rd}^{int} = 278.89 \text{ kN}$$

Essendo:

$$M_{Rd,5} = F_{T,p,Rd}^{est} * z_{est} + F_{T,p,Rd}^{int} * z_{int}$$

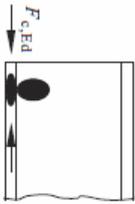
dove: $z_{est} = 242.5 \text{ mm}$, $z_{int} = 127.5 \text{ mm}$, si ha:

$$M_{Rd,5} = 199.38 * 242.5 * 10^{-3} + 278.89 * 127.5 * 10^{-3} = 48.35 + 35.56 = 83.91 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_5 = 0.9 I_{eff} t_p^3 / m_p^3 = 0.9 * 100 * 20^3 / 40.99^3 = 10.45 \text{ mm}$$

Componente 7: anima ed ala della colonna sollecitate a compressione (resistenza: §6.2.6.7).



$$F_{Rd,7} = M_{c,Rd} / (h_c - t_{fc})$$

con $M_{c,Rd}$ momento resistente della sezione trasversale della colonna (sezione di classe 1) ($M_{pl,c,Rd}$).

$$M_{pl,c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} = 642500 * 235 * 10^{-6} / 1.05 = 143.79 \text{ kNm}$$

$$\Rightarrow F_{Rd,7} = 143.79 / [(200 - 15) * 10^{-3}] = 777.24 \text{ kN}$$

Braccio della coppia: $z = 185 \text{ mm}$

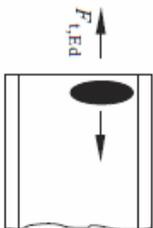
Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,7} = F_{Rd,7} * z = 777.24 * 185 * 10^{-3} = 143.78 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_7 = \infty$$

Componente 8: anima della colonna sollecitata a trazione (resistenza: §6.2.6.8).



$$F_{Rd,8} = F_{t,wc,Rd} = b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc} / \gamma_{M0}$$

dove la larghezza efficace dell'anima della colonna soggetta a trazione $b_{eff,t,wc}$ viene assunta pari alla lunghezza efficace del T-stub equivalente con il quale si è schematizzata la piastra inflessa, considerando la fila di bulloni interna. Si ha dunque:

$$b_{eff,t,wc} = 251.68 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F_{Rd,8} = 251.68 \cdot 9 \cdot 235 \cdot 10^{-3} / 1.05 = 506.96 \text{ kN}$$

Braccio della coppia: $z = 185 \text{ mm}$

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,8} = F_{Rd,8} \cdot z = 506.96 \cdot 185 \cdot 10^{-3} = 93.79 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_8 = \infty$$

Componente 10: bulloni sollecitati a trazione

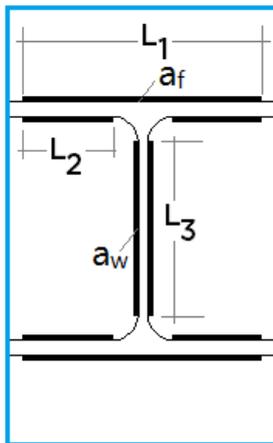


La resistenza è già stata calcolata studiando il modo di collasso n°3 per il componente 4 (ala della trave sollecitata a flessione) e per il componente 5 (piastra sollecitata a flessione).

Coefficiente di rigidezza:

$$k_{10} = 1.6 A_s / L_b = 1.6 \cdot 245 / 57.25 = 6.85 \text{ mm}$$

Componente 19: saldatura colonna - piastra



Il calcolo viene condotto, a favore di sicurezza, assumendo che l'azione di taglio venga assorbita dai cordoni d'anima (di lunghezza L_3), mentre la sollecitazione di flessione viene assorbita dai cordoni di saldatura sulle ali (di lunghezze L_1 e L_2).

$$L_1 = b_c - 2a_f = 200 - 2 \cdot 6 = 188 \text{ mm}$$

$$2 \cdot L_2 = L_1 - 2r_c - 2a_f - t_{wc} = 188 - 2 \cdot 18 - 2 \cdot 6 - 9 = 131 \text{ mm}$$

$$L_3 = h_c - 2r_c - 2a_w - 2t_{fc} = 200 - 2 \cdot 18 - 2 \cdot 4 - 2 \cdot 15 = 126 \text{ mm}$$

La lunghezza complessiva delle saldature competenti ad un'ala è data da:

$$L_{eff,f} = L_1 + 2 \cdot L_2$$

Sotto la sollecitazione flessionale, sui cordoni di un'ala agisce la forza assiale (verticale) data dalla coppia di forze corrispondenti al momento applicato (che nel presente contesto coincide con il momento resistente):

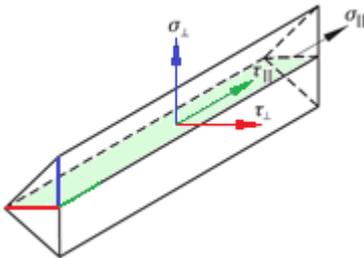
$$N_{f,Rd} = M_{Rd} / (h_c - t_{fc})$$

dove $(h_c - t_{fc})$ è il braccio della coppia di forze agenti sulle due ali.

Per le verifiche delle unioni con saldature d'angolo, è possibile riferirsi alternativamente alla sezione di gola nella effettiva posizione o in posizione ribaltata. Le tensioni indotte da $N_{f,Rd}$ devono quindi essere ricondotte al piano considerato.

Per la **sezione di gola nella effettiva posizione**, che risulta orientata a 45° rispetto al piano orizzontale, la forza assiale $N_{f,Rd}$ genera tensione normale σ_\perp e tensione tangenziale τ_\perp , come illustrato nell'immagine seguente (il piano della sezione di gola, inclinato a 45° , è evidenziato in colore verde), espresse dalle seguenti relazioni, con identico modulo:

$$\sigma_\perp = [N_{f,Rd} / (a_f * L_{eff,f})] * (\sqrt{2} / 2), \quad \tau_\perp = [N_{f,Rd} / (a_f * L_{eff,f})] * (\sqrt{2} / 2)$$



Secondo la (4.1) di EC3-p.8: EN1993-1-8:2005, §4.5.3.2(6), o equivalentemente la [4.2.81] del D.M.17.1.2018, §4.2.8.2.4, la resistenza di progetto della saldatura a cordone d'angolo risulta adeguata se sono soddisfatte entrambe le seguenti relazioni:

$$(i) \sqrt{(\sigma_\perp^2 + 3 * \tau_\perp^2)} \leq f_{tk} / (\beta_w \gamma_{M2})$$

$$\text{e considerando che: } |\tau_\perp| = |\sigma_\perp|, \text{ segue: } \sigma_\perp \leq f_{tk} / (2 * \beta_w \gamma_{M2})$$

$$(ii) \sigma_\perp \leq 0.9 * f_{tk} / \gamma_{M2}$$

dove: β_w = fattore di correlazione per le saldature a cordone d'angolo (cfr. prospetto 4.1 in §4.5.3.2 in EC3-8, coincidente con i valori indicati in §4.2.8.2.4 del D.M.17.1.2018). Per l'acciaio S235: $\beta_w = 0.8$; $\gamma_{M2} = 1.25$.

Dall'espressione che lega σ_\perp alla forza assiale, si ricava:

$$N_{f,Rd} = \sigma_\perp * a_f * L_{eff,f} * \sqrt{2}$$

e pertanto la forza assiale resistente è data da:

$$N_{f,Rd} = a_f * L_{eff,f} * \sqrt{2} * \min \{ f_{tk} / (2 * \beta_w \gamma_{M2}); 0.9 * f_{tk} / \gamma_{M2} \}$$

Il momento resistente della saldatura è pari a:

$$M_{Rd} = N_{f,Rd} * (h_c - t_{fc})$$

Per il caso in esame si ha:

$$M_{Rd} = 6 * (188 + 131) * \sqrt{2} * \min \{ 360 / (2 * 0.8 * 1.25); 0.9 * 360 / 1.25 \} * (200 - 15) = 90.14 * 10^6 \text{ Nmm} = 90.14 \text{ kNm}$$

Secondo §4.2.8.2.4, per la verifica appena svolta sarebbe possibile applicare un metodo semplificato, qui omissso.

In alternativa alla sezione di gola nella effettiva posizione, secondo il D.M.17.1.2018 è possibile svolgere la verifica con riferimento alla **sezione di gola in posizione ribaltata**. In tal caso, il cordone di saldatura è soggetto alla sola tensione normale n_\perp e la verifica di sicurezza, in assenza di tensioni tangenziali, si riduce al confronto:

$$n_\perp \leq \beta_1 * f_{yk}$$

dove per acciaio S235: $\beta_1 = 0.85$. Poiché:

$$N_{f,Rd} = n_\perp * a_f * L_{eff,f}, \text{ la forza assiale resistente è data da:}$$

$$N_{f,Rd} = \beta_1 * f_{yk} * a_f * L_{eff,f}, \text{ da cui segue } M_{Rd}.$$

Nel caso in esame:

$$M_{Rd} = 0.85 * 235 * 6 * (188 + 131) * (200 - 15) = 70.73 * 10^6 \text{ Nmm} = 70.73 \text{ kNm}$$

Confrontando le due verifiche per la sezione di gola in posizione effettiva ed in posizione ribaltata, quella in posizione ribaltata risulta più penalizzante. Tuttavia, il D.M.17.1.2018 pone le due modalità

di verifica come alternative, ed in definitiva è possibile assumere per la componente 19 un momento resistente pari a:

$$M_{Rd,19} = 90.14 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_{19} = \infty$$

Riepilogo del contributo dei singoli componenti a resistenza e rigidezza:

1*: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio:

$$M_{Rd,1} = 53.47 \text{ kNm}, k_1 = 5.104 \text{ mm}$$

2*: anima della trave sollecitata a compressione trasversale:

$$M_{Rd,2} = 63.08 \text{ kNm}, k_2 = 11.141 \text{ mm}$$

3*: anima della trave sollecitata a trazione trasversale:

$$M_{Rd,3} = 70.48 \text{ kNm}, k_3 = 14.193 \text{ mm}$$

4*: ala della trave sollecitata a flessione:

$$M_{Rd,4} = 83.01 \text{ kNm}, k_4 = 30.49 \text{ mm}$$

5: piastra sollecitata a flessione

$$M_{Rd,5} = 83.91 \text{ kNm}, k_5 = 10.45 \text{ mm}$$

7: anima ed ala della colonna sollecitate a compressione

$$M_{Rd,7} = 143.78 \text{ kNm}, k_7 = \infty$$

8: anima della colonna sollecitata a trazione

$$M_{Rd,8} = 93.79 \text{ kNm}, k_8 = \infty$$

10: bulloni sollecitati a trazione

$$k_{10} = 6.85 \text{ mm}$$

19: saldatura colonna - piastra

$$M_{Rd,19} = 90.14 \text{ kNm}, k_{19} = \infty$$

(* componenti ignorate nel caso di ipotesi shear-type)

La **resistenza del giunto bullonato, non irrigidito**, è governata dal pannello d'anima della trave sollecitato a taglio, cui corrisponde il minimo momento resistente:

$$M_{j,Rd} = 53.47 \text{ kNm.}$$

Il momento resistente del giunto è più basso del momento resistente degli elementi collegati (colonna e trave hanno stessa sezione e quindi stesso momento resistente):

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} * f_y / \gamma_{M0} = 642500 * 235 * 10^{-6} / 1.05 = 143.79 \text{ kNm}$$

Peraltro, la condizione sismica di sovrarresistenza da applicare a strutture nuove intelaiate in acciaio richiederebbe (D.M.17.1.2018: §7.5.4):

$$M_{j,Rd} \geq 1.1 \gamma_{ov} M_{pl,Rd} = 1.1 * 1.25 * 143.79 = 197.71 \text{ kNm}$$

Classificazione del giunto in base alla resistenza

Il giunto è a parziale ripristino di resistenza. Infatti:

$$0.25 M_{pl,Rd} = 37.75 \leq M_{j,Rd} = 53.47 \leq M_{pl,Rd} = 143.79 \text{ kNm}$$

Classificazione del giunto in base alla rigidezza

La rigidezza del giunto vale:

$$S_{j,ini} = E z^2 / [\sum (1/k_i)] = 210000 * 185^2 * 10^{-6} / (1/5.104 + 1/11.141 + 1/14.193 + 1/30.49 + 1/10.45 + 1/6.85) = 11397 \text{ kNm/rad}$$

Limiti di riferimento per la classificazione:

$$(0.5 E I_c / L_c) \text{ e } (k_c E I_c / L_c)$$

dove: I_c è il momento d'inerzia e L_c è la luce dell'elemento collegato (nel caso del giunto di cerchiatura l'elemento è la colonna).

Il coefficiente k_c assume il valore 8 per telai controventati e 25 per telai non controventati. Nel caso del telaio di cerchiatura, la funzione dei maschi murari agenti in parallelo al telaio di cerchiatura può essere assimilata ad un controventamento del telaio stesso, e quindi si sceglie: $k_c=8$.

Supponiamo che la luce della colonna sia 2.20 m. Si ha:

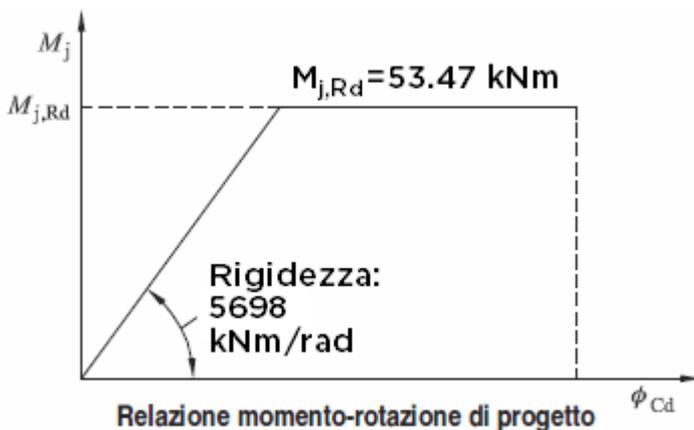
$$E I_c / L_c = (210000 * 5696 * 10^4 / 2200) * 10^{-6} = 5437 \text{ kNm/rad}$$

Il giunto è semi-rigido. Infatti:

$$0.5 * 5437 = 2719 \leq S_{j,ini} = 11397 \leq 8 * 5437 = 43496 \text{ kNm/rad}$$

Ai fini del diagramma di comportamento bilineare semplificato, la rigidezza viene assunta pari a:

$$S_{j,ini} / \eta = 11397 / 2 = 5698 \text{ kNm/rad}$$



essendo η il coefficiente di modificazione della rigidezza, pari a 2 per le diverse modalità di collegamento colonna-trave, saldato o bullonato (per la figura: cfr. fig. 5.2 di EC3-p.8: EN1993-1-8:2005, §5.1.4).

In definitiva, il giunto è classificabile come **semi-rigido** in base al valore di rigidezza e **a parziale ripristino** in base al valore di resistenza.

Per quanto riguarda la **capacità rotazionale**, secondo §6.4.2 poiché il momento resistente di progetto è governato dalla resistenza di progetto del pannello d'anima della trave soggetto a taglio, il giunto può ritenersi dotato di adeguata capacità rotazionale a condizione che:

$$h_{wb} / t_w \leq 69\epsilon, \text{ condizione già controllata durante l'esame del componente 1.}$$

Il valore della capacità rotazionale di un giunto bullonato può essere determinato mediante prove sperimentali o appropriati modelli di calcolo; ai fini dell'analisi strutturale del complesso muratura-telaio di cerchiatura dove la plasticizzazione avvenga nel giunto, si ritiene che la capacità rotazionale, se il giunto ne è dotato, possa esplicarsi fino al raggiungimento dello spostamento ultimo del telaio, cioè del massimo spostamento orizzontale consentito ai nodi di sommità delle colonne, determinato dalla duttilità del telaio.

L'analisi del giunto viene completata dal calcolo della **resistenza a taglio**, distinta per varie modalità di collasso (cfr. prospetto 3.4, §3.5)

- Resistenza a taglio per piano di taglio.

Resistenza a taglio del singolo bullone:

$$F_{v,Rd} = \alpha_v f_{ub} A_s / \gamma_{M2} = 0.6 * 800 * 245 * 10^{-3} / 1.25 = 94.08 \text{ kN}$$

Resistenza a taglio del gruppo (due file):

$$V_{v,Rd1} = 4 F_{v,Rd} = 4 \cdot 94.08 = 376.32 \text{ kN}$$

- Resistenza a rifollamento dei fori della piastra.

$$k_1 = \min\{ 2.8 e_2/d_0 - 1.7 ; 1.45 p_2/d_0 - 1.7 ; 2.5\}$$

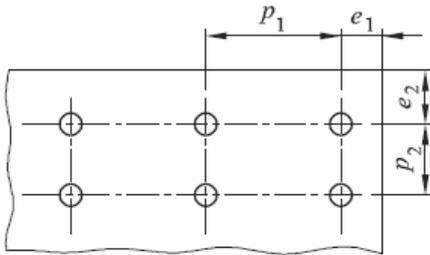
dove: $e_2 = e_p = 50$; $p_2 = w = 100$; $d_0 = 21$; pertanto:

$$k_1 = \min\{ 2.8 \cdot 50/21 - 1.7 = 4.96 ; 1.45 \cdot 100/21 - 1.7 = 5.20 ; 2.5\} = 2.5;$$

$$\alpha_b = \min\{ 1.0 ; f_{ub}/f_u ; e_1/(3d_0) ; p_1/(3d_0) - 1/4\}$$

dove: $e_1 = e_x = 50$; $p_1 = p = 115$, pertanto:

$$\alpha_b = \min\{ 1.0 ; 800/360 = 2.22 ; 50/(3 \cdot 21) = 0.79 ; 115/(3 \cdot 21) - 0.25 = 1.57\} = 0.79.$$



a)

Resistenza a rifollamento del singolo foro:

$$F_{b,Rd} = k_1 \alpha_b f_u d_{bull} t_p / \gamma_{M2} = 2.5 \cdot 0.79 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 10^{-3} / 1.25 = 227.52 \text{ kN}$$

Resistenza a rifollamento del gruppo di fori:

$$V_{v,Rd2} = 4 \cdot 227.52 = 910.08 \text{ kN}$$

- Resistenza a rifollamento dei fori sull'ala della trave.

$$k_1 = \min\{ 2.8 e_2/d_0 - 1.7 ; 1.45 p_2/d_0 - 1.7 ; 2.5\}$$

dove: $e_2 = e_b = 50$; $p_2 = w = 100$; $d_0 = 21$; pertanto:

$$k_1 = \min\{ 2.8 \cdot 50/21 - 1.7 = 4.96 ; 1.45 \cdot 100/21 - 1.7 = 5.20 ; 2.5\} = 2.5;$$

$\alpha_b = 0.79$ (vd. rifollamento fori piastra).

Resistenza a rifollamento del singolo foro:

$$F_{b,Rd} = k_1 \alpha_b f_u d_{bull} t_{fb} / \gamma_{M2} = 2.5 \cdot 0.79 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 15 \cdot 10^{-3} / 1.25 = 170.64 \text{ kN}$$

Resistenza a rifollamento del gruppo di fori:

$$V_{v,Rd3} = 4 \cdot 170.64 = 682.56 \text{ kN}$$

- Resistenza a taglio dei cordoni di saldatura della colonna alla piastra.

(cfr. calcolo del momento resistente per il componente 19)

Resistenza dei cordoni d'anima sottoposti all'azione di taglio:

$$f_{Vw,d} = f_u / \sqrt{3} / (\beta_w \gamma_{M2})$$

$$\Rightarrow f_{Vw,d} = 360 / \sqrt{3} / (0.8 \cdot 1.25) = 207.8 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{v,Rd4} = 2L_3 a_w f_{Vw,d} = 2 \cdot 126 \cdot 4 \cdot 207.8 \cdot 10^{-3} = 209.46 \text{ kN}$$

La **resistenza a taglio** del giunto è data dal valore minimo tra le diverse modalità di collasso:

$$V_{V,Rd} = 209.46 \text{ kN}$$

2.2. GIUNTO BULLONATO IRRIGIDITO

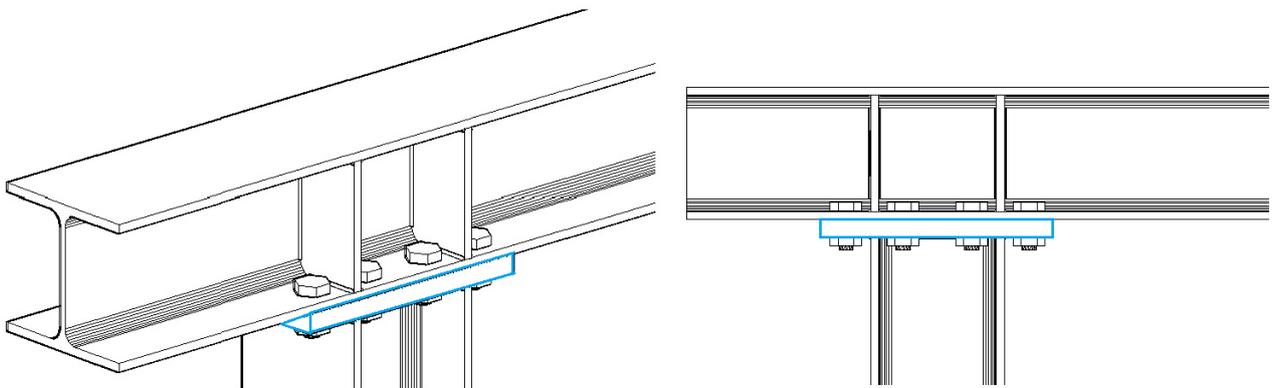
Nei casi in cui il giunto senza irrigidimenti è a parziale ripristino di resistenza, per aumentare il valore del momento resistente, tendendo al completo ripristino, è possibile rinforzare la trave con irrigidimenti trasversali (nervature verticali).

Se il momento resistente ancora non è sufficiente, si può aumentare la sezione della colonna prevedendo un'espansione dell'altezza della sezione per mezzo di due mensole laterali.

Si consideri l'**inserimento di irrigidimenti trasversali nella trave**.

Lo spessore t_{st} delle nervature di irrigidimento deve essere scelto almeno uguale allo spessore delle ali della colonna; si ha: $t_{st} = t_{fc} = 15 \text{ mm}$

Gli irrigidimenti devono risultare allineati con le corrispondenti ali della colonna: il loro interasse è dunque: $d_s = h_c - t_{fc} = 200 - 15 = 185 \text{ mm}$



Componente 1: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio (resistenza: §6.2.6.1).

Rispetto al caso senza irrigidimenti, la resistenza a taglio è caratterizzata da un contributo aggiuntivo (§6.2.6.1(4)):

$$V_{wp,add,Rd} = 4 M_{pl,fb,Rd} / d_s, \text{ con: } V_{wp,add,Rd} \leq (2 M_{pl,fb,Rd} + 2 M_{pl,st,Rd}) / d_s$$

dove:

$M_{pl,fb,Rd}$ = momento resistente plastico di progetto dell'ala della trave, avente sezione rettangolare $b_b \times t_{fb}$

$M_{pl,st,Rd}$ = momento resistente plastico di progetto dell'irrigidimento, avente sezione rettangolare: $(b_b - t_{wb}) \times t_{st}$

d_s = distanza fra i piani medi degli irrigidimenti

Per una sezione rettangolare $b \times t$, il modulo di resistenza plastico è: $W_{pl} = bt^2/4$; il corrispondente momento resistente plastico è: $M_{pl} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$.

Per l'ala della trave risulta:

$$W_{pl,fb} = b_b t_{fb}^2 / 4 = 200 \cdot 15^2 / 4 = 11250 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl,fb,Rd} = 11250 \cdot 235 \cdot 10^{-6} / 1.05 = 2.518 \text{ kNm}$$

Per l'irrigidimento:

$$W_{pl,st} = (b_b - t_{wb}) t_{st}^2 / 4 = (200 - 9) \cdot 15^2 / 4 = 10743 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl,st,Rd} = 10743 \cdot 235 \cdot 10^{-6} / 1.05 = 2.404 \text{ kNm}$$

$$\Rightarrow V_{wp,add,Rd} = 4 \cdot 2.518 / (185 \cdot 10^{-3}) = 54.44 \text{ kN, ma con:}$$

$$V_{wp,add,Rd} \leq (2 \cdot 2.518 + 2 \cdot 2.404) / (185 \cdot 10^{-3}) = 53.21 \text{ kN.}$$

La quota aggiuntiva di resistenza a taglio non può essere superiore alla resistenza della saldatura degli irrigidimenti alla trave:

saldatura a cordoni d'angolo, con altezza di gola: $a_w = 4 \text{ mm}$;

lunghezza dei cordoni: si considera pari all'altezza dell'anima della trave:

$$L_{st} = h_{wb} = h_b - 2t_{fb} - 2r_b = 134 \text{ mm};$$

resistenza dei cordoni d'anima sottoposti all'azione di taglio:

$$f_{wd} = f_u / \sqrt{3} / (\beta_w \gamma_{M2}) \Rightarrow f_{wd} = 360 / \sqrt{3} / (0.8 * 1.25) = 207.8 \text{ N/mm}^2$$

$V = 2L_{st} a_w f_{wd} = 2 * 134 * 4 * 207.8 * 10^{-3} = 222.76 \text{ kN} > V_{wp,add,Rd} = 53.21 \text{ kN}$, e quindi la quota aggiuntiva di resistenza a taglio è effettivamente pari a 53.21 kN.

$$\text{Pertanto: } V_{wp,Rd} = 289 + 53 = 342 \text{ kN}$$

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,1} = F_{Rd,1} * z = 342 * 185 * 10^{-3} = 63.27 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_1 = \infty \text{ (cfr. prospetto 6.11, §6.3.2)}$$

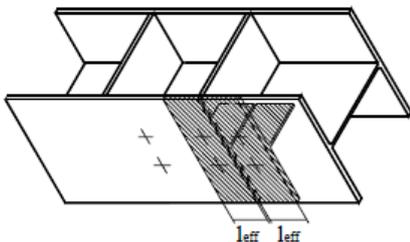
Componente 2: anima della trave sollecitata a compressione trasversale (resistenza: §6.2.6.2).

Componente 3: anima della trave sollecitata a trazione trasversale (resistenza: §6.2.6.3).

La compressione e la trazione nell'anima della trave vengono assorbite dagli irrigidimenti; per il giunto con irrigidimenti, quindi, il loro contributo non viene considerato.

Componente 4: ala della trave sollecitata a flessione (resistenza: §6.2.6.4).

Per quanto riguarda la larghezza efficace, i due gruppi di bulloni posti all'esterno e all'interno, divisi dalla nervatura di irrigidimento, sono modellati come elementi a T equivalenti (T-stub) separati; non è cioè necessario calcolare la resistenza di gruppo. Data la geometria del giunto, i due elementi a T sono uguali.



La fila di bulloni è adiacente ad un irrigidimento; pertanto, secondo (§6.2.6.4.2), la lunghezza efficace è la seguente:

$$l_{eff} = \min\{ 2\pi m_b ; \alpha m_b \}$$

dove α viene ricavato dal diagramma già noto dal calcolo della componente 5 per il giunto non irrigidito:

$$\lambda_1 = m_b / (m_b + e_b) = 31.10 / (31.10 + 50) = 0.383$$

$$\lambda_2 = m_{xs} / (m_b + e_b) = 43.23 / (31.10 + 50) = 0.533$$

Risulta: $\alpha = 6$

$$\Rightarrow l_{eff} = \min\{ 2\pi * 31.10 ; 6 * 31.10 \} = 186.60 \text{ mm}$$

Calcolo della resistenza di progetto per le tre modalità di collasso:

• Modalità di collasso 1: $F_{T,Rd1} = 4 M_{pl,Rd} / m_b$

$$l_{eff} = 186.6 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Rd} = 0.25 l_{eff} t_{fb}^2 f_{yb} / \gamma_{M0} = (0.25 * 186.6 * 15^2 * 235 / 1.05) * 10^{-6} = 2.349 \text{ kNm}$$

$\Rightarrow F_{T,Rd1} = 4 \cdot 2.349 / (31.10 \cdot 10^{-3}) = 302 \text{ kN}$ (leggermente variata rispetto al giunto senza irrigidimenti)

• Modalità di collasso 2: $F_{T,Rd2} = 232.03 \text{ kN}$ (invariata)

• Modalità di collasso 3: $F_{T,Rd3} = 282.24 \text{ kN}$ (invariata)

La resistenza della fila esterna è anche in questo caso governata dalla modalità di collasso 2.

Ad ognuna delle due file si può quindi affidare la resistenza:

$F_{T,fb,Rd} = 232.03 \text{ kN}$

Il momento resistente di progetto è dato da:

$$M_{Rd,4} = F_{T,fb,Rd}^{est} \cdot z_{est} + F_{T,fb,Rd}^{int} \cdot z_{int}$$

dove: $z_{est} = 242.5$, $z_{int} = 127.5$

$\Rightarrow M_{Rd,4} = 232.03 \cdot 242.5 \cdot 10^{-3} + 232.03 \cdot 127.5 \cdot 10^{-3} = 85.85 \text{ kNm}$ (incrementato rispetto al caso del giunto non irrigidito)

Coefficiente di rigidezza:

$$k_4 = 0.9 I_{eff} t_{fb}^3 / m^3 = 0.9 \cdot (2 \cdot 186.6) \cdot 15^3 / 31.10^3 = 37.69 \text{ mm}$$

Componente 5: piastra sollecitata a flessione,

componente 7: anima ed ala della colonna sollecitate a compressione,

componente 8: anima della colonna sollecitata a trazione,

componente 10: bulloni sollecitati a trazione,

componente 19: saldatura colonna - piastra:

queste componenti sono tutte invariate rispetto al caso del giunto senza irrigidimenti.

Riepilogo del contributo dei singoli componenti a resistenza e rigidezza:

1*: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio:

Giunto senza irrigidimenti: $M_{Rd,1} = 53.47 \text{ kNm}$, $k_1 = 5.104 \text{ mm}$

Giunto con irrigidimenti: $M_{Rd,1} = 63.27 \text{ kNm}$, $k_1 = \infty$

2*: anima della trave sollecitata a compressione trasversale:

Giunto senza irrigidimenti: $M_{Rd,2} = 63.08 \text{ kNm}$, $k_2 = 11.141 \text{ mm}$

Giunto con irrigidimenti: componente non considerata

3*: anima della trave sollecitata a trazione trasversale:

Giunto senza irrigidimenti: $M_{Rd,3} = 70.48 \text{ kNm}$, $k_3 = 14.193 \text{ mm}$

Giunto con irrigidimenti: componente non considerata

4*: ala della trave sollecitata a flessione:

Giunto senza irrigidimenti: $M_{Rd,4} = 83.01 \text{ kNm}$, $k_4 = 30.49 \text{ mm}$

Giunto con irrigidimenti: $M_{Rd,4} = 85.85 \text{ kNm}$, $k_4 = 37.69 \text{ mm}$

5: piastra sollecitata a flessione

$M_{Rd,5} = 83.91 \text{ kNm}$, $k_5 = 10.45 \text{ mm}$

7: anima ed ala della colonna sollecitate a compressione

$M_{Rd,7} = 143.78 \text{ kNm}$, $k_7 = \infty$

8: anima della colonna sollecitata a trazione

$M_{Rd,8} = 93.79 \text{ kNm}$, $k_8 = \infty$

10: bulloni sollecitati a trazione

$k_{10} = 6.85 \text{ mm}$

19: saldatura colonna - piastra

$M_{Rd,19} = 90.14 \text{ kNm}$, $k_{19} = \infty$

(* componenti ignorate nel caso di ipotesi shear-type)

La **resistenza del giunto bullonato e irrigidito**, è ancora governata dal pannello d'anima della trave sollecitato a taglio, cui corrisponde il minimo momento resistente:

$$M_{j,Rd} = 63.27 \text{ kNm (+18\% rispetto al giunto non irrigidito)}.$$

Si tratta di un valore ancora a parziale ripristino di resistenza.

La rigidezza del giunto irrigidito vale:

$$S_{j,ini} = E z^2 / [\sum (1/k_i)] = 210000 * 185^2 * 10^{-6} / (1/37.69 + 1/10.45 + 1/6.85) = 26797 \text{ kNm/rad, oltre il doppio del valore relativo al giunto non irrigidito (11397, quindi con +135\%).}$$

Il giunto è ancora semi-rigido, ma si è molto avvicinato al comportamento rigido. Infatti:

$$2719 \leq S_{j,ini} = 26797 \leq 43496 \text{ kNm/rad}$$

Ai fini del diagramma di comportamento bilineare semplificato (vd. figura seguente), la rigidezza viene assunta pari a:

$$S_{j,ini}/\eta = 26797/2 = 13398 \text{ kNm/rad}$$

Rispetto al caso del giunto non irrigidito, non vi sono variazioni sulla capacità rotazionale e sulla resistenza a taglio.

L'inserimento delle nervature di irrigidimento ha quindi incrementato notevolmente la rigidezza, ma non ha modificato in modo significativo la resistenza.

Per aumentarla, si può prevedere, insieme alle nervature di irrigidimento nella trave, un'espansione dell'altezza della sezione per mezzo di due **mensole laterali**. (vd. figura seguente).

Si prevede in tal caso anche nervature di irrigidimento nella colonna; le componenti 7 e 8 possono in tal caso essere trascurate. Le componenti significative sono le 1, 4, 5 e tutte manifestano un incremento considerevole del momento resistente dovuto al maggiore braccio delle file dei bulloni rispetto al centro di compressione; anche per la componente 19 si ha un deciso incremento di resistenza.

Le mensole sono caratterizzate da spessori uguali a quelli della colonna (t_{wc} e t_{fc}), e l'espansione in pianta è definita dalla dimensione $d_{st,c}$, che può essere assunta pari a $2m_x + t_{fc} = 115 \text{ mm}$.

La distanza fra i piani medi degli irrigidimenti (nervature verticali per l'anima della trave) diventa $185 + 115 * 2 = 415 \text{ mm}$.

Resistenza per la **componente 1**:

$$V_{wp,add,Rd} = 4 * 2.518 / (415 * 10^{-3}) = 24.27 \text{ kN, ma con:}$$

$$V_{wp,add,Rd} \leq (2 * 2.518 + 2 * 2.404) / (415 * 10^{-3}) = 23.72 \text{ kN, e pertanto:}$$

$$V_{wp,Rd} = 289 + 24 = 313 \text{ kN}$$

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,1} = F_{Rd,1} * z = 313 * 415 * 10^{-3} = 129.89 \text{ kNm}$$

Riepilogo del contributo dei singoli componenti a resistenza e rigidezza:

1: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio:

$$\text{Giunto con irrigidimenti e mensole: } M_{Rd,1} = 129.89 \text{ kNm}$$

4: ala della trave sollecitata a flessione:

poiché ognuno dei due bracci aumenta di $2 * 115 = 230 \text{ mm}$, si ha:

$$M_{Rd,4} = 232.03 * 472.5 * 10^{-3} + 232.03 * 357.5 * 10^{-3} = 192.58 \text{ kNm}$$

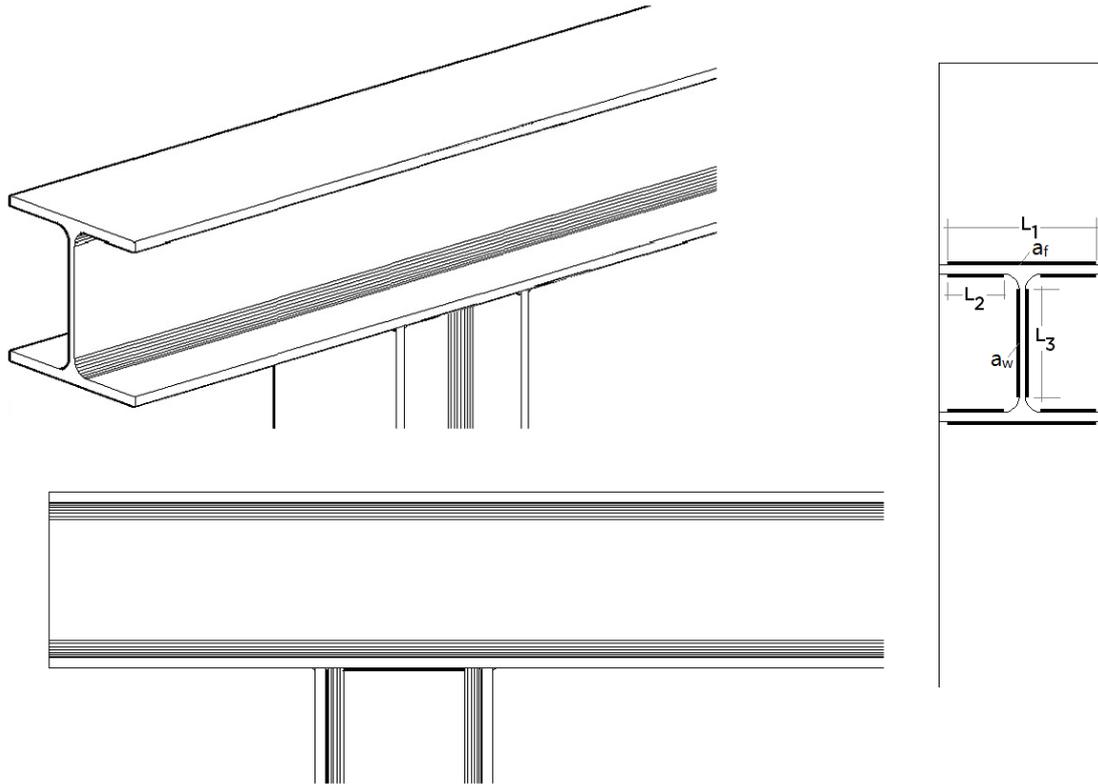
5: piastra sollecitata a flessione

$$M_{Rd,5} = 199.38 * 472.5 * 10^{-3} + 278.89 * 357.5 * 10^{-3} = 193.91 \text{ kNm}$$

10: bulloni sollecitati a trazione

3. GIUNTO SALDATO

Il giunto ottenuto con saldatura della colonna alla trave, non irrigidito, è rappresentato in figura seguente.



Per la classificazione del giunto, devono essere prese in considerazione le componenti 1,2,3,19 (secondo §6.3.1(7)).

Considerando le stesse membrature del nodo esaminato nell'esempio di giunto bullonato (due HEB200), i calcoli effettuati per la componente 19 (cordoni di saldatura colonna-trave) restano invariati.

Componente 1: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio (resistenza: §6.2.6.1).

Connessione saldata	Centro di compressione	Braccio della coppia	Distribuzioni delle forze
	In linea con lo spessore medio della flangia compressa	$z = h_c \cdot t_{fc}$ $h_c =$ altezza della colonna collegata $t_{fc} =$ spessore dell'ala della colonna collegata	

La resistenza a taglio plastica di progetto, come per il giunto bullonato, è data da:

$$V_{wp,Rd} = 0.9 f_{y,wb} A_{vb} / (\sqrt{3} * \gamma_{M0}) = 0.9 * 235 * 2485 * 10^{-3} / (\sqrt{3} * 1.05) = 289 \text{ kN}$$

Con parametro di trasformazione $\beta=1$, la forza resistente di progetto vale:

$$F_{Rd,1} = V_{wp,Rd} / \beta = 289 \text{ kN}$$

Il braccio della coppia z deve essere assunto come specificato in figura (da fig. 6.15 (§6.2.7.1)):

$$z = h_c - t_{fc} = 200 - 15 = 185$$

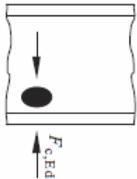
Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,1} = F_{Rd,1} * z = 289 * 185 * 10^{-3} = 53.47 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_1 = 0.38 A_{Vb} / (\beta z) = 0.38 * 2485 / (1 * 185) = 5.104 \text{ mm}$$

Componente 2: anima della trave sollecitata a compressione trasversale (resistenza: §6.2.6.2).



La trave non è irrigidita; la resistenza di progetto a compressione trasversale è data da:

$$F_{c,wb,Rd} = \omega k_{wb} b_{eff,c,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0} \leq \omega k_{wb} \rho b_{eff,c,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M1}$$

dove:

ω = fattore di riduzione per gli effetti di interazione a taglio nel pannello d'anima della trave. Con parametro di trasformazione $\beta=1$: $\omega = \omega_1$, con:

$$\omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1.3 (b_{eff,c,wb} t_{wb} / A_{Vb})^2]}$$

per la connessione saldata, la larghezza efficace a compressione dell'anima della trave è data da:

$$b_{eff,c,wb} = t_{fc} + 2 \sqrt{2} a_f + 5 (t_{fb} + r_b) = 15 + 2\sqrt{2} * 6 + 5 * (15 + 18) = 196.97 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1.3 (196.97 * 9 / 2485)^2]} = 0.776.$$

k_{wb} viene assunto pari a 1.0.

La snellezza del pannello d'anima compresso vale:

$$\lambda_p = 0.932 \sqrt{[b_{eff,c,wb} d_{wb} f_{y,wb} / (E t_{wb}^2)]}$$

$$\text{dove: } d_{wb} = h_{wb} - 2 (t_{fb} + r_b) = 200 - 2 * (15 + 18) = 134$$

$$\Rightarrow \lambda_p = 0.932 \sqrt{[196.97 * 134 * 235 / (210000 * 9^2)]} = 0.563 < 0.72, \text{ e quindi: } \rho = 1.0.$$

Considerando che $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.05$, si ha:

$$F_{Rd,2} = F_{c,wb,Rd} = 0.776 * 1.0 * 196.97 * 9 * 235 * 10^{-3} / 1.05 = 308 \text{ kN}$$

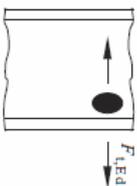
Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,2} = F_{Rd,2} * z = 308 * 185 * 10^{-3} = 56.96 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_2 = 0.7 b_{eff,c,wb} t_{wb} / h_{wb} = 0.7 * 196.97 * 9 / 134 = 9.261 \text{ mm}$$

Componente 3: anima della trave sollecitata a trazione trasversale (resistenza: §6.2.6.3).



La trave non è irrigidita; la resistenza di progetto a trazione trasversale è data da:

$$F_{c,wb,Rd} = \omega b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0}$$

dove:

$$\omega = \omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1.3 (b_{eff,t,wb} t_{wb} / A_{Vb})^2]}$$

La larghezza efficace $b_{\text{eff},t,wb}$ dell'anima della trave soggetta a trazione è uguale a quella dell'anima soggetta a compressione; $b_{\text{eff},t,wb}$ e ω assumono quindi valori invariati rispetto a quelli calcolati per la componente 2:

$$F_{Rd,3} = F_{c,wb,Rd} = 0.776 \cdot 196.97 \cdot 9 \cdot 235 \cdot 10^{-3} / 1.05 = 308 \text{ kN}$$

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,2} = F_{Rd,2} \cdot z = 308 \cdot 185 \cdot 10^{-3} = 56.96 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_3 = 0.7 b_{\text{eff},c,wb} t_{wb} / h_{wb} = 0.7 \cdot 196.97 \cdot 9 / 134 = 9.261 \text{ mm}$$

Riepilogo del contributo dei singoli componenti a resistenza e rigidezza:

1*: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio:

$$M_{Rd,1} = 53.47 \text{ kNm}, k_1 = 5.104 \text{ mm}$$

2*: anima della trave sollecitata a compressione trasversale:

$$M_{Rd,2} = 56.96 \text{ kNm}, k_2 = 9.261 \text{ mm}$$

3*: anima della trave sollecitata a trazione trasversale:

$$M_{Rd,3} = 56.96 \text{ kNm}, k_3 = 9.261 \text{ mm}$$

19: saldatura colonna - piastra

$$M_{Rd,19} = 90.14 \text{ kNm}, k_{19} = \infty$$

(* componenti ignorate nel caso di ipotesi shear-type)

La **resistenza del giunto saldato, non irrigidito**, è governata dal pannello d'anima della trave sollecitato a taglio, cui corrisponde il minimo momento resistente:

$$M_{j,Rd} = 53.47 \text{ kNm}$$

(il valore ottenuto coincide con quello del giunto bullonato non irrigidito).

Classificazione del giunto in base alla resistenza

Il giunto è a parziale ripristino di resistenza. Infatti:

$$0.25 M_{pl,Rd} = 37.75 \leq M_{j,Rd} = 53.47 \leq M_{pl,Rd} = 143.79 \text{ kNm}$$

Classificazione del giunto in base alla rigidezza

La rigidezza del giunto vale:

$$S_{j,ini} = E z^2 / [\sum (1/k_i)] = 210000 \cdot 185^2 \cdot 10^{-6} / (1/5.104 + 1/9.261 + 1/9.261) = 17450 \text{ kNm/rad}$$

Il giunto è semi-rigido. Infatti:

$$2719 \leq S_{j,ini} = 17450 \leq 43496 \text{ kNm/rad}$$

Ai fini del diagramma di comportamento bilineare semplificato (vd. figura seguente), la rigidezza viene assunta pari a:

$$S_{j,ini} / \eta = 17450 / 2 = 8725 \text{ kNm/rad}$$

In definitiva, il giunto è classificabile come **semi-rigido** in base al valore di rigidezza e **a parziale ripristino** in base al valore di resistenza.

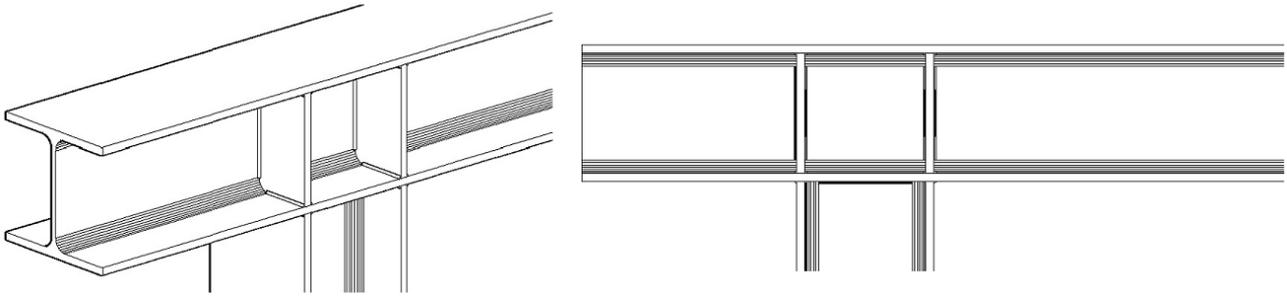
Per quanto riguarda la **capacità rotazionale**, secondo §6.4.3(2) per il collegamento saldato si può assumere che sia in grado di sviluppare una capacità rotazionale Φ_{cd} di almeno 0.015 rad (15 mrad); tale valore viene considerato come riferimento generale per i giunti saldati; la massima rotazione possibile è comunque limitata dal valore dello spostamento ultimo del telaio, cioè del massimo spostamento orizzontale consentito ai nodi di sommità delle colonne, determinato dalla duttilità

del telaio.

Per la **resistenza a taglio**, la resistenza dei cordoni d'anima sottoposti all'azione di taglio è già stata calcolata per il giunto bullonato, e vale:

$$V_{V,Rd} = 209.46 \text{ kN}$$

In modo del tutto analogo a quanto già illustrato per il giunto bullonato, per aumentare il momento resistente del giunto è possibile rinforzare la trave con **irrigidimenti trasversali**.



L'unica componente da considerare è la n°1; come per il giunto bullonato irrigidito, il contributo delle componenti 2 e 3 non viene considerato in quanto la compressione e la trazione nell'anima della trave sono assorbite dagli irrigidimenti.

Componente 1: pannello d'anima della trave sollecitato a taglio (resistenza: §6.2.6.1).

Rispetto al caso senza irrigidimenti, la resistenza a taglio è caratterizzata da un contributo aggiuntivo (§6.2.6.1(4)) identico a quanto già calcolato per il giunto bullonato:

$$V_{wp,add,Rd} = 53 \text{ kN, e pertanto:}$$

$$V_{wp,Rd} = 289 + 53 = 342 \text{ kN}$$

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,1} = F_{Rd,1} * z = 342 * 185 * 10^{-3} = 63.27 \text{ kNm}$$

Coefficiente di rigidezza:

$$k_1 = \infty \text{ (cfr. prospetto 6.11, §6.3.2)}$$

La **resistenza del giunto saldato e irrigidito**, è ancora governata dal pannello d'anima della trave sollecitato a taglio, cui corrisponde il minimo momento resistente:

$$M_{j,Rd} = 63.27 \text{ kNm (+18% rispetto al giunto non irrigidito).}$$

Si tratta di un valore ancora a parziale ripristino di resistenza.

Per quanto riguarda la rigidezza, il giunto può essere considerato rigido (nel modello di calcolo del telaio non ci sono molle rotazionali).

Come per il giunto bullonato, per incrementare ulteriormente la resistenza si può prevedere, insieme alle nervature di irrigidimento nella trave, un'espansione dell'altezza della sezione per mezzo di due **mensole laterali**.

In modo analogo al giunto bullonato, si ha:

$$V_{wp,add,Rd} = 4 * 2.518 / (415 * 10^{-3}) = 24.27 \text{ kN, ma con:}$$

$$V_{wp,add,Rd} \leq (2 * 2.518 + 2 * 2.404) / (415 * 10^{-3}) = 23.72 \text{ kN, e pertanto:}$$

$$V_{wp,Rd} = 289 + 24 = 313 \text{ kN}$$

Il momento resistente di progetto è quindi:

$$M_{Rd,1} = F_{Rd,1} * z = 313 * 415 * 10^{-3} = 129.89 \text{ kNm}$$

valore, come già noto, molto vicino al completo ripristino ma ancora distante dalla condizione di sovrarresistenza.

4. IMPLEMENTAZIONE NEL SOFTWARE ACM

Per la progettazione dei giunti per il telaio di cerchiatura, ACM adotta alcune ipotesi di lavoro.

Per quanto riguarda la **resistenza**:

- il giunto bullonato prevede sempre una fila di bulloni esterna ed una interna e quindi richiede il prolungamento; questa preimpostazione deriva dalla constatazione che in assenza della fila esterna il momento resistente sarebbe in generale troppo basso nei confronti dei requisiti richiesti dal comportamento antisismico;
- il giunto, bullonato o saldato, può prevedere o meno nervature di irrigidimento trasversali per l'anima della trave; è inoltre possibile espandere la sezione della colonna con due mensole laterali;
- se il giunto è a parziale ripristino di resistenza, i controlli sui momenti nel corso della costruzione della curva di capacità evidenzieranno il punto di plasticizzazione del giunto.

Se tale requisito non è ritenuto accettabile ai fini della verifica sismica (nei confronti della quale si richieda il completo ripristino o addirittura la sovrarresistenza), occorre riprogettare il giunto modificando le sezioni della colonna e della trave oppure altri parametri (ad es.: tipo di bulloni, spessore piastra, lunghezza delle mensole di espansione); l'analisi viene comunque svolta, ma la condizione di sovrarresistenza sarà evidenziata nei risultati dell'elaborazione.

Per la **rigidezza**:

il giunto viene classificato in base alla rigidezza: se risulta semi-rigido, la rigidezza rotazionale viene considerata nell'ambito dello schema statico del telaio attraverso l'inserimento di una molla rotazionale in corrispondenza della sezione terminale della colonna.

Nell'input e nelle elaborazioni di calcolo, non sono previsti irrigidimenti con piastra d'anima supplementare (intervento alternativo alle nervature trasversali) o diagonali (soluzione che può creare problemi di realizzazione nel caso dei giunti bullonati).

Come già illustrato nell'introduzione, alcune configurazioni strutturali di telai di cerchiatura non sono inclusi nella casistica di giunti classificati da ACM:

- telai in acciaio con colonna e/o trave non avente sezione HE o IPE;
- telai misti in acciaio e c.a.;
- telai in c.a.;
- per murature con grande spessore dove la cerchiatura prevede più telai uguali tra loro affiancati: il collegamento colonna/trave viene studiato facendo riferimento al singolo telaio; è necessario che il numero di colonne affiancate sia uguale al numero di travi affiancate.

Nei casi non inclusi nella classificazione automatica, il comportamento del giunto può essere considerato rigido e a completo ripristino della resistenza; è ovviamente opportuna una verifica a parte sulla soluzione strutturale adottata per il nodo. ACM consente comunque l'inserimento diretto in input di rigidezza iniziale e momento resistente del giunto.

Questo per quanto riguarda il giunto di sommità della colonna. Per il giunto di base, ACM consente le seguenti specifiche:

- è possibile assegnare gli stessi valori di rigidezza e resistenza del giunto di sommità (ciò corrisponde al caso in cui la colonna sia collegata al traverso inferiore con identiche modalità con cui viene collegata alla trave);
- in alternativa, si possono specificare direttamente rigidezza e/o resistenza, o qualificare il giunto di base come rigido e/o a completo ripristino, oppure a cerniera.