

L'articolo vuol proporre al progettista tipologie, dettagli costruttivi e procedure di calcolo per progettare e realizzare connessioni a momento trave-colonna, sovraresistenti e duttili, da impiegare in telai sismoresistenti dissipativi (telai DCM o DCH secondo Eurocodice 8 o IMF e SMF secondo AISC 341-10) con colonne tubolari cave, di sezione circolare o quadra. La materia dell'articolo è tratta dalla *design guide* n. 9 del CIDECT, associazione internazionale di produttori di profili tubolari strutturali, che a sua volta riprende concetti della normativa giapponese. Non esistendo sull'argomento indicazioni né nella normativa europea né in quella americana, le indicazioni del CIDECT appaiono un utile strumento per realizzare questo tipo di connessioni.

This paper deals with design of structural hollow section column connections to be used in moment frames with inelastic deformation capacity, like IMF and SMF according to AISC 341-10, or DCM and DCH frames according to Eurocode 8. The content of the paper is taken from CIDECT Design Guide no. 9, inspired to Japanese specifications. CIDECT is an international association of leading manufacturers of hollow sections and pipes whose objective is to expand knowledge, by means of research and studies, of steel hollow sections and their application in steel construction and engineering. Such type of connections are not addressed either in Eurocodes or in AISC specifications, so CIDECT indications can be profitably utilized by engineers.

PREMESSA

I telai in acciaio con attacchi a momento, nei quali cioè le forze orizzontali sono portate mediante la generazione di momenti flettenti (e relativi tagli) nelle travi e nelle colonne, possono essere progettati, in presenza di forze sismiche, come non (o poco) dissipativi o dissipativi. I primi sono calcolati in campo sostanzialmente elastico, mentre per i secondi si accetta la formazione di cerniere plastiche alle estremità delle travi e con tali plasticizzazioni si dissipa energia sismica. Se guardiamo l'Eurocodice 8, i telai poco dissipativi sono strutture classificate DCL, *Ductility Class Low*, mentre i telai dissipativi sono classificati DCM o DCH, *Ductility Class Medium* o *High*. Le norme americane AISC 341-10 e ASCE7-10 definiscono gli *Ordinary Moment Frames*, OMF, che sono i telai non dissipativi, e poi gli *Intermediate Moment Frames*, IMF, e gli *Special Moment Frames*, SMF, che sono le due categorie di telai dissipativi.

Le norme italiane si muovono sulla scia dell'Eurocodice 8, inquadrando i telai dissipativi in due categorie, CD"B", che corrisponde alla classe DCM, e CD"A" che corrisponde alla classe DCH.

Per i telai dissipativi (DCM e DCH europei e IMF e SMF statunitensi)

I giunti trave – colonna tubolare nei telai sismoresistenti dissipativi in accordo alla design guide n. 9 del CIDECT

Structural hollow section column connections for moment frames with inelastic deformation capacity according to CIDECT design guide no. 9

Benedetto Cordova

vengono richiesti dalle norme due requisiti: il primo di resistenza, che la capacità flessionale del nodo sia superiore al momento plastico della trave connessa dal nodo, opportunamente maggiorato per tener conto della sovraresistenza del materiale e dei fenomeni di incrudimento; il secondo di duttilità, che la capacità flessionale del nodo non si riduca a meno dell'80% al raggiungimento di valori prescritti di rotazione trave-colonna (secondo l'Eurocodice 8) o di *drift* d'interpiano (secondo le AISC 341-10). Al di là della formulazione puntuale leggermente diversa, Eurocodice 8 e norme AISC danno sostanzialmente le stesse prescrizioni per i nodi dei telai dissipativi. Da notare che le norme italiane NTC2008 riportano solo il criterio di resistenza ma non quello di duttilità.

Come si progettano e realizzano nodi che rispettino i due requisiti sopra esposti? Il requisito di resistenza è abbastanza facilmente rispettabile da parte di un progettista con i metodi di calcolo disponibili, in normativa ed in letteratura. Più difficile, per un ingegnere che vuole progettare le sue connessioni, rispettare il requisito di duttilità, perché per esso non servono calcoli ma piuttosto sperimentazioni, e giocano un ruolo importante anche (e forse soprat-

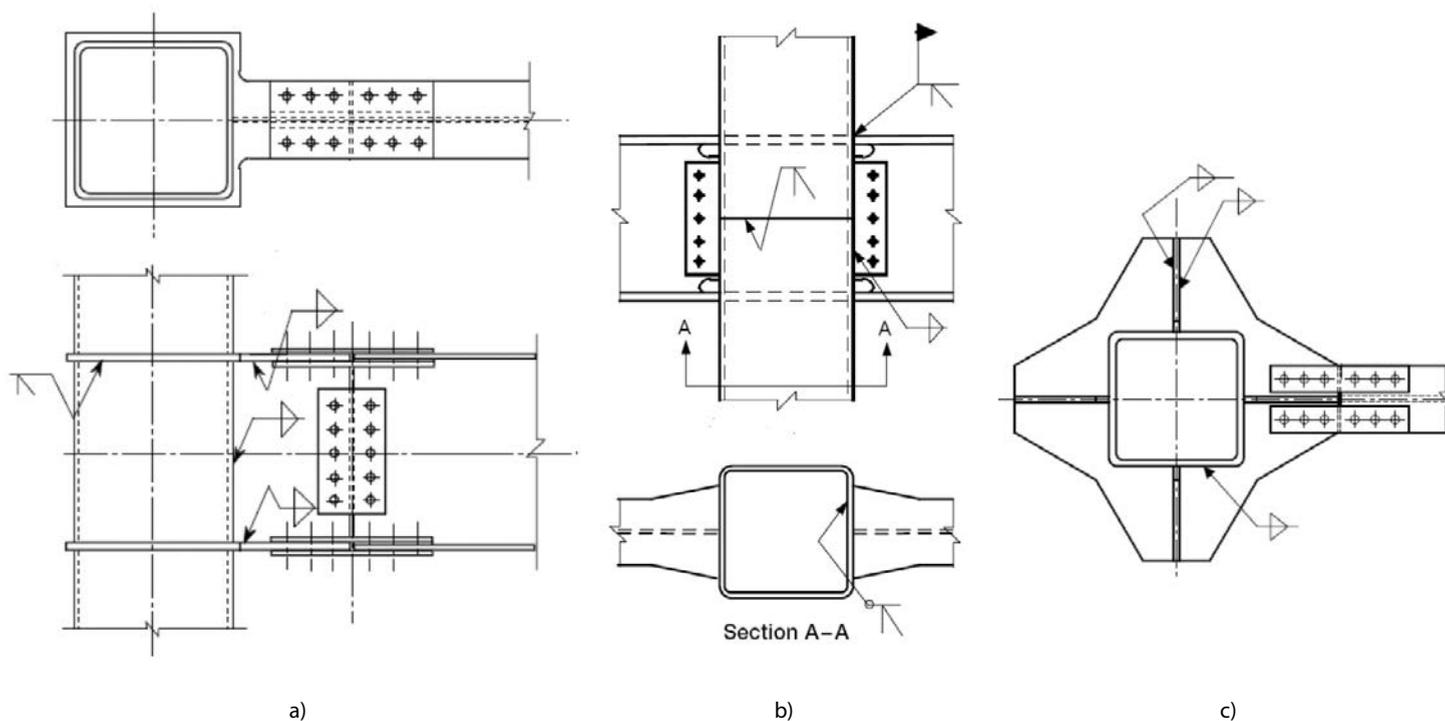


Fig. 1 – Connessione trave colonna: *through diaphragm* (a), *internal diaphragm* (b), *external diaphragm* (c)

tutto) la scelta dei dettagli costruttivi e delle tecniche realizzative. Per risolvere il problema, l'AISC ha eseguito una campagna di prove su diversi tipi di connessioni arrivando a definire un *set* di connessioni prequalificate che, se calcolate e realizzate come prescritto nella norma AISC 358-10, garantiscono il rispetto del requisito di duttilità oltre che quello di resistenza. In Europa non esiste al momento nulla di equivalente, ma è in corso di sviluppo un progetto denominato EQUALJOINTS che dovrebbe portare anch'esso alla qualifica di alcune connessioni sismiche.

Le connessioni prequalificate dell'AISC riguardano sostanzialmente connessioni di travi ad I o ad H su colonne anch'esse con sezioni ad H. Non ci sono però connessioni di travi su colonne tubolari, cave circolari quadre o rettangolari, tranne una connessione proprietaria, denominata ConXL, che è un sistema brevettato, realizzato dalla ditta ConXtech (www.conxtech.com). Tale connessione, realizzata con elementi saldati alla colonna ed alla trave e poi connessi in opera con bulloni, è però limitata all'impiego di colonne realizzate in tubo quadro tipo HSS o composte saldate di 406 mm di lato. Lo spessore minimo deve essere di 10 mm e le colonne devono essere completamente riempite di calcestruzzo con resistenza a 28 giorni di non meno di 21 MPa (per chi volesse saperne di più: cfr. AISC 358-10, chapter 10, o anche il sito internet già riportato). Non è pertanto possibile negli USA realizzare telai dissipativi con colonne tubolari usando connessioni trave-colonna prequalificate. I telai dissipativi con colonne tubolari sono invece molto impiegati in Giappone, dove sono molto usate connessioni a momento che collegano una trave realizzata con un profilo aperto, ad I o H, con una colonna tubolare cava, circolare o rettangolare, realizzate

mediante due piatti saldati sulla colonna, posti alla stessa distanza delle ali della trave da connettere, che si collegano poi a tali ali mediante saldatura (Figura 1b) o bullonatura (Figure 1a e 1c). Tali piatti possono attraversare la colonna (*through diaphragm*, Figura 1a), essere interni alla colonna (*internal diaphragm*, Figura 1b), o infine estendersi esternamente alla colonna (*external diaphragm*, Figura 1c).

Tali connessioni sono state prequalificate e raccomandate dall'AIJ, Architectural Institute of Japan, che ha pubblicato nel 1990 la guida tecnica "Recommendation for Design and Fabrication of Tubular Structures in Steel", dove vengono fornite procedure di calcolo e raccomandazioni per la realizzazione di tali connessioni.

Il CIDECT (www.cidect.com), che è una associazione internazionale di produttori di profilati cavi e tubi, con l'obiettivo di espandere la conoscenza, mediante ricerche e studi, dei profili cavi tubolari e della loro applicazione nel campo dell'ingegneria e delle costruzioni, tra le numerose guide tecniche pubblicate, ne ha una, la n. 9, che si intitola: Y. Kurobane, J. A. Packer, J. Wardenier, N. Yeomans – "DESIGN GUIDE FOR STRUCTURAL HOLLOW SECTION COLUMN CONNECTIONS", del 2004. Essa tratta, come si capisce, delle connessioni in genere dei profili cavi tubolari. In tale guida, al capitolo 8, "Rigid (full strength) connections", si parla di connessioni da adottare in telai sismici dissipativi, e si riprendono sostanzialmente le indicazioni dell'AIJ, adattandole ad una formulazione agli stati limite, poiché la formulazione originale dell'AIJ era alle tensioni ammissibili.

Nel presente articolo si riportano le raccomandazioni del CIDECT circa le connessioni con *through*, *internal* e *external diaphragm*, con l'intento di fornire al progettista che voglia realizzare telai dissipativi

soggetti ad azioni sismiche che impiegano profili cavi tubolari come colonne, uno strumento pratico operativo per realizzare connessioni valide, qualificate certamente in un ambito normativo diverso da quello europeo (il che impone una certa cautela nell'inserire tali calcolazioni all'interno di calcoli svolti con gli Eurocodici), ma che appaiono tra le poche soluzioni progettuali di comprovata validità attualmente disponibili.

A) CONNESSIONI SALDATE IN OFFICINA CON THROUGH DIAPHRAGM

Questa connessione è illustrata nella figura 2.

Due piatti di spessore t_d maggiore dello spessore delle ali della trave di 3 - 6 mm sono saldati su due tronconi di colonna (in profilo cavo rettangolare, quadrato o circolare), mentre uno spezzone non irrigidito della stessa colonna, di altezza pari a quella della trave, viene posto in mezzo. La colonna è cioè interrotta due volte dai piatti che l'attraversano. Le saldature tra colonna e piatti sono del tipo a completa penetrazione con preparazione a V. La connessione della trave, è resa possibile saldando in officina un moncone di trave stessa alla colonna (figura 2b), con una saldatura a completa penetrazione tra ali della trave e piatti, ed una a cordoni d'angolo tra anima del moncone di trave e parete della colonna, e quindi collegando la trave in opera con giunti a doppio coprighiunto a completo ripristino.

B) CONNESSIONI BULLONATE CON THROUGH DIAPHRAGM

Questo tipo di connessione molto impiegata in Giappone, ha mostrato, dopo il terremoto di Kobe, parecchi danneggiamenti, soprattutto in prossimità delle saldature delle ali della trave con le piastre. Per migliorare il comportamento della connessione, evitando tali rotture fragili, e raggiungere il requisito di *drift* di interpiano di almeno 0,04 rad con non meno dell'80% della capacità portante della connessione (requisito alla base della qualifica delle connessioni sismiche della norma AISC 358-10), è stato modificato lo scantonamento dell'anima della trave dalla configurazione originaria (figura 3a), individuando 3 nuove disposizioni (figure 3b, 3c e 3d). Tutte e 3 le nuove configurazioni si sono dimostrate adatte a far raggiungere alla connessione i valori di *drift* sopra menzionati, mentre la configurazione originale non ha raggiunto tali valori che sporadicamente. La guida CIDECT raccomanda pertanto di adottare uno dei 3 dettagli migliorati. Da notare, nei dettagli di figura 3b e 3d che lo scantonamento parziale (figura 3b) o nullo (figura 3d) dell'anima richiede di impiegare piattini di sostegno a rovescio della saldatura interrotti in prossimità dell'anima della trave, mentre nel dettaglio di figura 3d la mancanza di scantonamento fa sì che l'anima trasmetta una quota parte di momento anche con i brevi tratti orizzontali direttamente saldati sui piatti della connessione. Nel realizzare le sandature a completa penetrazione tra ali della trave e piatti, si è trovato che la tecnica a passata multipla per

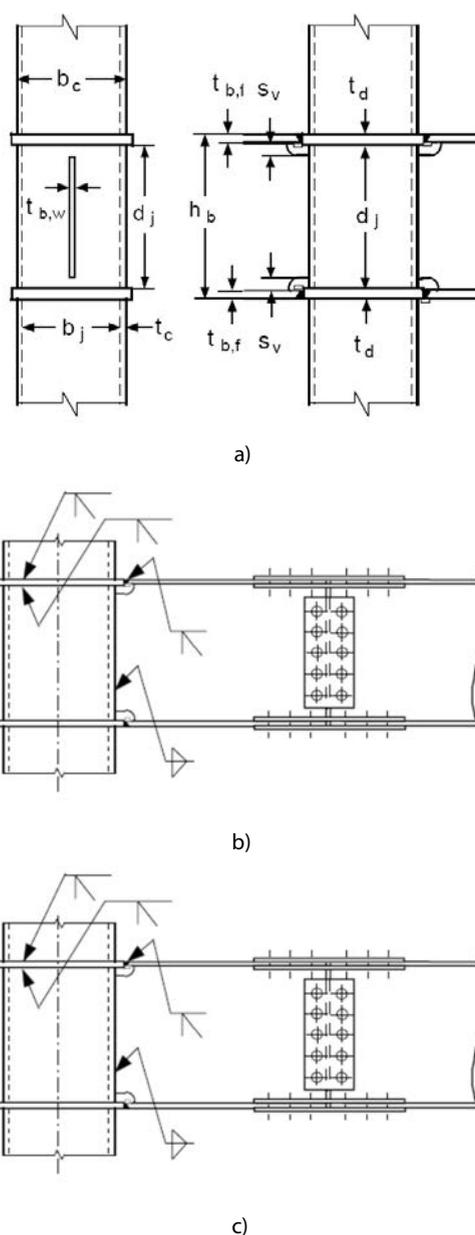


Fig. 2 - Connessione trave colonna con *through diaphragm*: parametri geometrici (a); particolare moncone di trave saldato in officina (b)

ogni strato (figura 4b) dà luogo a saldature più duttili di quelle realizzate con passata singola per ogni strato (figura 4a). Le prime sono pertanto da preferirsi.

Da notare infine che tali connessioni sono state testate con flange delle travi non maggiori di 32 mm e con rapporto luce/altezza della trave maggiore di 8. Entro questi limiti esse sono pertanto applicabili.

Vediamo adesso le regole di calcolo di questa connessione, secondo quanto riportato nella Design Guide 9 di CIDECT.

Affinchè possa formarsi una cerniera plastica nella trave, deve essere verificata la seguente relazione:

$$M_{j,cf*} \geq \alpha \cdot M_{pl,b} \quad (1)$$

Dove $M_{pl,b}$ è il momento plastico della trave, calcolato però con il coefficiente parziale di sicurezza γ_{M0} posto uguale all'unità. Quindi:

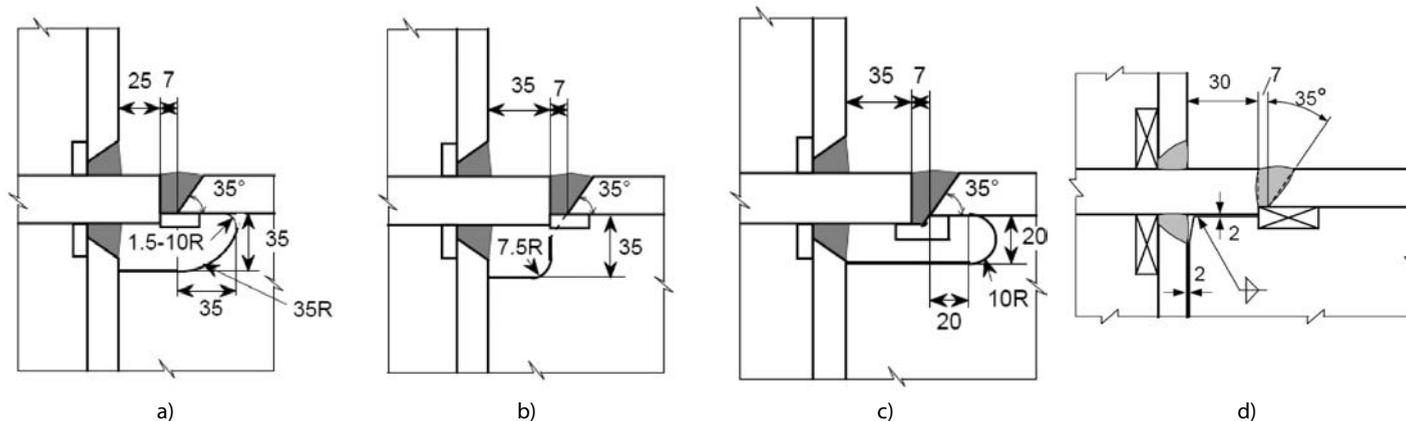


Fig. 3 – Scantonamento anima tradizionale (a); scantonamento anima migliorato tipo A (b), tipo B (c), tipo C (d)

$$M_{pl,b} = W_{pl,b} \cdot f_{yb} \quad (2)$$

$W_{pl,b}$ è il modulo plastico della trave e f_{yb} la tensione di snervamento dell'acciaio.

$M_{j,cf}^*$ è il momento resistente della connessione all'estradosso della colonna, e deve essere calcolato con la formula seguente:

$$M_{j,cf}^* = M_{b,f,u} + M_{b,w,u} \quad (3)$$

Tale momento dunque è dato dalla somma di due contributi: $M_{b,f,u}$ che è il momento ultimo portato dalla saldatura tra le flange della trave e i piatti saldati alla colonna, e $M_{b,w,u}$ che è il momento ultimo portato dalla giunzione saldata dell'anima con la colonna. I due momenti resistenti sono definiti come segue:

$$M_{b,f,u} = A_{b,f} (h_b - t_{b,f}) f_{ub} \quad (4)$$

$$M_{b,w,u} = m \cdot W_{pl,b,w,n} \cdot f_{yb} \quad (5)$$

Dove, nelle equazioni (4) e (5): $A_{b,f}$ è l'area della flangia della trave (che coincide con l'area della saldatura); f_{yb} e f_{ub} sono rispettivamente la tensione di snervamento e di rottura dell'acciaio della trave; $W_{pl,b,w,n}$ è il modulo plastico dell'anima della trave, calcolato tenendo conto della riduzione di sezione dovuto agli scantonamenti dell'anima, e perciò vale:

$$W_{pl,b,w,n} = \frac{1}{4} t_{b,w} (h_b - 2t_{b,f} - 2s_v)^2 \quad (6)$$

Il parametro m che compare nella (5) è un parametro adimensionale che riduce il momento resistente dell'anima della trave tenendo conto del fatto che l'anima va a deformare e snervare il pannello della colonna sul quale si salda, di dimensioni

$d_j = h_b - 2t_d$ per $b_j = b_c - 2t_c$. Tale parametro vale:

$$m = 4 \frac{t_c}{d_j} \sqrt{\frac{b_j \cdot f_{yc}}{t_{b,w} \cdot f_{yb}}} \leq 1,0 \quad (7)$$

Dove f_{yc} è la tensione di snervamento dell'acciaio della colonna.

Resta infine da definire il parametro α che compare nella (1) e che rappresenta chiaramente la sovreresistenza della trave sia per la sovreresistenza dell'acciaio sia per fenomeni di incrudimento. Il valore suggerito dalla guida CDECT è di 1,3.

Facciamo un piccolo esempio.

Supponiamo di voler collegare una trave HEA 450 in acciaio S275 ad una colonna tubolare quadrata 400 x 400 x 20 in S355. Sulla colonna saldiamo due piatti di spessore $t_d = 25$ mm.

I parametri geometrici e statici relativi alla trave sono: $t_{b,f} = 21$ mm, $b_{b,f} = 300$ mm, $t_{b,w} = 11,5$ mm, $h_b = 440$ mm, $A_{b,f} = 300 \times 21 = 6300$ mm², $W_{pl} = 3215,9$ cm³, $s_v = 35$ mm.

I parametri relativi alla colonna sono: $b_c = 400$ mm, $t_c = 20$ mm.

Il momento ultimo portato dalla saldatura delle flange della trave (eq. (4)) è:

$$M_{b,f,u} = A_{b,f} (h_b - t_{b,f}) f_{ub} = 6300 \times (400 - 21) \times 430 \cdot 10^{-6} = 1135,1 \text{ kNm}$$

Il modulo plastico dell'anima (eq. (6)) risulta:

$$W_{pl,b,w,n} = \frac{1}{4} t_{b,w} (h_b - 2t_{b,f} - 2s_v)^2 = \frac{1}{4} \times 11,5 \times (440 - 2 \times 21 - 2 \times 35)^2 \cdot 10^{-3} = 309,3 \text{ cm}^3$$

Il parametro m (eq. (7)) vale:

$$b_j = h_c - 2t_c = 400 - 2 \times 20 = 360 \text{ mm}$$

$$d_j = h_b - 2t_d = 440 - 2 \times 25 = 390 \text{ mm}$$

$$m = 4 \frac{t_c}{d_j} \sqrt{\frac{b_j \cdot f_{yc}}{t_{b,w} \cdot f_{yb}}} = 4 \times \frac{20}{390} \sqrt{\frac{360 \times 355}{11,5 \times 275}} = 1,30 \rightarrow 1,00$$

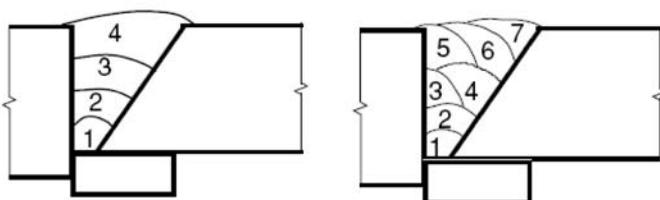


Fig. 4 – Saldatura a passata singola per ogni strato (a), e a passata multipla per ogni strato (b)

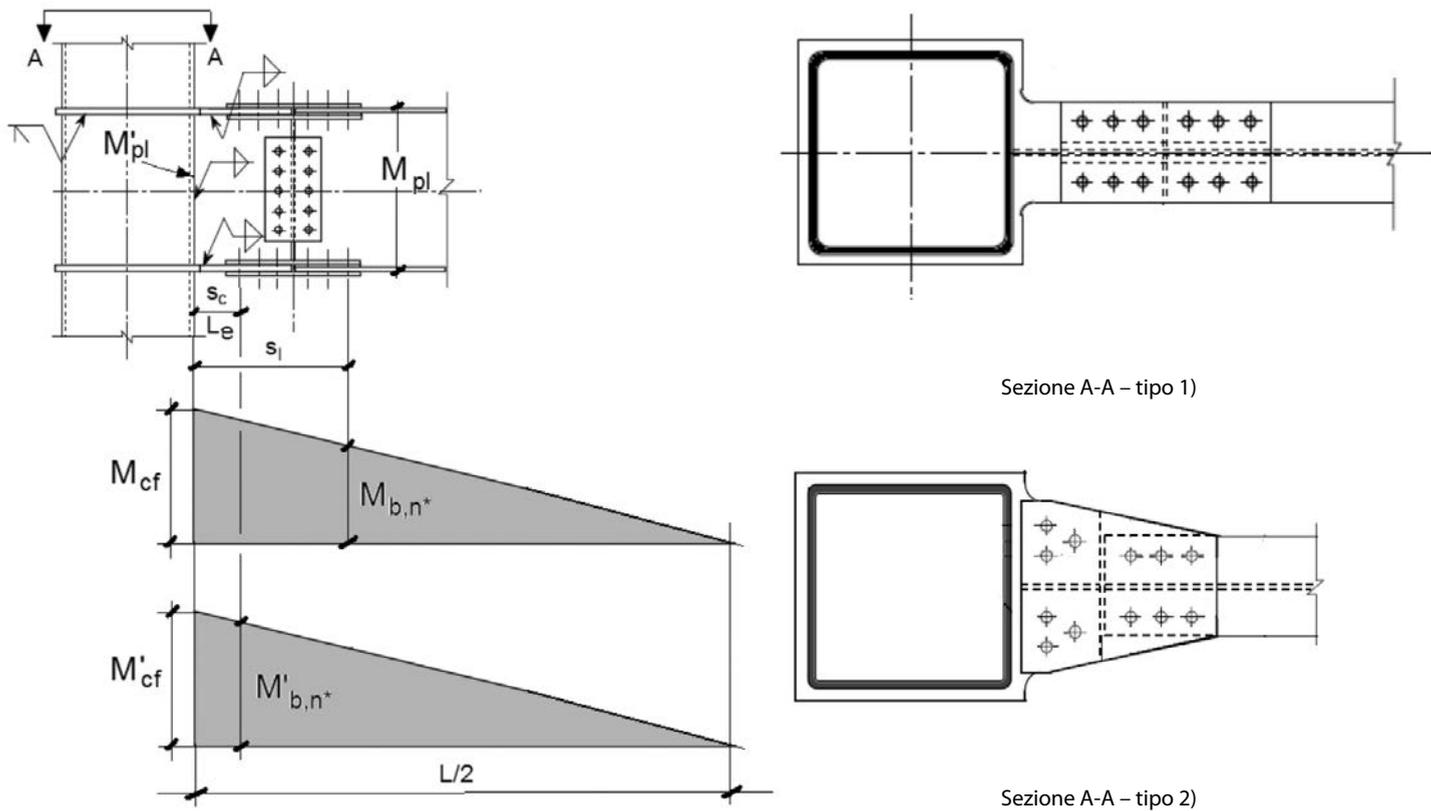


Fig. 5 – Connessioni bullonate con *through diaphragm*

Adesso possiamo calcolare il momento ultimo portato dall'anima (eq. (5)):

$$M_{b,w,u} = m \cdot W_{pl,b,w,n} \cdot f_{yb} = 1,00 \times 309,3 \times 275 \cdot 10^{-3} = 85,6 \text{ kNm}$$

Il momento resistente all'estradosso della colonna sarà allora (eq. (3)):

$$M_{j,cf*} = M_{b,f,u} + M_{b,w,u} = 1135,1 + 85,6 = 1220,7 \text{ kNm}$$

E infine verifichiamo l'eq. (1):

$$M_{j,cf*} = 1220,7 \text{ kNm} \geq \alpha \cdot M_{pl,b} = 1,3 \times (3215,9 \times 275 \cdot 10^{-3}) = 1149,7 \text{ kNm OK}$$

Questo tipo di connessione è una variante di quella precedentemente illustrata, che presentava piastre che interrompono la colonna alle quali si saldava un tronchetto di trave in officina o l'intera trave in opera. Qui invece i *through diaphragm* si estendono al di fuori della colonna quanto necessario per alloggiare i fori dei bulloni coi quali connettere, in opera, la trave (figura 5).

Che differenza c'è tra il tronchetto saldato e poi bullonato alla trave di figura 2b e la disposizione di figura 5? Nel tronchetto di figura 2b la cerniera plastica si forma a sinistra del giunto bullonato, a ridosso della sezione di saldatura della trave sui *through diaphragm*; invece

nella disposizione di figura 5 la cerniera plastica si forma a destra del giunto bullonato. In quest'ultimo caso il giunto bullonato deve essere sovraresistente rispetto al momento plastico della trave tenendo anche conto delle dovute sovraresistenze, come vedremo nel seguito, mentre nel caso di figura 2b il giunto tronchetto/trave sarà soltanto (si fa per dire) a completo ripristino.

Ma torniamo al giunto bullonato. La parte di piastra che si estende dalla colonna può avere la stessa larghezza della trave a cui si connette (figura 5, sezione A-A tipo 1) oppure essere rastremata (figura 5, sezione A-A tipo 2). Nel primo caso lo spessore dovrà necessariamente essere maggiore di quello delle ali della trave, al fine di rendere il nodo più robusto della trave e consentire la formazione della cerniera plastica nella trave stessa; nel secondo caso, avendo la piastra maggior larghezza lo spessore può essere mantenuto identico.

La connessione, come già detto, deve consentire alla trave di sviluppare il momento plastico M_{pl} in una sezione immediatamente fuori dal giunto (vedi figura 5, a sinistra). Per ottenere ciò occorre verificare la resistenza di 3 sezioni critiche: a) la sezione della trave, indebolita dai fori, in corrispondenza della fila di bulloni più lontana dalla colonna; b) la sezione formata dai *through diaphragm*, anch'essa indebolita dai fori, in corrispondenza della fila di bulloni più vicina alla colonna; c) la sezione dei *through diaphragm* all'estradosso della colonna, non indebolita dai fori. Occorrerà poi ovviamente verificare che i piatti di coprigiunto siano più robusti degli elementi

che collegano. Vediamo quindi nel dettaglio la procedura di calcolo proposta dalla guida del CIDECT.

Si valuta per prima cosa il momento flettente ultimo M_{b,n^*} che è in grado di portare la sezione della trave in prossimità della fila di bulloni più lontana dalla colonna:

$$M_{b,n^*} = \left(b_{b,f} - \frac{n}{2} d_h \right) \cdot t_{b,f} \cdot (h_b - t_{b,f}) f_{ub} + (h_b - 2t_{b,f} - x) \cdot x \cdot t_{b,w} \cdot f_{yb} \quad (8)$$

Dove:

$$x = \frac{h_b - 2t_{b,f}}{2} - \frac{n \cdot d_h}{2} \cdot \frac{t_{b,f} \cdot f_{ub}}{t_{b,w} \cdot f_{yb}} \quad (9)$$

Il significato dei simboli è il seguente: n è il numero di bulloni per fila trasversale, d_h è il diametro del foro dei bulloni, $b_{b,f}$ e $t_{b,f}$ sono rispettivamente larghezza e spessore dell'ala della trave, h_b è l'altezza della trave, $t_{b,w}$ è lo spessore dell'anima, f_{yb} e f_{ub} sono rispettivamente la tensione di snervamento e di rottura dell'acciaio della trave.

Le formule precedenti valutano tale momento ultimo ignorando la deduzione dei fori dei bulloni dell'ala compressa.

Per garantire la formazione della cerniera plastica nella trave occorrerà rispettare la seguente condizione:

$$M_{b,n^*} \geq 1,2 M_{pl} \quad (10)$$

Nella (10) il coefficiente di sovreresistenza è limitato a 1,2 mentre il valore suggerito per la (1) era di 1,3. La riduzione in questo caso è motivata dal fatto che il giunto bullonato partecipa alla rotazione inelastica del nodo.

Qual è il momento M_{cf} che occorre essere in grado di sopportare nella sezione di estradosso della colonna al fine di poter portare M_{b,n^*} ? Ipotizzando che la trave, lunga L , abbia un andamento dei momenti "a farfalla" con punto di nullo in mezzzeria (vedi figura 5 a sinistra), allora tale momento vale:

$$M_{cf} = \frac{L/2}{L/2 - s_l} M_{b,n^*} \quad (11)$$

Dove s_l è la distanza dell'ultima fila di bulloni dall'estradosso della colonna.

Tale momento può essere effettivamente sopportato se esso risulta inferiore o uguale al minimo tra: a) il momento ultimo M'_{pl} della sezione formata dai piatti sull'estradosso della colonna; b) il momento ultimo M'_{cf} su tale sezione di estradosso della colonna compatibile col momento ultimo M'_{b,n^*} della sezione in corrispondenza della fila di bulloni più vicina alla colonna.

Il momento ultimo M'_{pl} si calcola come:

$$M'_{pl} = M_{d,f,u} + M_{d,w,u} \quad (12)$$

$$M_{d,f,u} = (b_d - n \cdot d_h) \cdot t_d \cdot (h_b - t_d) \cdot f_{ud} \quad (13)$$

$$M_{d,w,u} = m \cdot W_{pl,d,w,n} \cdot f_{yd} + L_e t_{d,w} (h_b - 2t_d) f_{ud} / \sqrt{3} \quad (14)$$

$$m = 4 \frac{t_c}{(h_b - 2t_d)} \sqrt{\frac{(b_c - 2t_c) \cdot f_{yc}}{t_{d,w} \cdot f_{yd}}} \leq 1,0 \quad (15)$$

$$W_{pl,d,w,n} = \frac{1}{4} t_{d,w} (h_b - 2t_d)^2 \quad (16)$$

Il momento ultimo M'_{pl} come si vede è la somma di due contributi: quello dei due *through diaphragm*, eq. (13), che lavorano a trazione e compressione, e quello del piatto verticale che riprende l'anima della trave, eq. (14), che lavora a flessione e taglio. Nell'eq. (13) la deduzione dell'area dei fori è fatta su entrambe le flange, per semplificare l'equazione.

Il significato dei simboli è il seguente: t_d e b_d sono rispettivamente, spessore e larghezza dei *through diaphragm*; t_c e b_c sono rispettivamente, spessore e larghezza della colonna tubolare; $t_{d,w}$ è lo spessore del piatto verticale che collega i *through diaphragm*, f_{yc} è lo snervamento dell'acciaio della colonna; f_{yd} e f_{ud} sono rispettivamente lo snervamento e la rottura dell'acciaio dei *through diaphragm*; L_e è la lunghezza orizzontale sulla quale avviene la rottura per taglio del piatto verticale (e che in pratica viene fatta coincidere con s_l distanza tra l'estradosso colonna e la prima fila di bulloni).

Il momento ultimo M'_{cf} si calcola come:

$$M'_{cf} = \frac{L/2}{L/2 - s_c} M'_{b,n^*} \quad (17)$$

$$M'_{b,n^*} = \left(b_d - \frac{n}{2} d_h \right) \cdot t_d \cdot (h_b - t_d) f_{ud} + (h_b - 2t_d - x) \cdot x \cdot t_{d,w} \cdot f_{yd} \quad (18)$$

$$x = \frac{h_b - 2t_d}{2} - \frac{n \cdot d_h}{2} \cdot \frac{t_d \cdot f_{ud}}{t_{d,w} \cdot f_{yd}} \quad (19)$$

Quindi, come si vede, M'_{cf} e M'_{b,n^*} si calcolano in analogia a M_{cf} e M'_{b,n^*} spostandosi dalla sezione in corrispondenza all'ultima fila di bulloni a quella in corrispondenza della prima fila di bulloni, e tenendo conto che la sezione non è più quella della trave ma quella dei *through diaphragm*.

Deve quindi essere verificato che:

$$\min \{ M'_{pl}; M'_{cf} \} \geq M_{cf} \quad (20)$$

Occorre poi verificare il giunto bullonato.

Si calcola la resistenza a taglio del singolo bullone e quella a rifollamento. Nel calcolo della resistenza a rifollamento la guida CIDECT consente di porre il coefficiente $\gamma_{M2} = 1$, mentre occorre lasciarlo = 1,25 nel calcolo della resistenza a taglio. La riduzione è giustificata dal fatto che il rifollamento è un meccanismo di collasso duttile

mentre la rottura per taglio è fragile. Ciò è in linea con le procedure di calcolo delle connessioni prequalificate dell'AISC 358-10, dove vengono aumentati, rispetto ai casi statici, i coefficienti di sicurezza ϕ relativi ai modi di collasso duttili (i coefficienti di sicurezza ϕ delle AISC sono minori di 1 e vanno a moltiplicare, mentre i coefficienti γ_{Mx} degli Eurocodici sono maggiori di 1 e vanno a dividere, quindi l'aumento dei primi corrisponde ad una riduzione dei secondi).

Nel calcolo del momento flettente portato dalla bullonatura la guida consente di tener conto dei bulloni d'anima periferici, mentre quelli centrali sono adibiti a sostenere le azioni di taglio.

Calcolato quindi il momento flettente ultimo M_{bs^*} portato dalla bullonatura e riferito al baricentro della bullonatura stessa (cioè al punto di mezzo dell'aria che c'è tra trave e piastre), detta d la distanza tra estradosso colonna e baricentro della bullonatura, si calcola il momento ultimo all'estradosso colonna M_{bs,cf^*} compatibile con M_{bs^*} e si verifica che sia maggiore o uguale a M_{cf} :

$$M_{bs,cf^*} = \frac{L/2}{L/2-d} M_{bs^*} \geq M_{cf} \quad (21)$$

Il calcolo di M_{bs^*} è ovvio e non lo riportiamo qui.

Facciamo un esempio.

Supponiamo di dover collegare una IPE 500 in S235 ad una colonna tubolare quadra 400 x 400 x 16. Usiamo come *through diaphragm* piatti della stessa larghezza delle ali dell'IPE (cioè 200 mm) ma di spessore maggiore, pari a 20 mm. Parametri geometrici e statici: $b_{bf} = b_d = 200$ mm, $t_{bf} = 16$ mm, $h_b = 500$ mm, $t_{wf} = 10,2$ mm, $t_d = 20$ mm, $t_{d,w} = 10$ mm, $s_c = L_e = 70$ mm, $s_f = 420$ mm, $d = 245$ mm, $b_c = 400$ mm, $t_c = 16$ mm, $f_{yb} = f_{yd} = 235$ N/mm², $f_{yc} = 275$ N/mm², $f_{ub} = f_{ud} = 360$ N/mm², $W_{pl} = 2194$ cm³ (modulo plastico dell'IPE 500), $n = 2$, $d_h = 21$ mm, $L = 7600$ mm.

Momento plastico della trave (con $\gamma_{M0} = 1$):

$$M_{pl,b} = W_{pl,b} \cdot f_{yb} = 2194 \times 235 \cdot 10^{-3} = 515,6 \text{ kNm}$$

Calcolo del momento ultimo nella sezione sulla fila di bulloni più distante dalla colonna:

$$\begin{aligned} x &= \frac{h_b - 2t_{bf}}{2} - \frac{n \cdot d_h}{2} \cdot \frac{t_{bf} \cdot f_{ub}}{t_{b,w} \cdot f_{yb}} = \\ &= \frac{500 - 2 \times 16}{2} - \frac{2 \times 21}{2} \times \frac{16 \times 360}{10,2 \times 235} = \\ &= 165,7 \text{ mm} = 183,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{b,n^*} &= \left(b_{bf} - \frac{n}{2} d_h \right) \cdot t_{bf} \cdot (h_b - t_{bf}) f_{ub} + \\ &+ (h_b - 2t_{bf} - x) \cdot x \cdot t_{b,w} \cdot f_{yb} = \\ &= \left[\left(200 - \frac{2}{2} \times 21 \right) \times 16 \times (500 - 16) \times 360 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ (500 - 2 \times 16 - 183,5) \times 183,5 \times 10,2 \times 235 \cdot 10^{-6} \\ &= 624,2 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{b,n^*} &= 624,2 \text{ kNm} \geq 1,2 \times M_{pl} = \\ &= 1,2 \times 515,6 = 618,7 \text{ kNm} \quad \text{OK} \end{aligned}$$

Calcolo del momento M_{cf} che occorre essere in grado di sopportare nella sezione di estradosso della colonna:

$$M_{cf} = \frac{L/2}{L/2-s_f} M_{b,n^*} = \frac{7600/2}{7600/2-420} \times 624,2 = 701,7 \text{ kNm}$$

Calcolo del momento ultimo M'_{pl} della sezione formata dai piatti sull'estradosso della colonna:

$$\begin{aligned} W_{pl,d,w,n} &= \frac{1}{4} t_{d,w} (h_b - 2t_d)^2 = \frac{1}{4} \times 10 \times (500 - 2 \times 20)^2 = \\ &= 529\,000 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$m = 4 \frac{t_c}{(h_b - 2t_d)} \sqrt{\frac{(b_c - 2t_c) \cdot f_{yc}}{t_{d,w} \cdot f_{yd}}} =$$

$$\begin{aligned} &= 4 \times \frac{16}{(500 - 2 \times 20)} \sqrt{\frac{(400 - 2 \times 16) \times 275}{10 \times 235}} = \\ &= 0,913 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{d,f,u} &= (b_d - n \cdot d_h) \cdot t_d \cdot (h_b - t_d) \cdot f_{ud} = \\ &= (200 - 2 \times 21) \times 20 \times (500 - 20) \times 360 \cdot 10^{-6} \\ &= 546 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{d,w,u} &= m \cdot W_{pl,d,w,n} \cdot f_{yd} + L_e t_{d,w} (h_b - 2t_d) f_{ud} / \sqrt{3} = \\ &= 0,913 \times 529\,000 \times 235 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 70 \times 10 \times (500 - 2 \times 20) \times 360 / \sqrt{3} \cdot 10^{-6} = \\ &= 180,4 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M'_{pl} = M_{d,f,u} + M_{d,w,u} = 546 + 180,4 = 726,4 \text{ kNm}$$

Calcoliamo il momento ultimo M'_{cf} :

$$\begin{aligned} x &= \frac{h_b - 2t_d}{2} - \frac{n \cdot d_h}{2} \cdot \frac{t_d \cdot f_{ud}}{t_{d,w} \cdot f_{yd}} = \\ &= \frac{500 - 2 \times 20}{2} - \frac{2 \times 21}{2} \times \frac{20 \times 360}{10 \times 235} = \\ &= 165,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

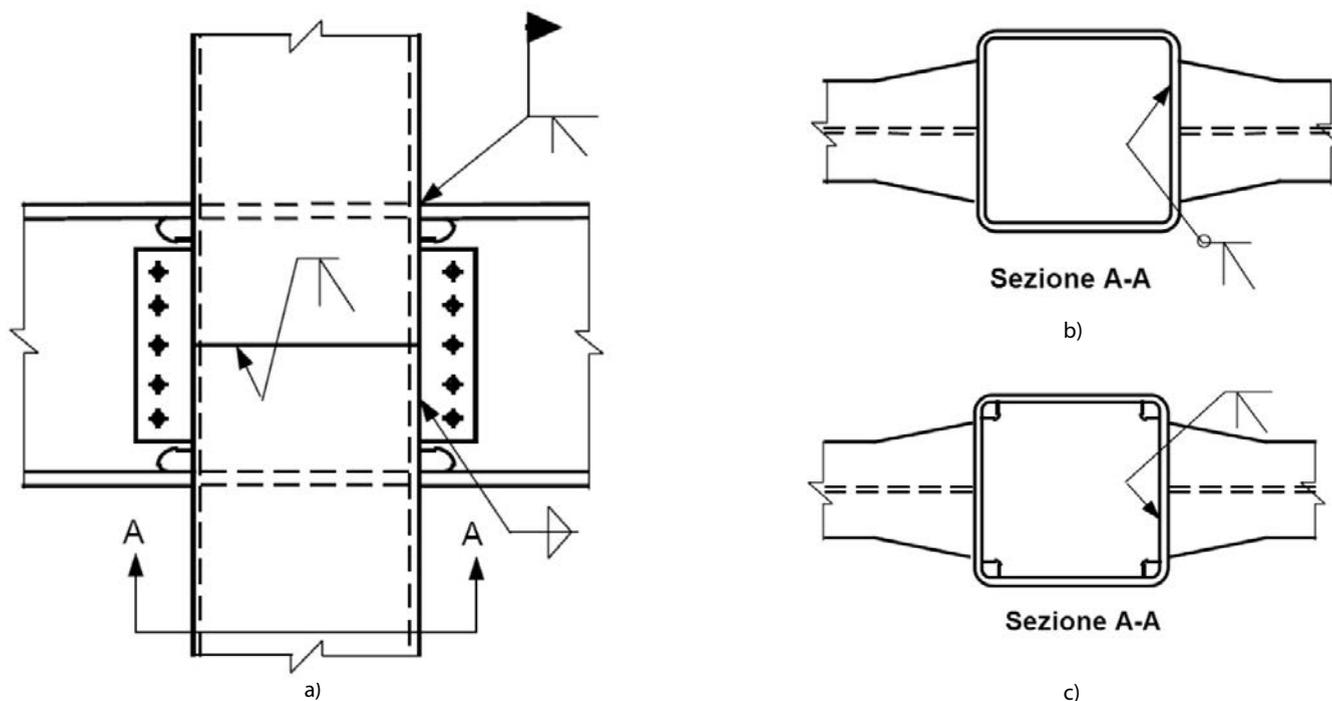


Fig. 6 – Connessione con *internal diaphragm*: a) vista laterale, b) sezione in pianta con diaframma esteso sugli spigoli, c) sezione con diaframma non esteso sugli spigoli

$$\begin{aligned}
 M'_{b,n^*} &= \left(b_d - \frac{n}{2} d_h \right) \cdot t_d \cdot (h_b - t_d) f_{ud} + (h_b - 2t_d - x) \cdot x \cdot t_{d,w} \cdot f_{yd} = \\
 &= \left(200 - \frac{2}{2} \times 21 \right) \times 20 \times (500 - 20) \times 360 \cdot 10^{-6} + \\
 &+ (500 - 2 \times 20 - 165,7) \times 165,7 \times 10 \times 235 \cdot 10^{-6} = 733,2 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M'_{cf} &= \frac{L/2}{L/2 - s_c} M'_{b,n^*} = \frac{7600/2}{7600/2 - 70} \times 733,2 = 747 \text{ kNm} \\
 \min \{ M'_{pl}; M'_{cf} \} &= \min \{ 726,4; 747 \} = \\
 &= 726,4 \geq M_{cf} = 701,7 \text{ kNm OK}
 \end{aligned}$$

La verifica del giunto bullonato è nota e non la riportiamo.

C) CONNESSIONI CON INTERNAL DIAPHRAGM

Le connessioni con *through diaphragm* interrompono la colonna due volte per ogni giunto. Quelle invece con *internal diaphragm* (figura 6a) richiedono una sola divisione della colonna. I diaframmi vanno saldati dall'estremità dei due tratti di colonna e pertanto vanno saldati da una parte sola, con preparazione a V e piattino di sostegno a rovescio. I diaframmi in un primo tempo avevano la sagoma mostrata in figura 6b, cioè erano saldati anche sugli spigoli. Si è poi preferito adottare la sagoma di figura 6c perché parecchi difetti di saldatura erano stati osservati proprio lungo gli spigoli. La saldatura di questi diaframmi interni è comunque molto delicata, richiede grande abilità e preferibilmente l'adozione di pro-

cedure automatiche studiate allo scopo.

Il dettaglio migliorato suggerito per la saldatura trave-colonna è mostrato in figura 7.

Per migliorare la capacità flessionale di queste connessioni, invece che saldare la trave direttamente sulla colonna (figura 6a), è possibile connetterla mediante due *cover plate*, cioè due piatti saldati in officina sulla colonna in corrispondenza alle ali della trave che viene poi saldata ad essi in opera (figura 8). Questo tipo di connessioni, su colonna ad H però, sono state testate estesamente nell'ambito della campagna di prove AISC per le connessioni prequalificate, e non hanno mostrato doti sufficienti di duttilità per essere annoverate tra le connessioni prequalificate dell'AISC 358-10. Le stesse conclusioni, a detta della guida CIDECT, possono essere estese alla connessione con *cover plate* su colonna tubolare, di cui stiamo parlando.

Per queste ragioni, le connessioni più adatte per essere impiegate in telai dissipativi sono quelle con *through diaphragm*, di cui abbiamo già detto, e quelle con *external diaphragm*, di cui parleremo in avanti.

D) CONNESSIONI CON EXTERNAL DIAPHRAGM

Le connessioni trave colonna tubolare con *through diaphragm* sono molto efficienti ma richiedono delle lavorazioni particolarmente accurate nella realizzazioni delle saldature tra i monconi della colonna ed i piatti, saldature che possono essere eseguite in modo sicuro ed affidabile solo con metodi automatizzati. Visto il largo impiego di tali connessioni, in Giappone molte carpenterie sono in grado di realizzarle in modo sicuro. Per le carpenterie non attrezzate per

tali tipi di dettagli risulta più semplice realizzare connessioni con piatti esterni (*external diaphragm*) che sono altrettanto efficienti ed ampiamente usate sia in Giappone che in altri Paesi.

La connessione raccomandata da AIJ è quella rappresentata schematicamente in figura 9a. I piatti, superiore ed inferiore, che circondano la colonna sono sagomati come illustrato e connessi mediante saldature a completa penetrazione. In figura 9a sono indicati i punti critici, gli angoli rientranti tra gli elementi che compongono il piatto e tra questo e l'ala della trave, ove nelle prove sperimentali sono apparse più probabili le fratture. Angoli più acuti di quelli mostrati in figura 10 sono da evitare.

La connessione di figura 9b è una alternativa alla precedente, sviluppata successivamente da altri ricercatori, e realizzata con cordoni d'angolo senza apprezzabili diminuzioni di duttilità.

Veniamo dunque ad illustrare la procedura di calcolo suggerita dalla guida CIDECT, derivata dalle raccomandazioni AIJ e sviluppata per connessioni con trave saldata (o con moncone di trave saldato, al quale poi si bullona la trave).

Si deve verificare che:

$$M_{j,cf*} \geq M_{cf} = \frac{L/2}{L/2 - L_h} (1,2 M_{pl}) \quad (22)$$

Cioè la resistenza a flessione della connessione $M_{j,cf*}$ deve essere non inferiore alla resistenza richiesta all'estradosso della colonna M_{cf} che deriva dal momento plastico della trave M_{pl} aumentato del coefficiente di sovrarresistenza posto uguale a 1,2. Il parametro L_h rappresenta la distanza tra l'estradosso della colonna e la sezione di saldatura della trave (o del moncone di trave).

La resistenza a flessione della connessione $M_{j,cf*}$ si calcola con la seguente formula:

$$M_{j,cf*} = P_{b,f*} \cdot (h_b - t_{b,f}) \quad (23)$$

Dove $P_{b,f*}$ è l'azione massima che può transitare nei diaframmi (e quindi nelle ali della trave) ed è data dalle formule seguenti:

a) Connessione su colonna circolare (figura 10a):

$$P_{b,f*} = 19,6 \left(\frac{d_c}{t_c}\right)^{-1,54} \cdot \left(\frac{h_d}{d_c}\right)^{0,14} \cdot \left(\frac{t_d}{t_c}\right)^{0,34} \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot f_{yc} \quad (24)$$

I simboli sono definiti in figura 10a, e f_{yc} è la tensione di snervamento dell'acciaio della colonna.

Valgono le seguenti limitazioni:

$$14 \leq \frac{d_c}{t_c} \leq 36; \quad 0,05 \leq \frac{h_d}{d_c} \leq 0,14; \quad 0,75 \leq \frac{t_d}{t_c} \leq 2; \quad \theta \leq 30^\circ$$

b) Connessione su colonna quadrata (figura 10b):

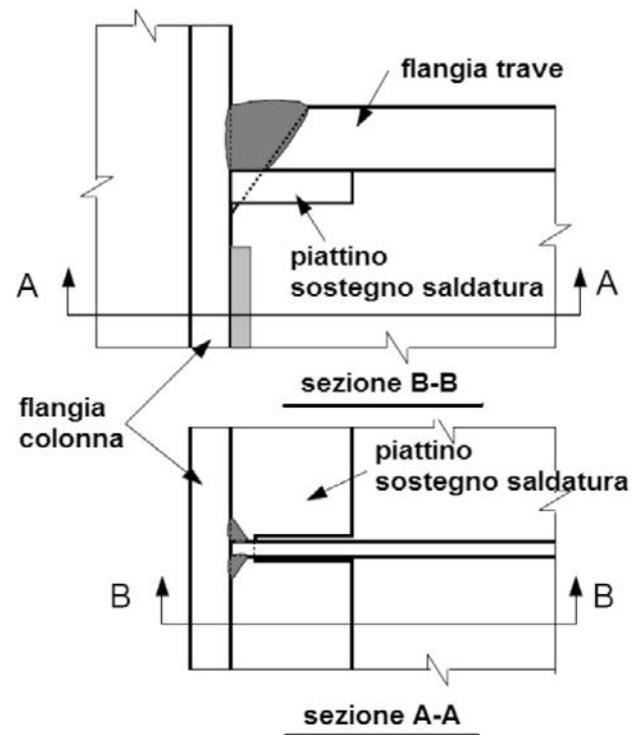


Fig. 7 - Dettaglio migliorato saldatura trave - colonna

$$P_{b,f*} = 3,17 \left(\frac{t_c}{b_c}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{t_d}{b_c}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{t_c + h_d}{b_c}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot b_c^2 \cdot f_{ud} \quad (25)$$

$$\frac{b_c/2 + h_d}{t_d} \leq \frac{240}{\sqrt{f_{yd}}} \quad (26)$$

Valgono le seguenti limitazioni:

$$17 \leq \frac{b_c}{t_c} \leq 67; \quad 0,07 \leq \frac{h_d}{b_c} \leq 0,4; \quad 0,75 \leq \frac{t_d}{t_c} \leq 2; \quad \theta \leq 30^\circ$$

Le formule (24) e (25) sono state ricavate, ripetiamolo, in seguito a sperimentazione su connessioni con trave saldata, quindi dove la cerniera plastica si forma a ridosso della sezione di saldatura tra trave (o moncone di trave) e piatti esterni della connessione. Ulteriori sperimentazioni, informa la guida CIDECT, hanno dimostrato che tali formule possono essere mantenute anche per connessioni bullonate direttamente sui piatti, come quella schematicamente mostrata in figura 9b. In tal caso è logico ipotizzare che la cerniera plastica si formi a destra della connessione bullonata, dopo cioè l'ultima fila di bulloni più distante dalla colonna, così come si ipotizza per le connessioni con *through diaphragm*. Pertanto, in analogia alla procedura di calcolo per connessioni con *through diaphragm* bullonate, anche se, ripetiamo, la guida CIDECT non precisa, sembrerebbe logico modificare la (22) nel modo seguente:

$$M_{j,cf*} \geq M_{cf} = \frac{L/2}{L/2 - L'_h} (M_{b,n*}); \quad M_{b,n*} \geq 1,2 M_{pl} \quad (27)$$

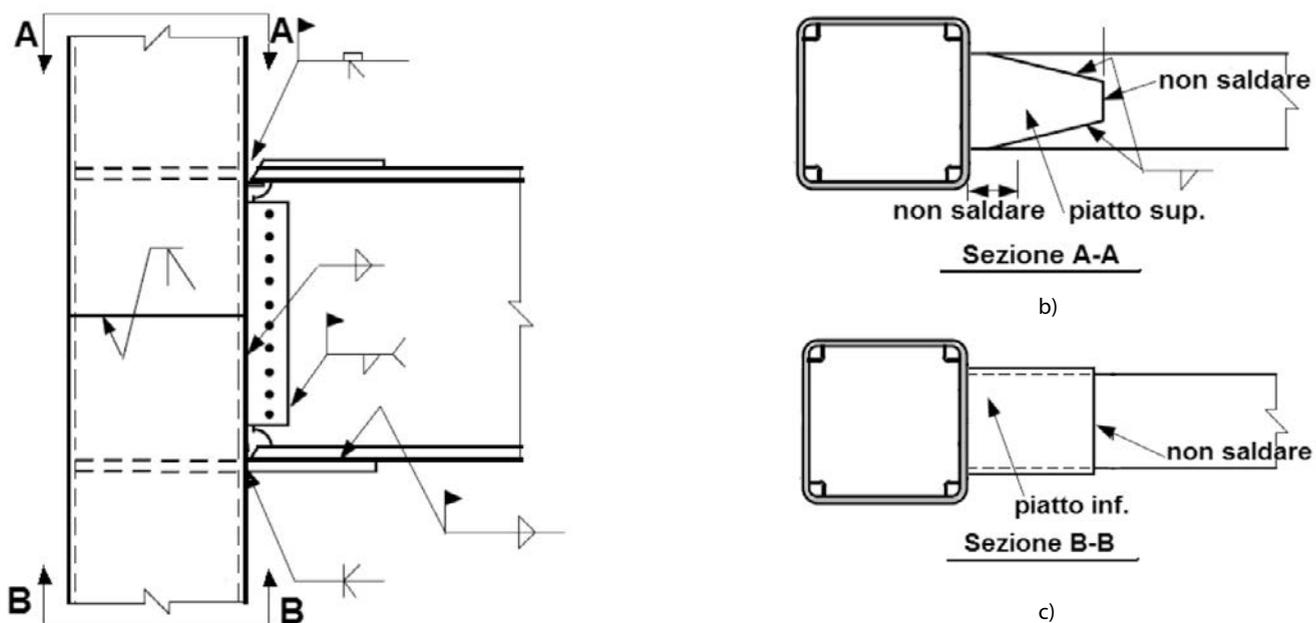


Fig. 8- Connessione con *internal diaphragm* e *cover plate*: a) vista laterale, b) sezione in pianta con *cover plate* superiore, c) sezione con *cover plate* inferiore

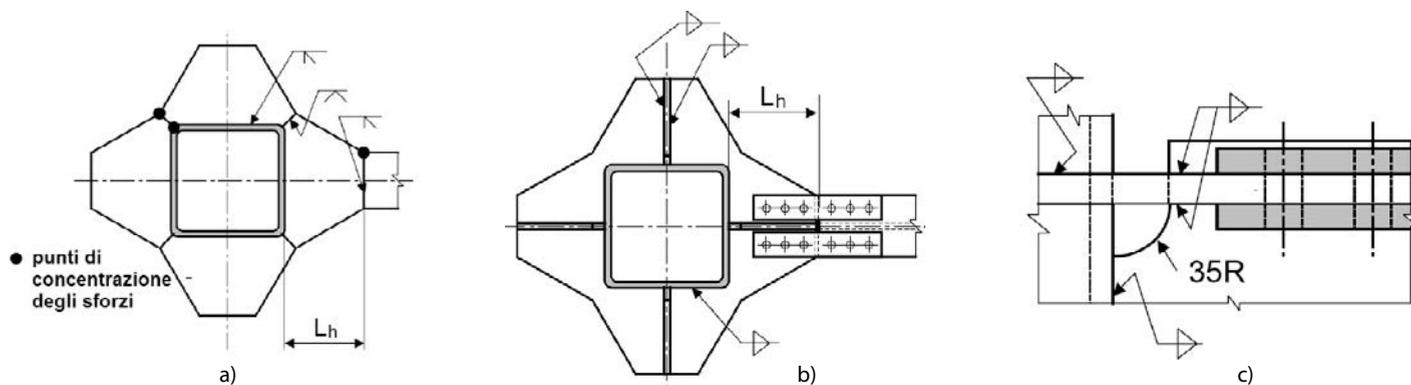


Fig. 9 - a) connessione con *external diaphragm* suggerita da AII; b) nuova possibile connessione con *external diaphragm*; c) dettaglio tipico della saldatura relativo a b)

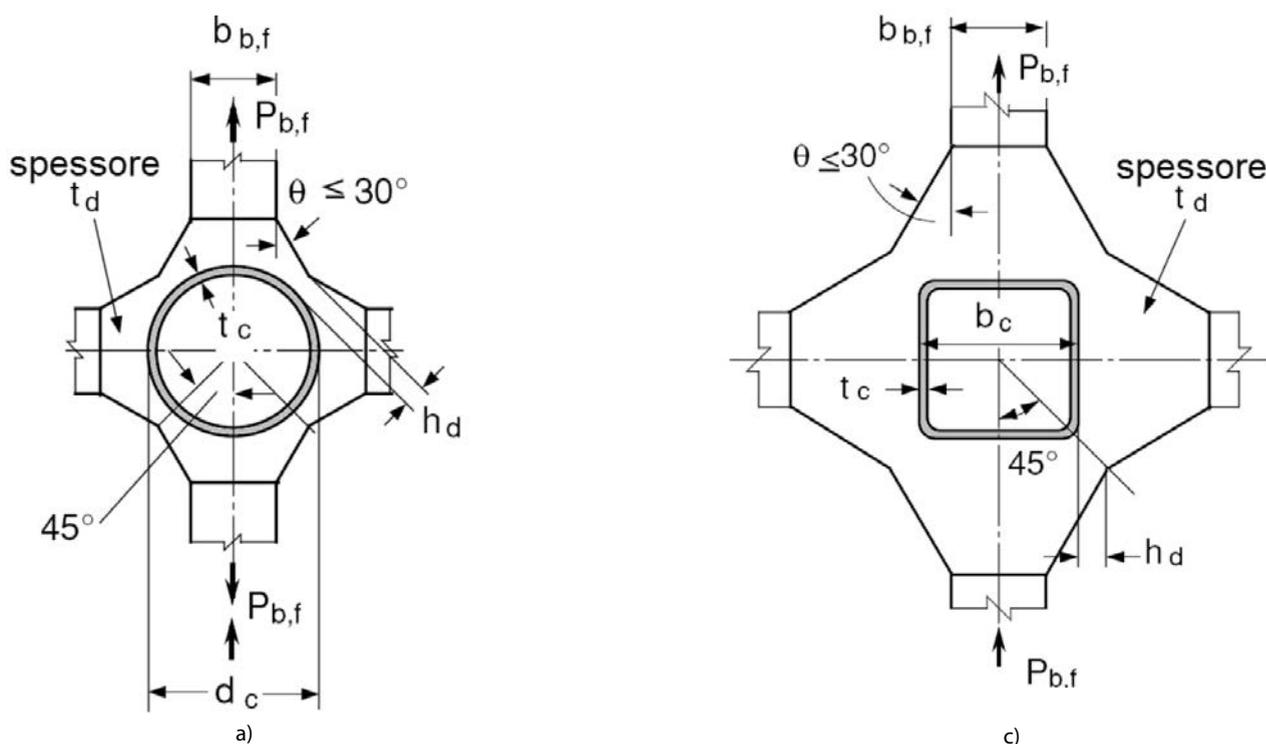


Fig. 10 - a) disposizione geometrica per *external diaphragm* su colonna circolare; b) su colonna quadrata

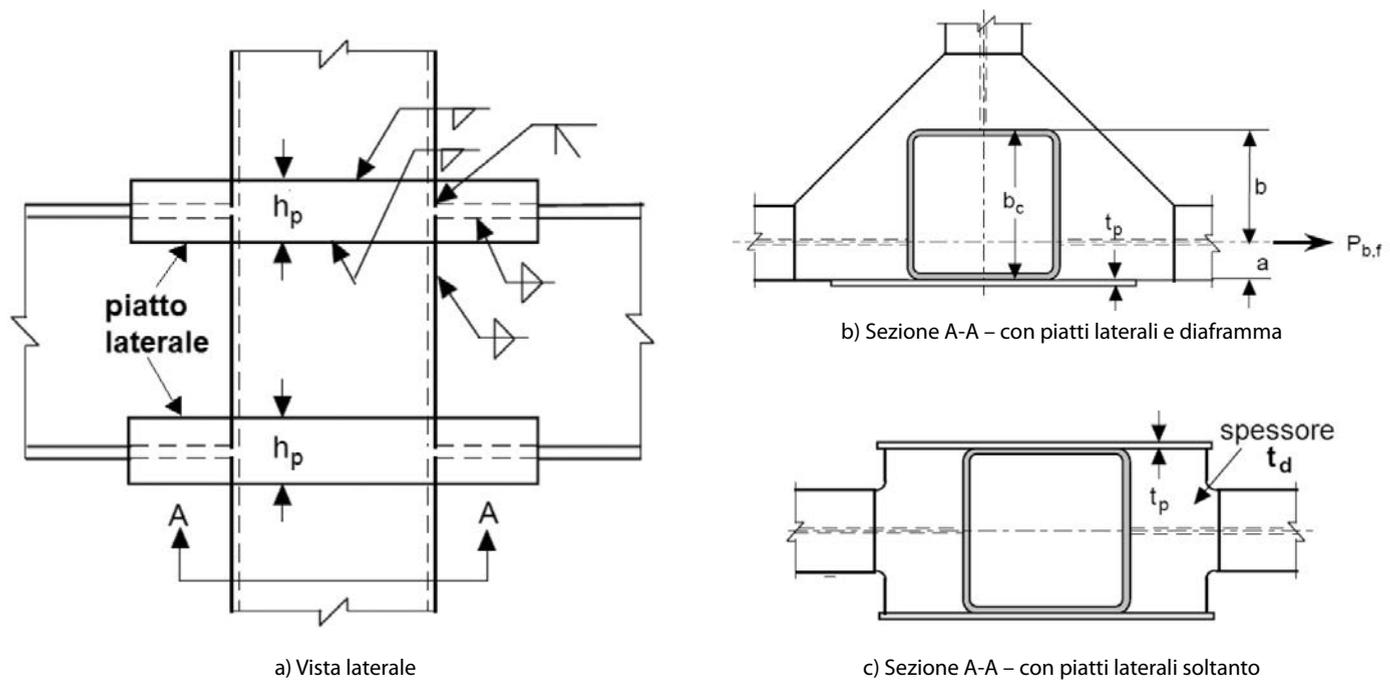


Fig. 11 – Connessioni con *external diaphragm* e piatti laterali

Cioè, calcolato M_{pl} , occorre calcolare il momento massimo $M_{b,n*}$ che può portare la sezione della trave in prossimità della fila di bulloni più lontana dalla colonna, e ciò lo si fa mediante le formule (8) e (9). Si deve quindi garantire che tale momento sia non inferiore al momento plastico della trave aumentato del coefficiente di sovrarresistenza. Poi si calcola M_{cf} compatibile con $M_{b,n*}$ usando la distanza L_{jh} tra l'estradosso colonna e la fila di bulloni più lontana dalla colonna, e quindi si verifica che esso non superi il momento resistente della connessione $M_{j,cf*}$ sempre calcolato con le (23), (24) e (25).

È infine possibile che, per ragioni geometriche, non sia possibile realizzare i diagrammi esterni sui 4 lati della colonna: può essere il caso di una colonna di estremità (figura 11b), o di una colonna che fa telaio in una direzione soltanto (figura 11c). In questi casi è possibile sostituire i piatti che fanno da *external diaphragm* con piatti laterali, come mostrato schematicamente in figura 11a.

Nel caso di piatti laterali su entrambi i lati (Figura 11c) la guida CIDECT propone la seguente formula empirica per calcolare la resistenza $P'_{b,f*}$ della connessione, al posto del valore $P'_{b,f*}$ dell'eq. (25):

$$P'_{b,f*} = P_{p,u} = 2h_p t_p f_{up} + 2(\beta t_c + t_d) t_c f_{uc} \quad (28)$$

Dove h_p e t_p sono rispettivamente altezza e spessore del piatto laterale, f_{up} la sua tensione di rottura, β un coefficiente che vale 3 se la colonna è vuota e 4 se è riempita di calcestruzzo. Nella (28) il primo termine rappresenta la resistenza dei piatti laterali mentre il secondo la resistenza del giunto saldato tra trave e piatti della colonna.

Nel caso invece di figura 11b, dove agiscono insieme piatti laterali e diaframma esterno, viene suggerito di calcolare la resistenza $P'_{b,f*}$ della connessione con la seguente formula:

$$P'_{b,f*} = \min \left\{ \frac{b_c}{2b} P_{p,u}; \frac{b_c}{2a} P_{b,f*} \right\} \quad (29)$$

La resistenza $P'_{b,f*}$ è dunque la minima tra la resistenza del piatto laterale $P_{p,u}$, calcolata con la (28), e la resistenza del diaframma esterno che si estende da una sola parte, $P'_{b,f*}$, pesate in funzione della distanza di tale forza $P'_{b,f*}$ dalle due facce della colonna.

ing. Benedetto Cordova
Libero professionista, Milano

Bibliografia

- [1] Y. Kurobane, J. A. Packer, J. Wardenier, N. Yeomans - CIDECT "Design Guide 9 - For structural hollow section column connections". TÜV Verlag, 2005.
[2] UNI EN 1998-1 - "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici.

- [3] ASCE/SEI 7-10: - *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
[4] ANSI/AISC 341-10: - *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*
[5] ANSI/AISC 358-10: - *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*.