



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTA' DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI COSTRUZIONI E TRASPORTI

## **TESI DI LAUREA**

# **RICERCHE SUI NODI TRAVI- PILASTRO IN STRUTTURA MISTA**

Relatore: Dott. Ing. **ROBERTO SCOTTA**

Laureando: **DANIELE BERTOLDO**

ANNO ACCADEMICO 2006/2007





Tesi stampata su carta ecologica con basso contenuto di cloro.



---

## SOMMARIO

---

<b>SOMMARIO .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>9</b>
<b>CAP. 1 – LE STRUTTURE COMPOSTE.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 – GENERALITÀ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 – LE TRAVI E LE COLONNE COMPOSTE.....</b>	<b>16</b>
1.2.1 – Le travi composte.....	16
1.2.2 – Le colonne composte.....	18
<b>1.3 – COMPORTAMENTO STRUTTURALE DEI TELAI COMPOSTI .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4 – COMPORTAMENTO ROTAZIONALE DI COLLEGAMENTI COMPOSTI SEMIRIGIDI.....</b>	<b>25</b>
<b>CAP. 2 – LE TIPOLOGIE DI CONNESSIONE TRAVE- PILASTRO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1– GENERALITÀ.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2– CONNESSIONI MEDIANTE PIOLI TIPO NELSON .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3– CONNESSIONI MEDIANTE TONDINI BULLONATI .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONI CIECHI .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5– CONNESSIONI MEDIANTE INTERRUZIONE DELLA CONTINUITÀ DELLA COLONNA.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONATURA DELLE TRAVI A PIATTI INSERITI NELLA COLONNA.....</b>	<b>40</b>
<b>2.7– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONATURA DELLE TRAVI A PIATTI SALDATI ALLA COLONNA.....</b>	<b>42</b>

<b>2.8– CONNESSIONI TRA TRAVI IN ACCIAIO E COLONNE IN CEMENTO ARMATO .....</b>	<b>44</b>
<b>2.9– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONATURA DELLE TRAVI ALLE COLONNE IN ACCIAIO .....</b>	<b>45</b>
<b>CAP. 3 – ANALISI CRITICA DEI NODI TROVATI .....</b>	<b>49</b>
<b>CAP. 4 – CARATTERISTICHE DELLE CONNESSIONI TRAVE-PILASTRO .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1– CLASSIFICAZIONE.....</b>	<b>51</b>
4.1.1 – Tipologia degli elementi da unire.....	51
4.1.2 – Tecnologia del collegamento .....	51
4.1.3 – Il collegamento in relazione alle condizioni di vincolo mutuo .....	55
<b>4.2– COLLEGAMENTO TRAVE-PILASTRO .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3– CARATTERISTICHE DEI NODI IDEALI .....</b>	<b>57</b>
<b>CAP. 5 – PROGETTAZIONE DI UN NODO DALLE CARATTERISTICHE IDEALI .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1– INTRODUZIONE .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2– MATERIALI IMPIEGATI .....</b>	<b>60</b>
<b>5.3– DIMENSIONI E CARICHI DA PROGETTO.....</b>	<b>62</b>
<b>5.4– DESCRIZIONE DEL NODO .....</b>	<b>63</b>
5.4.1 – Cerniera.....	63
5.4.2 – Incastro .....	65
<b>5.5– AZIONI DI CALCOLO E VERIFICHE.....</b>	<b>67</b>
<b>5.6– DOMINIO DI RESISTENZA DELLA COLONNA COMPOSTA .....</b>	<b>70</b>
<b>CAP. 6 – CONCLUSIONI .....</b>	<b>73</b>
<b>APPENDICE A – CATALOGO BULLONI CIECHI .....</b>	<b>75</b>

**NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....79**

**BIBLIOGRAFIA .....81**



---

## INTRODUZIONE

---

Prima di descrivere nel dettaglio le componenti del sistema costruttivo misto è opportuno ricordare la differenza che intercorre tra strutture in calcestruzzo armato e strutture "composte", comunemente denominate strutture miste, e fare una rapida cronistoria del sistema costruttivo misto acciaio-calcestruzzo.

Ovviamente la collaborazione tra acciaio e calcestruzzo si verifica sia nelle strutture in calcestruzzo armato che in quelle miste; ma tale collaborazione, che tende a valorizzare le prestazioni resistenti più idonee di ciascuno dei due materiali, si presenta con uno schema di funzionamento statico del tutto diverso nelle due tipologie strutturali.

Il comportamento di una struttura in calcestruzzo armato è dato dalla collaborazione tra l'acciaio ed il calcestruzzo. I due materiali collaborano in misura adeguata alle proprie possibilità di accollarsi i carichi esterni e il loro sforzo aumenta all'accrescere del sovraccarico esterno fino all'esaurimento delle proprie risorse, contemporaneamente o in tempi successivi, fino a che l'uno raggiunge le condizioni di collasso già raggiunte dall'altro.

Invece nelle strutture miste, i due materiali per poter far fronte alle necessità dell'elemento resistente che insieme hanno costruito, utilizzano l'uno le risorse dell'altro in momenti diversi. Inizialmente il calcestruzzo vive di rendita e la struttura metallica sopporta da sola gli oneri esterni, finché questo giunga a maturazione, abbia la capacità di accollarsi parte degli oneri esterni e parte dell'aumento del sovraccarico di lavoro.

Già si evince la differenza più caratterizzante tra travi in calcestruzzo armato e travi a struttura mista. Le armature delle strutture in calcestruzzo armato non hanno autonoma portanza e prima del consolidamento del getto di conglomerato cementizio non sono in grado di esplicare alcuna funzione. Le travi in acciaio solidarizzate al calcestruzzo sono invece "strutture finite" che dispongono di una portanza iniziale indipendente dalla associazione dei due elementi. Solo in fase di esercizio acciaio e calcestruzzo collaborano alla resistenza del complesso come un unico elemento.

Le prime strutture miste, impiegate in impalcati da ponti, furono realizzate agli inizi del secolo incorporando nel calcestruzzo profilati metallici (Figura 1) che

garantivano, mediante estese superfici di aderenza, un rigido collegamento fra i diversi materiali.

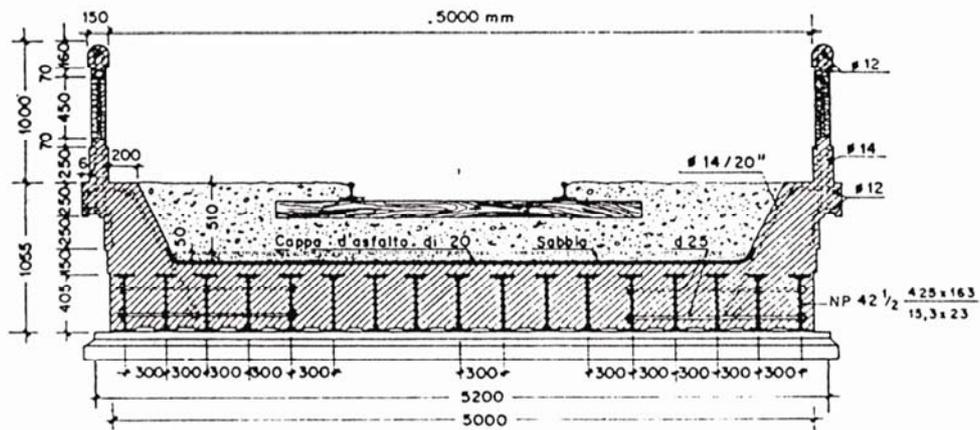


Figura 1. Impalcato ferroviario realizzato con travi in acciaio incorporate nel calcestruzzo

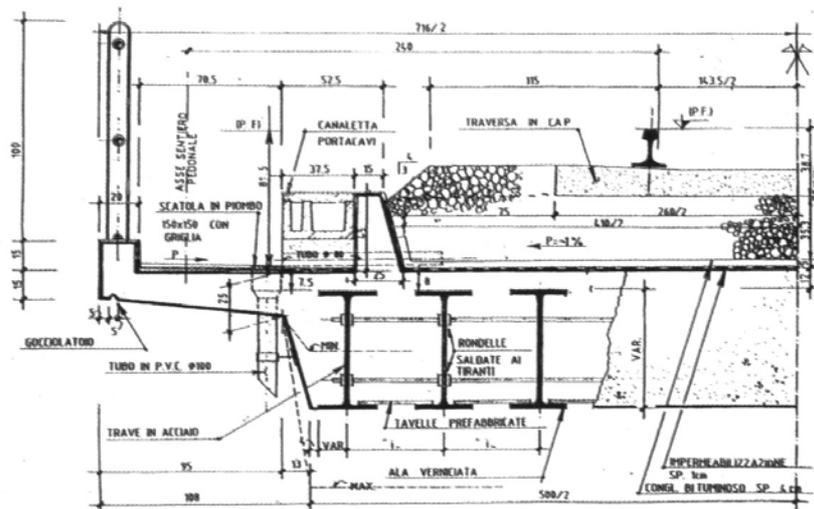


Figura 2. Particolare impalcato ferroviario

Ancora oggi per la realizzazione di alcuni ponti stradali, viene utilizzata questa tipologia costruttiva (Figura 3), dove però i profili metallici non sono più incorporati

nel calcestruzzo che, per ridurre il peso complessivo dell'opera, è limitato ad una soletta collaborante. Questa, per realizzare un rigido collegamento con i profili metallici, viene ancorata mediante opportuni connettori saldati alle flange superiori.

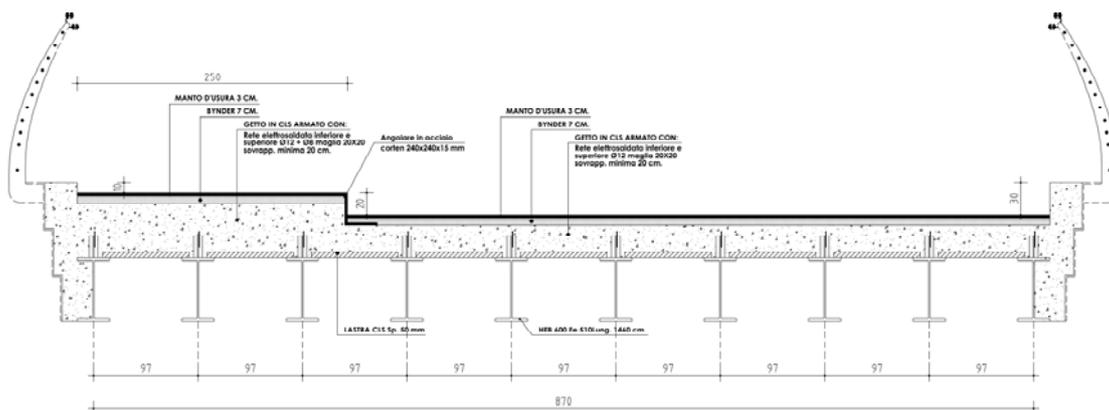


Figura 3. Sezione trasversale di un impalcato stradale di recente costruzione

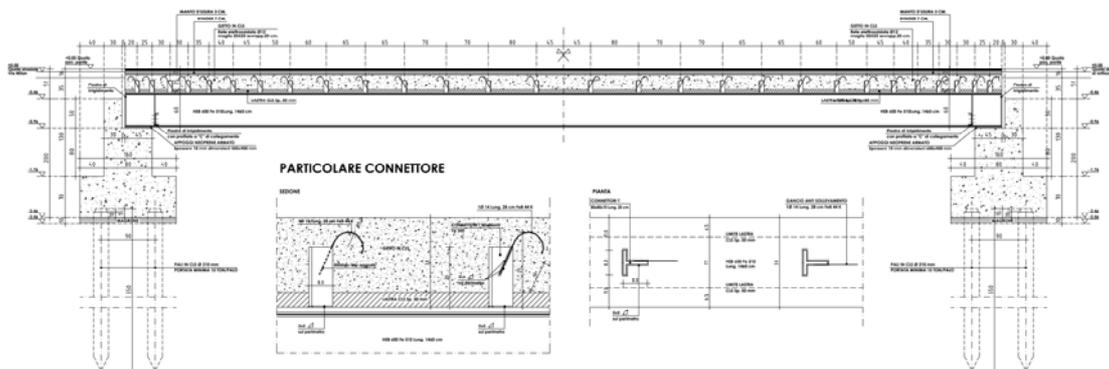


Figura 4. Sezione longitudinale e particolare connettori utilizzati

Negli anni trenta il sistema costruttivo venne modificato limitando il calcestruzzo ad una soletta ancorata alle travi metalliche (Figura 5) e conobbe una certa diffusione con la prima normativa sul procedimento costruttivo pubblicata dalla

AASHO nel 1944 e con le successive norme DIN pubblicate a seguito degli studi teorici e delle indagini sperimentali svolte in Europa ed in America.

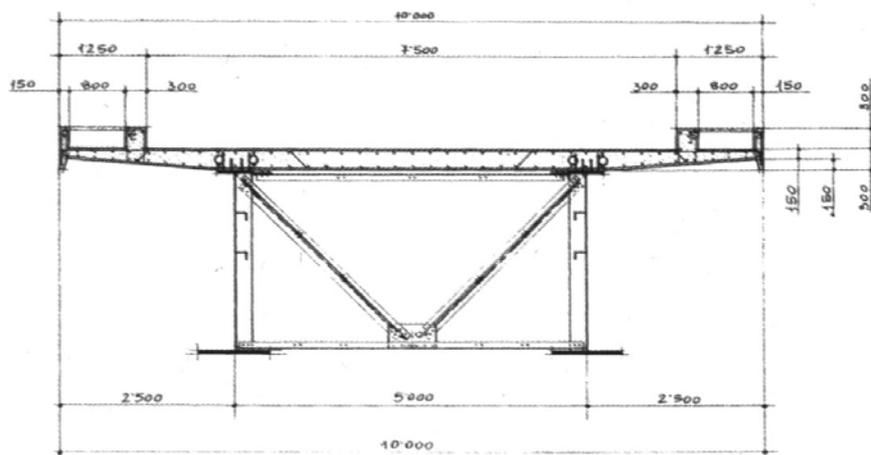


Figura 5. Struttura metallica con soletta collaborante in calcestruzzo

Negli anni cinquanta, di pari passo con gli studi sui procedimenti costruttivi e sull'ottimizzazione dei parametri di progetto tendenti a ridurre i costi del sistema misto, si svilupparono parallelamente nuove tecniche costruttive. La realizzazione di strutture con caratteristiche meccaniche differenziate e la presollecitazione degli acciai mediante cavi in acciaio armonico, o l'impiego di nuovi materiali da costruzione come gli acciai ad elevato limite elastico in grado di soddisfare la condizione di economicità di Stussi:

$$\frac{\sigma_{aq}}{C_{aq}} \leq \frac{\sigma_a}{C_a}$$

laddove  $C_{aq}$  rappresenta il costo per unità di peso e  $\sigma_{aq}$ ,  $\sigma_a$  le sollecitazioni ammissibili, rispettivamente per l'acciaio ad alta resistenza e per quello ordinario.

Nel 1967 il sistema misto acciaio-calcestruzzo, grazie anche alla semplificazione degli aspetti costruttivi che incidevano sui costi di lavorazione, era già concorrenziale con altri sistemi costruttivi nel campo delle strutture da ponte. Fu a

questo punto che si pensò di estendere alle costruzioni civili l'impiego del sistema misto e si ideò la prima Trave REP<sup>®</sup> destinata alla civile abitazione (Figura 6).

La Trave REP<sup>®</sup>, essendo più rigida delle equipotanti travi in calcestruzzo armato consente in fase di progetto di aumentare l'interasse dei pilastri pur rimanendo compresa nello spessore del solaio.

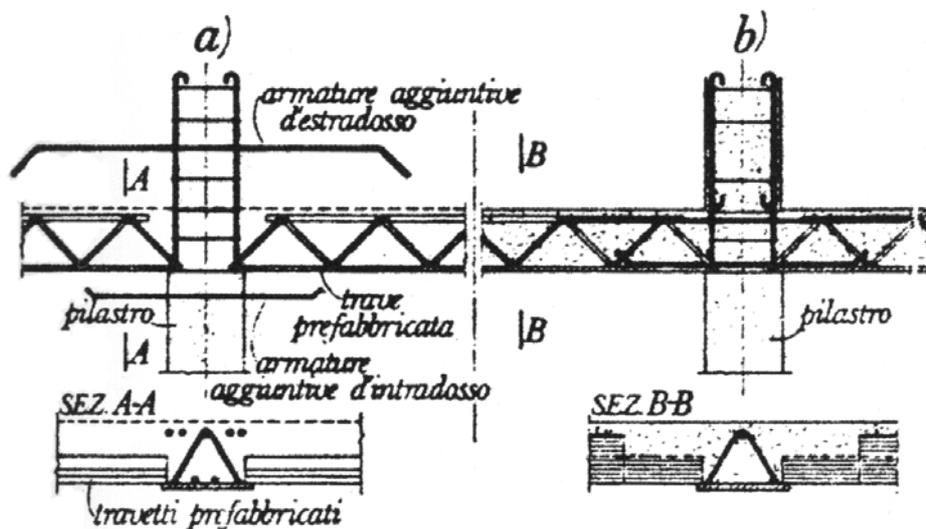


Figura 6. Primi schemi di Trave REP<sup>®</sup>

Alla trave originaria, costituita con una sola anima, seguirono le Travi REP<sup>®</sup> successive, che permisero, mediante il raddoppio delle anime ed il dispositivo di appoggio antiscorrimento, un sostanziale superamento dei limiti precedenti, consentendone l'uso in realizzazioni più complesse, quali travi da ponte e travi a grandi luci.



---

## CAP. 1 – LE STRUTTURE COMPOSTE

---

### 1.1 – GENERALITÀ

Le strutture composte acciaio-calcestruzzo occupano un posto di rilievo nell'industria delle costruzioni, ciò è dimostrato dalla grande diffusione che esse hanno raggiunto nella realizzazione di opere di ingegneria civile e del grande spazio che ad esse è riservato in numerosi convegni e riviste specializzate.

Nella realizzazione di molti ponti stradali, ad esempio, le travi composte in acciaio-calcestruzzo vengono da tempo preferite alle strutture in cemento armato precompresso. Lo stesso avviene nell'edilizia civile in cui è ormai ampiamente affermata la soluzione tecnica del solaio misto in acciaio-calcestruzzo sia con soletta piena che con l'utilizzo di lamiere grecate. Inoltre vengono sempre più utilizzate le colonne composte in acciaio-calcestruzzo.

Il motivo di questo crescente interesse è principalmente legato ad aspetti di carattere economico oltre che tecnico; le strutture miste risultano infatti economicamente competitive sia con le strutture in cemento armato che con quelle in acciaio, questo perché rispondono a due esigenze ben precise: la prima è la possibilità di ottenere elementi strutturali con ottime caratteristiche di resistenza cercando allo stesso tempo di limitare il peso strutturale dell'acciaio (che è il materiale più costoso); la seconda coincide con la possibilità di ridurre i tempi di costruzione e quindi dei costi di manodopera grazie all'adozione di procedimenti produttivi realizzati in officina. Il risultato può essere riassunto nella riduzione dei costi globali di un'opera.

I vantaggi di tipo economico, che si ottengono mediante l'adozione di strutture composte, sono notevoli se si esegue un confronto soprattutto con le strutture in acciaio. Per questo motivo in Italia, Paese tradizionalmente votato all'utilizzo strutturale del cemento armato, lo sviluppo delle strutture composte può rappresentare il fattore di rilancio per le costruzioni metalliche, favorendo nell'edilizia civile una maggiore diffusione dell'acciaio, materiale usato principalmente per realizzazioni di tipo industriale.

La normativa di riferimento per il progetto e la verifica delle strutture miste in acciaio-calcestruzzo è, a livello europeo, l'Eurocodice 4, che costituisce, inoltre, la base per la futura unificazione delle normative tecniche in tema di strutture composte tra tutti i Paesi della Comunità Europea.

In Italia le strutture miste acciaio-calcestruzzo sono regolamentate dalle Istruzioni CNR 10016, che già nelle edizioni degli anni precedenti (CNR 10016/1985) affrontano le problematiche relative alle travi miste e ai solai in acciaio-calcestruzzo, e nell'ultima edizione (CNR 10016/2000), recependo le indicazioni dell'Eurocodice 4, per la prima volta nel nostro Paese, introducono metodi per la verifica ed il progetto delle colonne composte.

## 1.2 – LE TRAVI E LE COLONNE COMPOSTE

### 1.2.1 – Le travi composte

Le travi miste in acciaio-calcestruzzo sono elementi strutturali realizzati dall'unione di una trave in acciaio e da una soletta in calcestruzzo al fine di realizzare un unico elemento strutturale. L'unione avviene per mezzo di un dispositivo di collegamento

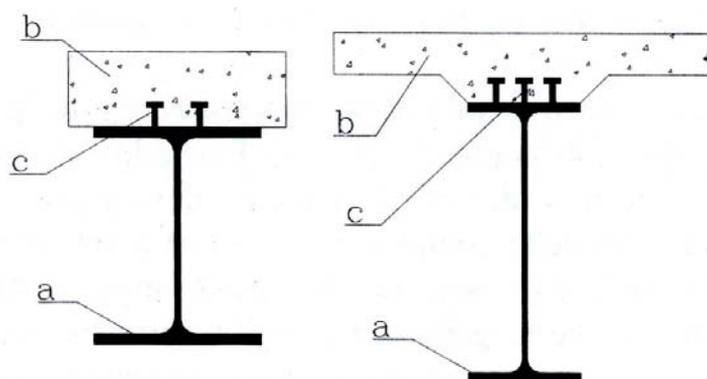


Figura 7. Schema di una trave composta in acciaio-calcestruzzo

In Figura 7 è mostrato lo schema tipico di una trave composta in cui si individuano le tre parti fondamentali dell'elemento:

- a) la trave in acciaio;
- b) la soletta in calcestruzzo;

c) il dispositivo di connessione.

La trave in acciaio è in genere laminata o saldata, ma può essere anche di tipo reticolare. Essa contribuisce alla resistenza globale della struttura assorbendo principalmente gli sforzi di trazione e di taglio.

La soletta può essere costituita da calcestruzzo normale o alleggerito; prefabbricata oppure gettata in opera su lamiera grecata o lastre tipo predalle; armata con armatura longitudinale e a taglio; in ogni caso ad essa vengono affidati gli sforzi di compressione.

Il dispositivo di connessione è costituito in genere da elementi in acciaio (pioli tipo Nelson, profilati, ferri tondi piegati) saldati alla trave metallica, e ha il compito di garantire la continuità tra la parte metallica e la soletta di calcestruzzo impedendo gli scorrimenti relativi, e consentendo pertanto il trasferimento degli sforzi di taglio.

La leggerezza dell'elemento strutturale (paragonabile a quello delle strutture in solo acciaio piuttosto che a quelle in cemento armato) appare come la caratteristica più evidente, in realtà le travi composte in acciaio-calcestruzzo presentano altre notevoli peculiarità:

- la trave in acciaio è in genere prevalentemente tesa, pertanto non presenta fenomeni di instabilità locale. Nel caso poi che l'ala superiore risulti compressa, i fenomeni di instabilità sono comunque limitati dalla soletta di calcestruzzo. La verifica di stabilità locale risulta pertanto necessaria soltanto per la piattabanda inferiore e nelle zone di momento negativo;
- il rapporto tra il momento ultimo di una trave mista e il momento ultimo della sola trave in acciaio è compreso tra 1.25 e 1.75, mentre il rapporto tra il momento d'inerzia della sezione mista e il momento d'inerzia della sola trave in acciaio può raggiungere il valore di 3. Ciò vuol dire che l'accoppiamento della soletta alla trave di acciaio produce un notevole aumento di resistenza ma soprattutto un grande aumento della rigidezza, con la conseguente diminuzione delle deformazioni;
- le travi miste presentano un buona curabilità, e si prestano a facili interventi di manutenzione.

L'obiettivo del progetto è quindi verificare che la struttura soddisfi ai requisiti di resistenza, di stabilità, di efficienza funzionale e di durabilità.

Per verificare il soddisfacimento di tali requisiti si può procedere con analisi lineari o con analisi non lineari. L'analisi lineare è necessaria per la valutazione degli spostamenti in fase di esercizio e per il calcolo delle tensioni indotte da fenomeni di

ritiro e deformazione viscosa. Inoltre è alla base delle verifiche di resistenza secondo il metodo alle tensioni ammissibili.

L'analisi non lineare si utilizza invece per la valutazione della resistenza ultima della sezione e quindi per le verifiche di sicurezza secondo il metodo allo stato limite ultimo.

Spesso però l'interpretazione del comportamento della trave mista, attraverso modelli che trascurano la deformabilità della connessione, conduce a sottostimare alcune grandezze, quali ad esempio le frecce in fase di esercizio; per questo motivo risulta necessario adottare metodi di calcolo più raffinati, che tengano conto degli scorrimenti relativi, ed eventualmente dei fenomeni di distacco tra la trave in acciaio e la soletta per effetto della deformabilità dei connettori.

### 1.2.2 – Le colonne composte

Le colonne composte si possono suddividere in tre tipologie di base:

- “fully encased” ovvero profili in acciaio completamente rivestiti in calcestruzzo (Figura 8a);
- “partially encased” ovvero profili in acciaio parzialmente rivestiti in calcestruzzo (Figura 8b);
- “concrete filled” ovvero profili in acciaio riempiti di calcestruzzo (Figura 8c,d).

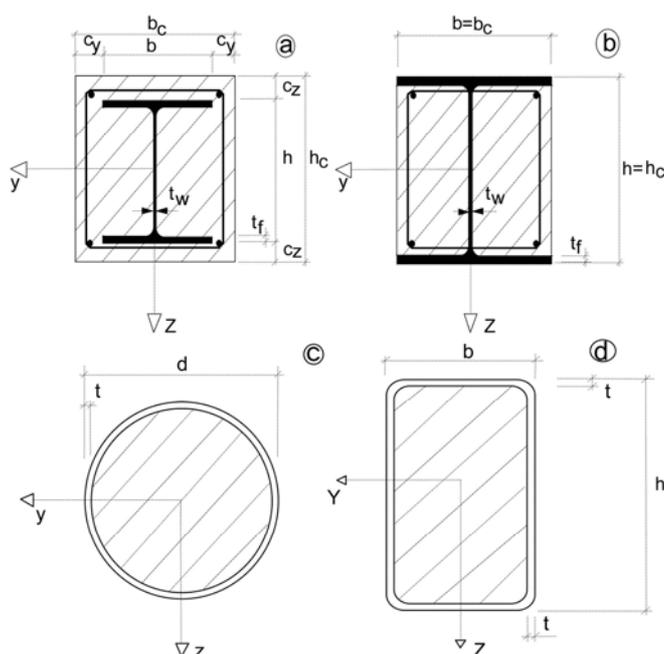


Figura 8. Tipologie di colonne composte

In generale, la presenza del calcestruzzo riduce, in maniera più o meno efficace secondo il tipo di sezione, i fenomeni di instabilità locale che rappresentano uno dei problemi preminenti dei profili in acciaio in quanto ne limitano la resistenza e la duttilità. In particolare l'instabilità locale è totalmente impedita nelle sezioni completamente rivestite, mentre è ridotta in quelle parzialmente rivestite ed in quelle riempite, per le quali si ha una maggiore efficienza nel caso di sezione circolare. D'altro canto, l'acciaio esercita invece un confinamento sul calcestruzzo che offre un aumento di resistenza a compressione del calcestruzzo soprattutto nelle "concrete filled", trascurabile per le sezioni rettangolari, ma talvolta molto rilevante per quelle circolari. Ad ogni modo, l'effetto primario del fenomeno di confinamento consiste nell'aumento di duttilità a livello di legame tensione-deformazione del calcestruzzo. Tale incremento appare più accentuato nelle sezioni riempite di calcestruzzo (concrete filled) in cui il calcestruzzo è racchiuso in una incamicatura di acciaio, ma può essere di un certo interesse anche nel caso delle colonne parzialmente rivestite (partially encased), laddove il calcestruzzo è racchiuso tra le ali del profilo metallico.

La modulazione della duttilità del calcestruzzo rappresenta una risorsa molto importante nel campo della progettazione sismica, che si basa sulla dissipazione di energia nelle cosiddette regioni critiche della struttura.

Le colonne composte sono usate maggiormente nei moderni edifici medio-alti, infatti tra le altre caratteristiche consentono una rapida costruzione combinando i vantaggi dell'acciaio, come resistenza e leggerezza, con quelli del calcestruzzo, rigidità ed economia. Infatti negli edifici la realizzazione di colonne composte ai piani più bassi che poi diventano in acciaio in quelli più alti consente di ridurre le rastremazioni dei pilastri; inoltre la costruzione integrale dell'ossatura portante in acciaio e dei solai, con il successivo completamento delle colonne composte, comporta una drastica riduzione dei tempi di esecuzione. Le ricerche più numerose riguardano le colonne parzialmente e totalmente rivestite mentre sono più limitati gli studi sulle colonne riempite. Per quanto riguarda l'utilizzo delle colonne composte in zona sismica, in presenza di terremoti severi, molto spesso le colonne composte si uniscono in un sistema ibrido dove si inseriscono elementi resistenti alle azioni orizzontali in calcestruzzo armato come setti o nuclei, oppure controventi. Anch'essi possono essere realizzati tradizionalmente in carpenteria metallica, oppure in combinazione con il calcestruzzo a formare un sistema composto.

Indipendentemente dall'applicazione l'efficacia della colonna come elemento composto è legata ad un efficiente trasferimento reciproco degli sforzi tra i due

componenti mediante tensioni tangenziali; a tale scopo si possono introdurre connettori a taglio lungo la colonna, che in zona sismica sono funzione della classe di duttilità (EC8, 2001). Tuttavia l'inserimento di questi connettori è costoso e può ridurre la qualità del getto di calcestruzzo nella zona di contatto con l'acciaio, inoltre alcune prove sperimentali hanno dimostrato che i connettori non sono sempre necessari (Roeder, 1998). Infatti in presenza di carichi verticali gli sforzi di interazione fra i materiali sono modesti perché da un lato l'elemento in acciaio e quello in calcestruzzo armato, hanno generalmente lo stesso baricentro e la superficie di contatto è elevata, dall'altro le azioni taglianti sono usualmente piccole.

Una certa cura va tuttavia prestata nei dettagli strutturali, anche al variare della forma della sezione e della tipologia strutturale prescelta. Infatti, le diverse sezioni composte sono sensibili in maniera differente alla qualità dei getti, al ritiro del calcestruzzo, alla natura delle azioni (statiche e/o cicliche) e al meccanismo di introduzione del carico sulla membratura composta.

Il discorso delle prestazioni strutturali può essere senza dubbio allargato ad un aspetto molto importante, a cui è legata l'origine delle colonne composte, cioè l'effetto di protezione al fuoco ed alla corrosione esercitato dal calcestruzzo sull'acciaio, soprattutto nella tipologia completamente rivestita. In particolare, per quanto riguarda il fuoco, i miglioramenti rispetto alle tradizionali colonne in cemento armato sono molto importanti soprattutto nel caso di colonne completamente globate nel calcestruzzo, per le quali si può ottenere una perdita di resistenza graduale nel tempo.

Ampliando la caratterizzazione delle prestazioni ad aspetti non strettamente strutturali se ne possono inquadrare alcuni legati alla tecnologia di realizzazione; infatti è possibile risparmiare le cassaforme, sia nel caso delle "concrete filled" per le quali il getto viene fatto direttamente nella camicia di acciaio, sia delle "partially encased" se il getto viene effettuato in orizzontale ruotando l'elemento sui due lati da riempire. In tale ultimo caso è evidente l'opportunità di costruire le colonne composte mediante la prefabbricazione; invece per le colonne riempite, a tale convenienza si accompagna la difficoltà di controllare la qualità del getto, e nel caso di elementi particolarmente alti potrebbe essere opportuno ricorrere alla tecnologia del getto in pressione dal basso.

Ricerche sperimentali hanno altresì mostrato che le colonne composte hanno buone potenzialità nell'assorbimento delle azioni sismiche. Le colonne parzialmente rivestite sono state analizzate sperimentalmente sotto l'effetto di carichi ciclici e con prove pseudodinamiche ottenendo risultati molto promettenti.

In generale si ottengono una contenuta instabilità locale e buone prestazioni per la stabilità globale del telaio.

Gli aspetti indagati sul problema dell'instabilità locale, sono le snellezze locali degli elementi (rapporto dimensione/spessore delle ali), la presenza o meno di connettori, l'utilizzazione di calcestruzzo normale e ad alta resistenza.

Tuttavia le colonne composte appaiono ancora più efficaci in termini di duttilità per l'elevato grado di confinamento del calcestruzzo.

L'interesse per l'impiego in zona sismica è confermato dalle numerose realizzazioni con colonne composte e dai numerosi studi sul comportamento ciclico effettuati in Giappone e negli Stati Uniti, che sono due Paesi ad alto rischio sismico.

Le prove sperimentali mostrano che le azioni cicliche non modificano in modo significativo la rigidezza e la resistenza delle colonne riempite, in questo caso rettangolari (Figura 9), anche se il risultato può dipendere in modo rilevante dall'aliquota di sforzo normale che comunque è correlato al rapporto tra lato e spessore del tubolare oltre che alle caratteristiche meccaniche dell'acciaio.

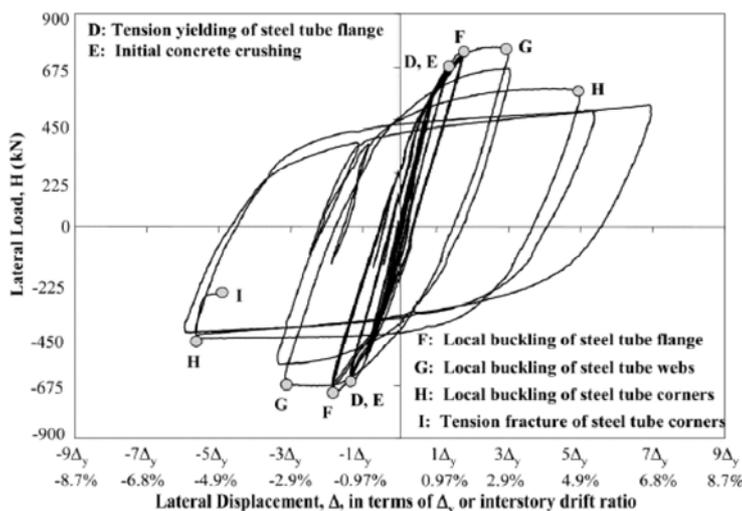


Figura 9. Risposta ciclica di una colonna composta rettangolare riempita di calcestruzzo.

A tale proposito, è opportuno sottolineare che la norma di riferimento Europea del settore, l'Eurocodice 8 (Eurocodice 8, 1994), fino al 2001, forniva solo principi generali e non consentiva nei fatti una progettazione delle strutture composte, giacché non venivano presentati criteri di progetto o procedure affidabili. Per questo

motivo negli ultimi quattro/cinque anni in Europa si è compiuto un intenso sforzo di ricerca per raccogliere le attuali conoscenze nel campo delle strutture composte in zona sismica e fornire un contributo organico per un capitolo specifico dell'Eurocodice 8 sulle strutture composte. Il lavoro si è sostanzialmente orientato a migliorare la comprensione del comportamento dei telai composti sismoresistenti con meccanismi dissipativi di natura flessionale, ma realizzati con connessioni trave colonna rigide. Inoltre ha avuto come scopo una revisione ed un'analisi critica delle conoscenze e dati teorici e sperimentali disponibili negli Stati Uniti e in Giappone su altre tipologie strutturali, per le quali in quei Paesi sono già disponibili indicazioni di progetto.

Inoltre, molti dati che costituiscono il necessario background per il miglioramento e l'integrazione dell'Eurocodice 8, nel settore delle strutture composte sono stati desunti da specifiche attività sperimentali in molti laboratori Europei e raccolti nella versione prEN dell'Eurocodice 8.

### **1.3 – COMPORTAMENTO STRUTTURALE DEI TELAI COMPOSTI**

I telai composti acciaio-calcestruzzo condividono con le strutture in carpenteria metallica la problematica delle unioni tra gli elementi e della conseguente deformabilità nella risposta strutturale complessiva del telaio. Infatti, mentre nelle costruzioni in cemento armato, la monoliticità delle regioni nodali (trave-colonna o colonna-fondazione) è conferita dalla tecnologia costruttiva, nelle costruzioni composte e in carpenteria metallica la rigidità e la resistenza della connessione dipende fortemente dai dettagli costruttivi e dalla tecnica di collegamento prescelta (saldatura o bulloni).

Nel caso dei collegamenti tra strutture composte il problema si configura più complesso; infatti, in questo ambito alle usuali problematiche dei collegamenti in carpenteria metallica si aggiunge l'interazione tra la componente in acciaio e quella in calcestruzzo.

Tale circostanza modifica drasticamente i flussi delle tensioni generando sollecitazioni aggiuntive che da un lato innalzano la rigidità e dall'altro determinano una redistribuzione tra i componenti del collegamento.

In generale, i limiti di comportamento dei collegamenti sono rappresentati dai nodi semplici (cerniera). In questi nodi il livello di resistenza flessionale è trascurabile rispetto a quello delle membrature collegate e la capacità rotazionale è

apprezzabile, e dai nodi rigidi i quali sono in grado di trasmettere momenti flettenti elevati con rotazioni relative trascurabili.

In molti casi, i dettagli necessari a raggiungere le prestazioni di nodo rigido sono particolarmente onerosi e complessi da eseguire, per cui si vengono a definire dei collegamenti che consentono il trasferimento di un limitato valore del momento in presenza di una rotazione relativa non trascurabile tra gli elementi. Tali collegamenti si definiscono semi-rigidi.

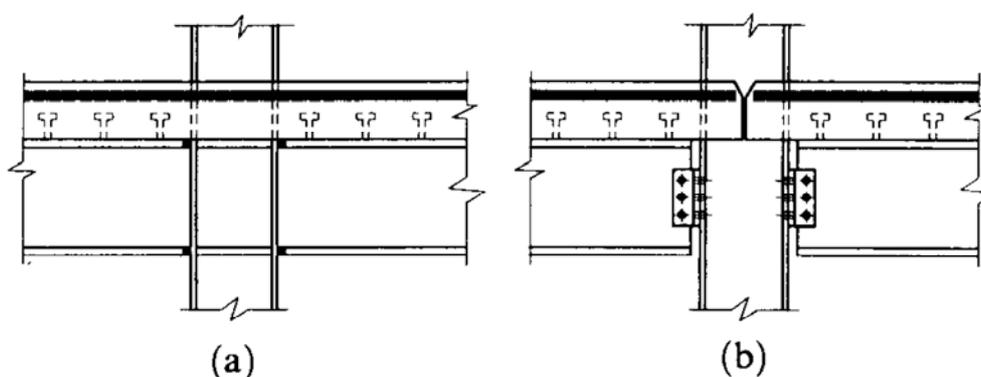
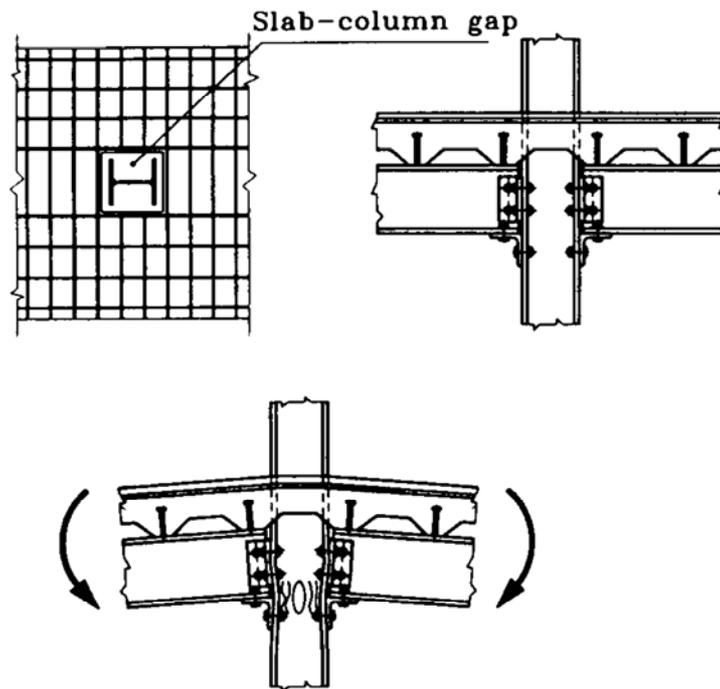


Figura 10. Esempi di nodi composti

Nella Figura 10 sono mostrati due esempi di nodo composto: il primo si definisce *rigido* (a), il secondo *semplice* (b). In quest'ultimo caso, come si può vedere, la soletta si presenta interrotta in modo da eliminare ogni forma significativa di interazione tra soletta e colonna.

I due esempi sopra riportati, però, costituiscono gli estremi di un intervallo di comportamento dei nodi, attraverso i quali si possono ottenere condizioni di parziale continuità (si parla in tal caso di nodi semi-rigidi): in tali condizioni la soletta si presenta continua nella zona nodale, sebbene opportunamente forata per consentire il passaggio della colonna, mentre la trave metallica inferiore risulta interrotta e vincolata mediante dispositivi specifici alla colonna metallica (Figura 11).

Per quanto riguarda le travi la tipologia classica impiegata nei telai è quella costituita da un profilo metallico a doppio T con una soletta in calcestruzzo armato sovrastante.



*Figura 11. Nodo composto*

E' ben noto che le migliori prestazioni di questa tipologia strutturale si ottengono per lo schema statico di trave semplicemente appoggiata, poiché il calcestruzzo risulta compresso e l'acciaio teso. Tuttavia la realizzazione di uno schema di trave continua può consentire di avere una minore deformabilità e la riduzione di zone di giunto; pertanto recentemente sono stati sviluppati studi teorici e sperimentali per analizzare l'influenza di vari parametri sul comportamento in condizioni di servizio ed ultime di travi composte soggette a momento negativo.

In generale nelle travi composte ha un ruolo fondamentale la connessione tra la parte metallica e quella in calcestruzzo armato. Questa consente di raggiungere una completa interazione tra i materiali ottenendo la massima resistenza e rigidità, qualora i dispositivi di collegamento (connettori) siano stati proporzionati a tale scopo. Nel caso invece di un progetto con connessione parziale la resistenza dell'elemento dipende proprio dal collegamento tra le due parti, che diventa il componente debole la cui crisi comporta il collasso della struttura composta.

Le strutture composte acciaio calcestruzzo offrono dunque una varietà di soluzioni sia in termini di tecnologie di realizzazione che di prestazioni strutturali. Le colonne, in modo più o meno esaustivo, presentano un migliore comportamento

strutturale rispetto ad elementi in solo acciaio e calcestruzzo, con una riduzione dei fenomeni di instabilità locale delle parti metalliche ed il confinamento del calcestruzzo. In molti casi agli aspetti strutturali si associano una facilità di prefabbricazione ed una notevole resistenza al fuoco.

Anche per i telai composti vi sono molteplici soluzioni, soprattutto per quanto riguarda i nodi e le colonne; attualmente sono numerosi gli studi finalizzati all'analisi del comportamento strutturale in presenza di azioni sismiche. In questo caso, infatti, assume un ruolo primario la duttilità degli elementi e l'approccio progettuale deve tenere conto, oltre che delle caratteristiche dei singoli componenti, anche del comportamento globale che deriva dalla loro interazione.

#### **1.4 – COMPORTAMENTO ROTAZIONALE DI COLLEGAMENTI COMPOSTI SEMIRIGIDI**

Il concetto di semirigidità nodale assume, nelle strutture composte acciaio-calcestruzzo, un'importanza maggiore rispetto a quella che riveste nelle strutture in acciaio. Infatti, anche nel caso di collegamenti la cui parte metallica è costituita da semplici angolari bullonati, tipologia comunemente assimilata al modello cerniera, la disposizione di barre di armatura nella soletta in prossimità della colonna appare sufficiente ad assicurare un significativo grado di continuità al sistema. Ciò accade anche quando l'entità di tale armatura è modesta, come nel caso frequente in cui essa è dimensionata all'unico scopo di controllare la fessurazione. Si comprende pertanto come, portando in conto il comportamento semirigido dei nodi, sia possibile ottenere incrementi di rigidezza e capacità portante, anche significativi, a costi decisamente bassi.

Vari autori si sono occupati della previsione del comportamento dei nodi composti semirigidi proponendo diversi modelli per il calcolo della rigidezza e della resistenza. Tuttavia nella maggior parte dei casi, i modelli proposti risultano specifici di particolari tipi di collegamenti e quindi non risultano facilmente generalizzabili alla grande varietà di possibili tipologie nodali.

L'attualità di tale problematica è testimoniata, inoltre, dall'introduzione nell'Eurocodice 4 (CEN, 2000) di un modello per la determinazione della rigidezza e della resistenza di nodi composti semirigidi. Il modello proposto dalla normativa è basato sul "modello delle componenti", la cui originalità consiste nella capacità di ricavare il comportamento globale del nodo a partire da quello degli elementi che lo

costituiscono. Sebbene tale approccio risulta, dal punto di vista teorico, applicabile a molteplici tipologie nodali, allo stato attuale esso è codificato solo per quelle più diffuse.

La modellazione nodale contenuta nell'Eurocodice 4 scaturisce dall'estensione ai nodi composti della metodologia già introdotta nell'Annesso J dell'eurocodice 3 (CEN 1997) con riferimento ai nodi semirigidi in acciaio. Ovviamente, le peculiarità dei nodi composti semirigidi richiedono l'introduzione di nuove componenti quali, in particolare, la soletta in trazione ed i connettori a taglio.

Per ciascuna componente nodale, l'Eurocodice 4 fornisce le relazioni per la valutazione dei parametri che descrivono il comportamento forza-spostamento. A partire da tali legami, la deformabilità complessiva del nodo viene ottenuta mediante un'opportuna combinazione della deformabilità delle componenti che lo costituiscono, mentre la resistenza flessionale viene governata dalla componente più debole.

Questo lavoro si propone di esaminare le problematiche connesse all'eventuale estensione del modello di normativa al caso di nodi composti con angolari d'anima e di flangia, attualmente non contemplati.

In particolare, viene evidenziato come la caratterizzazione del comportamento rotazionale mediante i soli valori della rigidezza e della resistenza flessionale sia inadeguata per i nodi composti. Il loro comportamento, rispetto ai nodi in acciaio, è notevolmente complicato proprio dai fenomeni che interessano la soletta, quali la fessurazione, il tension-stiffening e lo scorrimento soletta-trave dovuto ai connettori. Pertanto, partendo da tali premesse, viene proposto un modello alternativo capace di pervenire ad una previsione del comportamento rotazionale più aderente all'evidenza sperimentale.

---

## **CAP. 2 – LE TIPOLOGIE DI CONNESSIONE TRAVE- PILASTRO**

---

### **2.1– GENERALITÀ**

Nelle comuni travi a struttura mista di tipo inglobato, per realizzare la continuità strutturale è necessario disporre nelle sezioni d'incastro delle armature integrative in FeB44k. Inoltre, in corrispondenza dei nodi, ai fini dell'assorbimento dei momenti flettenti, non si considera l'armatura terminale delle travi miste, quindi l'armatura delle travi deve essere integrata con ulteriori monconi aggiuntivi.

La struttura ultimata risultante dall'utilizzazione di tali travi si configura pertanto come struttura mista in campata e come struttura in calcestruzzo armato nelle sezioni d'incastro.

Le nuove travi a struttura mista sono caratterizzate da una maggiore lunghezza dell'anima in acciaio rispetto alla luce netta della trave. L'anima in acciaio che si prolunga nelle campate contigue per una lunghezza calcolata in funzione degli sforzi di taglio e dei momenti flettenti, garantisce direttamente la continuità strutturale e il comportamento a telaio.

A differenza delle altre travi, queste possono essere considerate continue anche nella posa in opera e sino al consolidamento del calcestruzzo.

L'ancoraggio è il più adatto a resistere alle azioni di scorrimento tra calcestruzzo e trave perché le parti terminali delle travi, prolungandosi sino alle aree compresse, si ancorano per schiacciamento e non per aderenza come accade utilizzando i monconi. Di conseguenza l'eliminazione dei monconi e l'utilizzo dei correnti superiori come armatura (mentre nelle altre travi si deve tener conto dei correnti superiori sino ai fini del ritiro), rispetto alle equipotenti travi miste, presentano una considerevole riduzione di peso dovuta ad un più razionale impiego del ferro.

### **2.2– CONNESSIONI MEDIANTE PIOLI TIPO NELSON**

In questa tipologia di connessioni, l'uso dei pioli tipo Nelson interni alla colonna serve per irrigidire localmente la giunzione trave-colonna, ma conduce anche a

spostare le deformazioni e le fratture delle anime delle travi collegate, nei loro fori di connessione.

Una tipologia comune di struttura composta, è quella con travi d'acciaio e colonne composite acciaio-calcestruzzo. L'acciaio duttile delle travi va a formare con la rigidità delle colonne composte, che controllano la storia e l'andamento del moto, una struttura con la caratteristica di un peso leggero.

Solitamente il numero di pioli varia in base alla dimensione della trave; per realizzare il collegamento si pratica un foro nella colonna di uguali dimensioni al piatto dove sono saldati, con saldatura a completa penetrazione, i pioli tipo Nelson. Inoltre si saldano all'interno della colonna in corrispondenza delle ali della trave, dei diaframmi che fungono da irrigidimenti per assicurare la continuità degli sforzi di trazione e compressione.

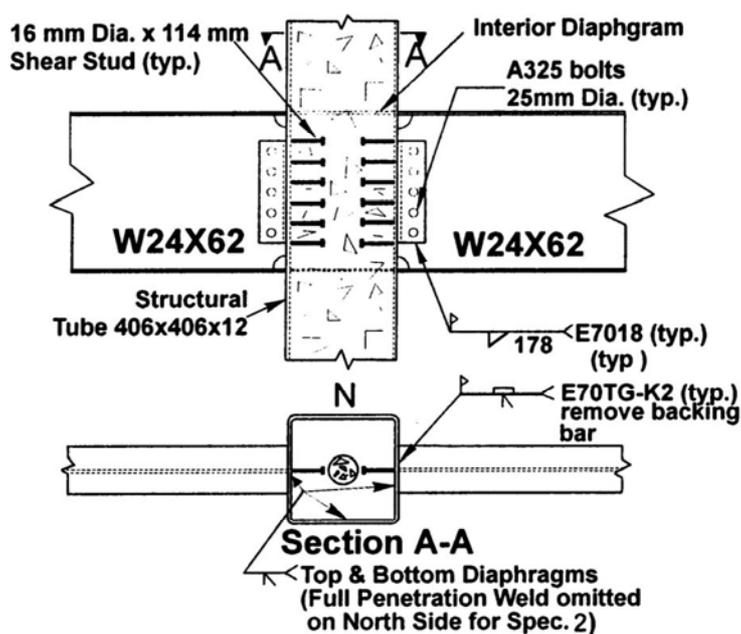


Figura 12. Dettaglio di connessione con pioli tipo Nelson

Una variante della tipologia appena descritta, può essere realizzata saldando alle travi, con saldatura a completa penetrazione, dei fazzoletti d'acciaio affusolati.

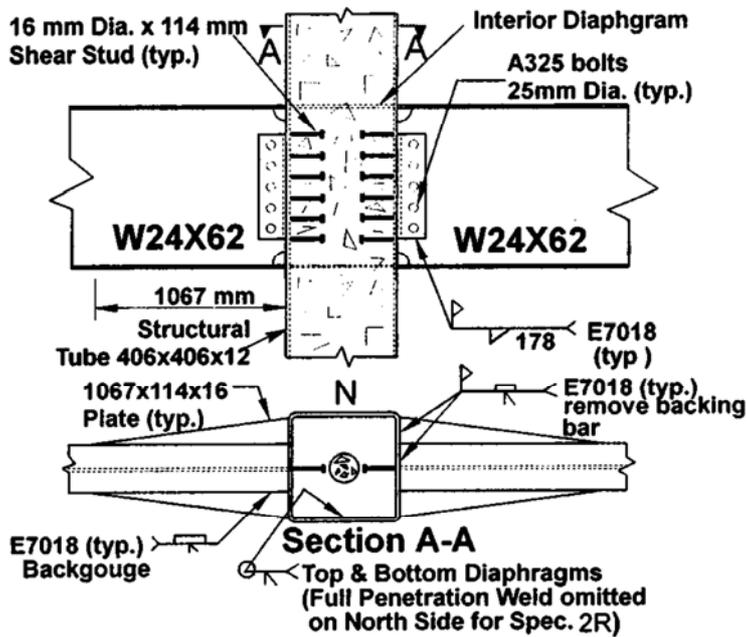


Figura 13. Dettaglio di connessione

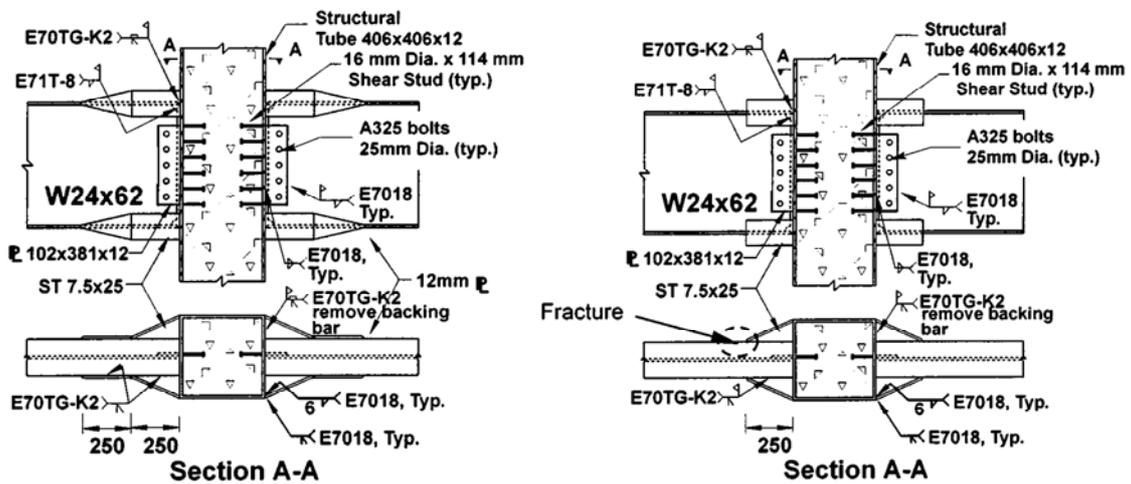


Figura 14. Dettagli di connessione

Un altro dettaglio può essere realizzato introducendo all'interno della colonna, in aggiunta ai pioli tipo Nelson, un tondino con le estremità filettate per collegare le travi mediante bullonatura.

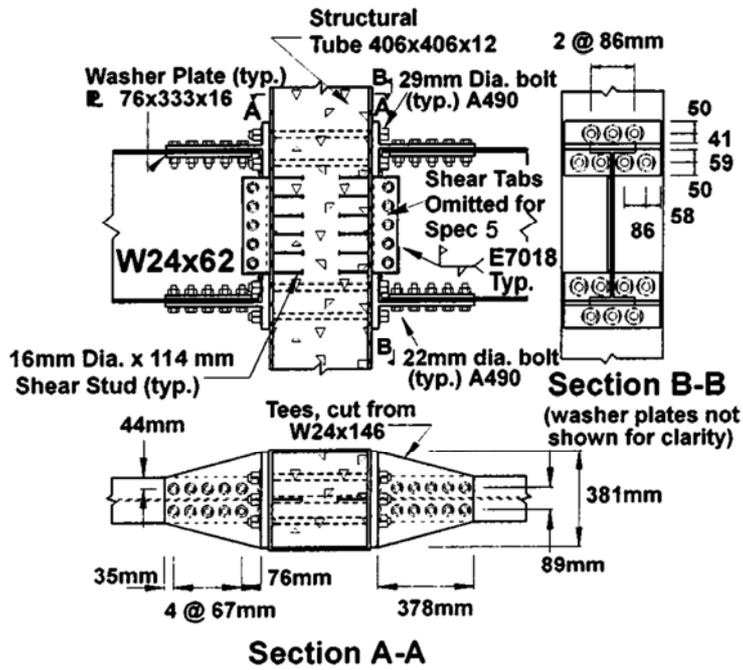


Figura 15. Dettaglio di connessione

Sempre mediante l'utilizzo di pioli tipo Nelson, è stata progettata dall'Ing. Alberto Zanchettin, una connessione tra travi in acciaio e normali pilastri in calcestruzzo armato. Questa tipologia è realizzata nel dettaglio saldando un piatto in testa alle travi sul quale sono a loro volta saldati i pioli tipo Nelson.

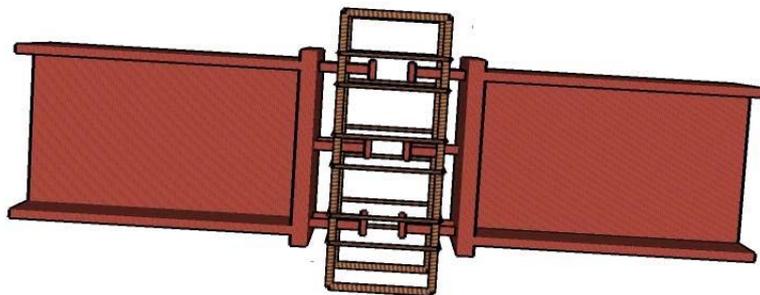
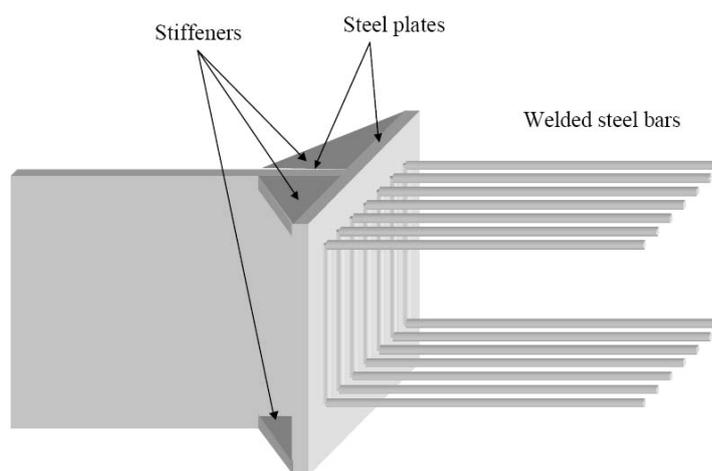


Figura 16. Dettaglio di connessione

Il trasferimento degli sforzi agenti sul nodo, si realizza grazie alla formazione di bielle compresse di calcestruzzo tra i pioli tipo Nelson e le staffe del pilastro in calcestruzzo armato. Come si può notare dalla Figura 16, al momento della posa in opera, le travi vengono disposte in modo da far entrare i pioli tipo Nelson, all'interno della gabbia d'armatura del pilastro.

Un notevole vantaggio di questa connessione sta nella tolleranza d'errore che si può avere al momento della posa in opera, tolleranza che nel caso di connessioni fra strutture metalliche, quali travi e colonne composte, è notevolmente ridotta a causa della precisione che si deve tenere per far combaciare esattamente le due parti di struttura che devono andare ad innestarsi o a collegarsi mediante bullonatura. Nel caso in questione, invece, il dover collegare le travi a delle colonne in normale calcestruzzo armato, è facilitato dalla possibilità di modificare e adattare anche in opera la forma della colonna stessa.

Una tipologia di connessione simile a quella appena descritta, consiste in due piatti d'acciaio saldati tra di loro ed irrigiditi grazie a dei fazzoletti triangolari. Sul piatto d'estremità vengono saldate delle barre d'acciaio ad aderenza migliorata, a forma di U che verranno poi inglobate nel getto di calcestruzzo del pilastro per realizzare il collegamento. La trave che andrà a sostenere il solaio sarà collegata mediante la sua anima, al piatto sporgente della connessione, con un'adeguata bullonatura.



*Figura 17. Dettaglio di connessione*

## 2.3– CONNESSIONI MEDIANTE TONDINI BULLONATI

In questo caso si realizza la connessione con un collegamento bullonato tra le travi e la colonna composta, così da non dover effettuare nessun tipo di saldatura in opera e poter assicurare una buona qualità per quelle realizzate in officina.

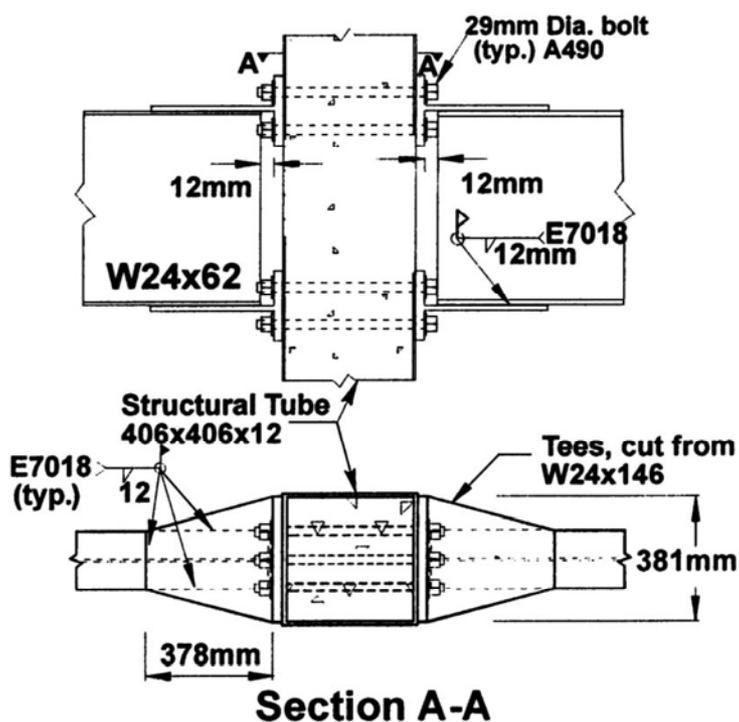


Figura 18. Dettaglio di connessione

In corrispondenza delle colonne, le ali delle travi vengono allargate saldando dei fazzoletti triangolari da ambo le parti, per fare in modo che un'eventuale formazione di cerniere plastiche, si sviluppi lontano dalle zone di connessione.

Nel dettaglio la connessione è resa possibile saldando un piatto in testa alle travi, su questo vengono praticati i fori per il collegamento; gli stessi fori si realizzano sulle pareti della colonna d'acciaio alle altezze stabilite da progetto. Al momento della posa in opera delle strutture, i tondini vengono pretesi per creare il collegamento e possono quindi lavorare a taglio o ad attrito. Dopo che il calcestruzzo è stato gettato all'interno della colonna ed è arrivato a maturazione, realizza con l'acciaio dei tondini una completa aderenza.

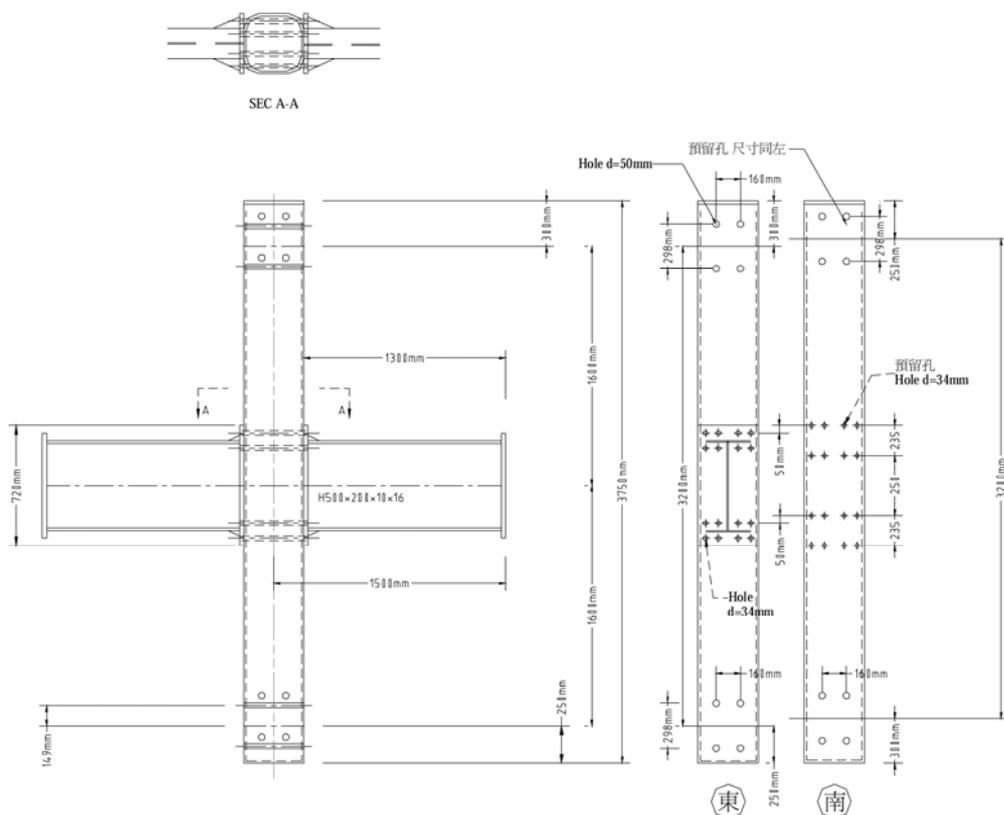


Figura 19. Dettaglio di connessione

## 2.4- CONNESSIONI MEDIANTE BULLONI CIECHI

Questa connessione si realizza tra una colonna d'acciaio riempita di calcestruzzo, un piatto curvato adiacente alla colonna ed un piatto sagomato e saldato a quello curvato. Il collegamento tra la colonna ed il piatto curvato è realizzato con dei bulloni ciechi aventi o meno delle estensioni all'interno della colonna.

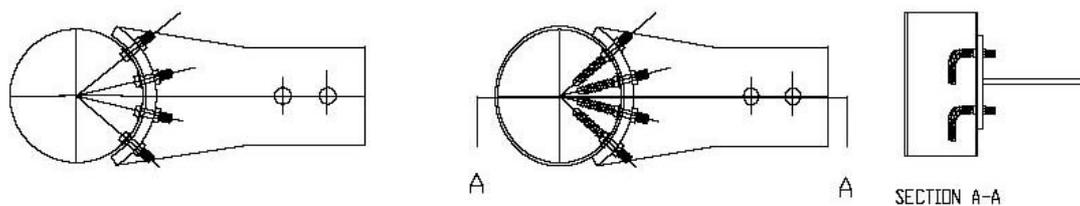


Figura 20. Dettaglio di connessioni con bulloni ciechi senza e con estensioni

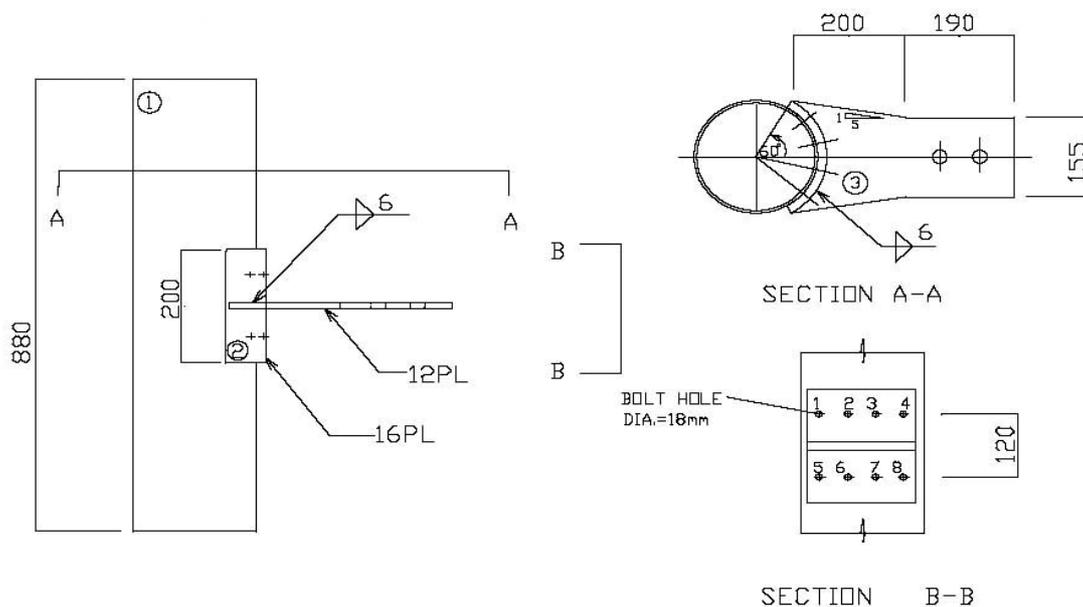


Figura 21. Dettaglio di connessione

## 2.5– CONNESSIONI MEDIANTE INTERRUZIONE DELLA CONTINUITÀ DELLA COLONNA

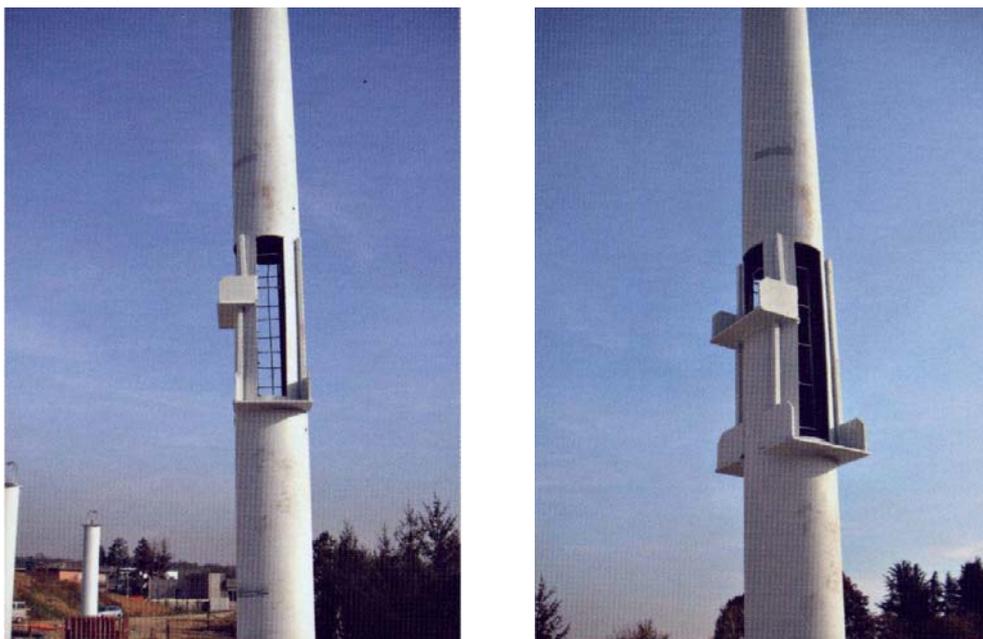
Gli esempi di seguito rappresentati sono progettati dalla ditta Tecnostrutture S.r.l. di Noventa di Piave (VE) e consistono nell'utilizzo di colonne d'acciaio che in corrispondenza degli orizzontamenti sono interrotte per permetterne la loro continuità strutturale.

Questi pilastri tubolari riempiti di calcestruzzo hanno il comportamento statico dei pilastri in calcestruzzo cerchiati e per essi non esiste il pericolo di ingobbamento della lamiera dovuto agli sforzi di taglio. Il calcestruzzo interno si comporta come un solido a dilatazione trasversale impedita, e la quantità di calcestruzzo sufficiente a sopportare un determinato carico risulta ridotta rispetto alla quantità di calcestruzzo necessaria nei pilastri in cemento armato ordinario.

La resistenza alla compressione dei profilati tubolari è di per se ottima e il carico utile che può sopportare un profilato tubolare può essere aumentato in modo significativo con il riempimento in calcestruzzo.

Questo tipo di pilastro riempito di calcestruzzo, oltre ad avere una grande portanza rispetto all'ingombro della sezione, ha una buona resistenza al fuoco.

È interessante notare che il profilo metallico, variando gradualmente lo spessore della lamiera, permette di poter conservare costanti le dimensioni esterne a tutti i livelli del fabbricato e, quasi sempre, le ridotte dimensioni consentono l'inserimento dei pilastri nella muratura di tamponamento.



*Figura 22. Dettaglio di connessione mediante apertura*

Il pilastro rappresentato in Figura 22 presenta delle aperture in corrispondenza della posizione degli orizzontamenti, per permettere la disposizione in continuità delle travi e realizzare con il getto in calcestruzzo una struttura monolitica. Inoltre per facilitare la posa in opera delle travi, vengono saldate delle mensole in corrispondenza ai fori.



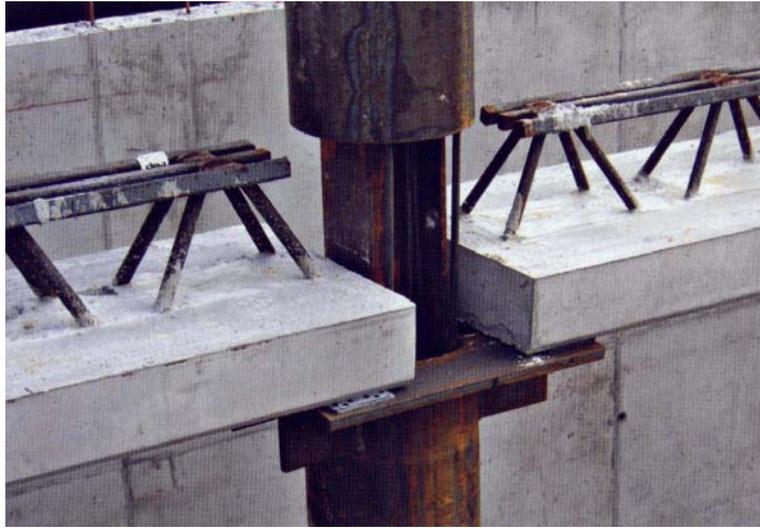
*Figura 23. Disposizione armature per realizzare continuità in una direzione*



*Figura 24. Disposizione armature per realizzare continuità in due direzioni*

A differenza dei pilastri appena descritti, quelli di seguito presentano in corrispondenza dell'alloggiamento delle travi, un'interruzione del tubo d'acciaio con l'inserimento di un tratto di profilo tipo HE; la continuità delle travi è realizzata mediante l'aggiunta di un'armatura secondaria in tondini di acciaio tipo FeB44K.

Anche per questa tipologia vengono saldate delle mensole per semplificare le operazioni di posa in opera.



*Figura 25. Dettaglio di connessione per travi di uguale luce*



*Figura 26. Dettaglio di connessione per travi di diversa luce*

Per la tipologia seguente, il pilastro tubolare metallico è completato dalle flange per l'alloggiamento delle travi sovrastanti che assicurano anche la continuità della struttura verticale.

Le flange imbullonate, attraverso le quali vengono distribuiti al resto della struttura metallica gli sforzi assiali, i momenti ed i tagli agenti alla base del pilastro, vengono dimensionate in modo che la tensione massima di compressione tra la flangia e la soletta in calcestruzzo, su cui essa appoggia, risulti minore o uguale a quella ammissibile al rifollamento; e nel contempo, che la tensione media sotto la flangia risulti inferiore a quella ammissibile per compressione semplice.

I bulloni sono dimensionati in modo che le tensioni di trazione, indotte dai momenti al piede o alla sommità dei pilastri, risultino inferiori a quella ammissibile per il materiale usato.

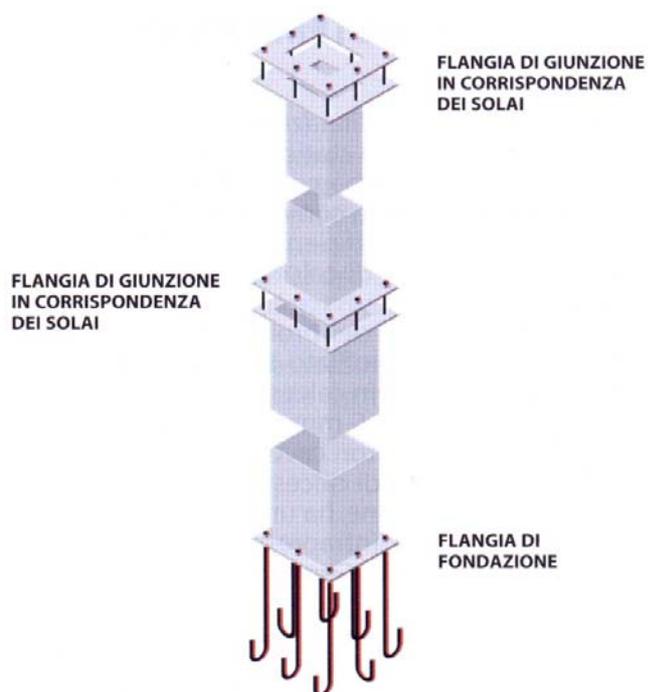


Figura 27. Pilastro flangiato



Figura 28. Dettaglio di connessione pilastro flangiato

Infine come ultima tipologia di connessioni realizzate dalla sopraccitata ditta, è da ricordare il pilastro centrifugato ad alta resistenza.

Questo pilastro è realizzato in stabilimento con calcestruzzi ad alta resistenza ed in prossimità degli orizzontamenti sono disposti dei larghi piatti d'acciaio. Essi permettono, una volta posti in opera, un facile posizionamento delle travi.

Per questa tipologia di strutture non è quindi necessario gettare i pilastri, ma è sufficiente completare, con il relativo getto, i vari solai interpiani per assicurare la continuità totale dell'opera.



*Figura 29. Pilastro centrifugato*



*Figura 30. Dettaglio di connessione pilastro centrifugato*

## 2.6– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONATURA DELLA TRAVE A PIATTI INSERITI NELLA COLONNA

È dimostrato che la maggior parte dello sforzo di compressione trasferito dall'acciaio al calcestruzzo in una colonna composta, è garantito dal trasferimento di capacità portante piuttosto che dall'attrito realizzato sulle superfici di contatto tra i due materiali. Per questo motivo, in questa tipologia di connessioni, il collegamento trave-colonna si realizza tramite bullonature della trave ad un piatto inserito all'interno della colonna, come se dovesse tagliarla in due parti uguali.

Questo piatto di rinforzo, solitamente presenta dei buchi che consentono un maggior trasferimento dello sforzo di compressione, rispetto ad un piatto di rinforzo semplice.

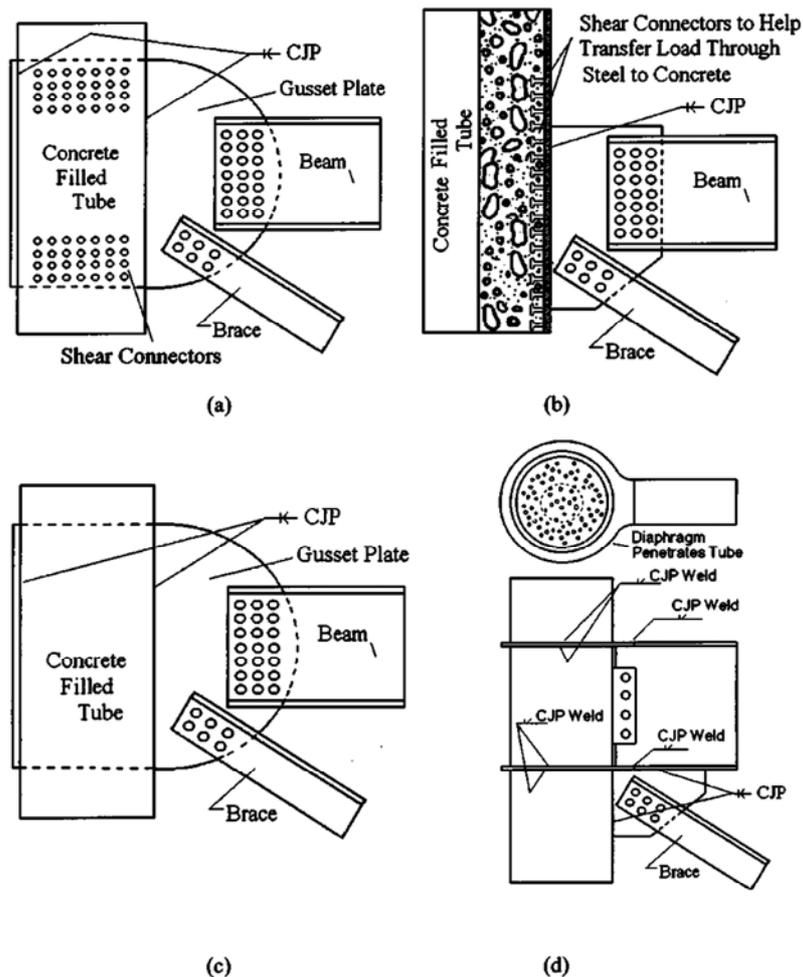


Figura 31. Dettagli di connessione

Come già detto, il calcestruzzo gettato all'interno delle colonne d'acciaio, aumenta notevolmente la capacità compressiva e la durezza dei tubi d'acciaio e diminuisce la deformabilità locale degli stessi tubi. Per ottenere questi benefici, deve essere sviluppata l'azione composita tra l'acciaio ed il calcestruzzo e la capacità portante della colonna composta deve essere distribuita tra i due componenti attraverso la connessione trave-colonna.

In Figura 31 sono mostrate quattro tipologie di connessioni; nella prima tipologia, Figura 31 (a), è rappresentato un piatto inserito all'interno della colonna, dove le forze di compressione e di taglio si trasferiscono dall'acciaio al calcestruzzo grazie a dei connettori, simili ai pioli tipo Nelson, saldati al piatto stesso.

Il piatto di rinforzo usato per la connessione, e la trave, possono anche essere collegati esternamente al tubo d'acciaio come mostrato in Figura 31 (b), in questo caso le forze di compressione e di taglio si trasferiscono grazie a dei connettori saldati internamente alla colonna.

La Figura 31 (c) mostra una connessione simile alla prima (Figura 31 (a)), ma in questo caso le forze si trasferiscono solamente grazie all'attrito tra i due materiali ed alla superficie di contatto data dallo spessore del piatto.

Infine nella Figura 31 (d) è mostrata la tipica connessione realizzata in Giappone per le colonne composte. Come si nota dalla figura, vengono inseriti due diaframmi all'interno della colonna e saldati con quattro saldature a completa penetrazione attorno al perimetro della colonna stessa. Ovviamente, per consentire il passaggio del getto di calcestruzzo, questi diaframmi dovranno essere opportunamente forati.

Una tipologia di connessione simile a quella descritta dalla Figura 31 (d) è rappresentata in Figura 32, dove in un caso si hanno i diaframmi interni e nell'altro caso i diaframmi sono esterni. È facile notare che per questa tipologia, è garantita la continuità del momento nelle connessioni.

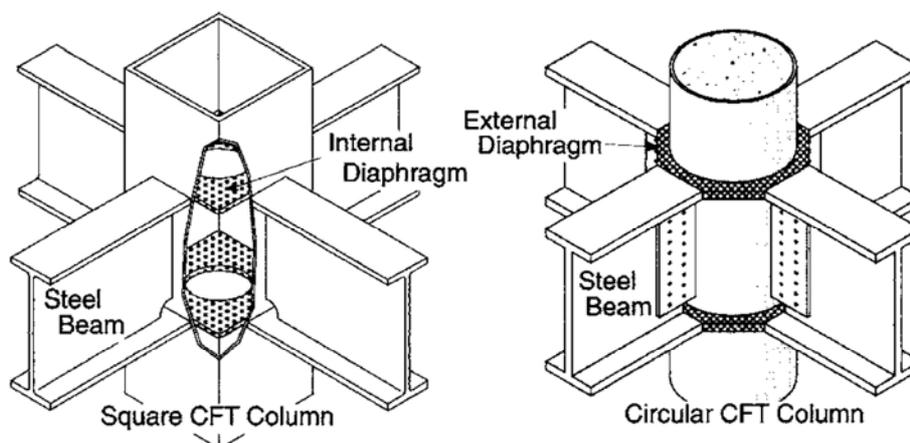


Figura 32. Dettagli di connessione

## 2.7– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONATURA DELLE TRAVI A PIATTI SALDATI ALLA COLONNA

Un esempio concreto di questa tipologia di connessione, ci viene fornito dalla Millennium Tower di Vienna.

In questo edificio, le travi composte sono costituite da larghi piatti d'acciaio saldati a forma di T e da sottili lastre di calcestruzzo con un minimo abbassamento dell'armatura superficiale, che riduce notevolmente la freccia del solaio in mezzeria. La connessione a taglio tra la trave ed il calcestruzzo del solaio è realizzata grazie ai connettori saldati al piatto orizzontale della trave.

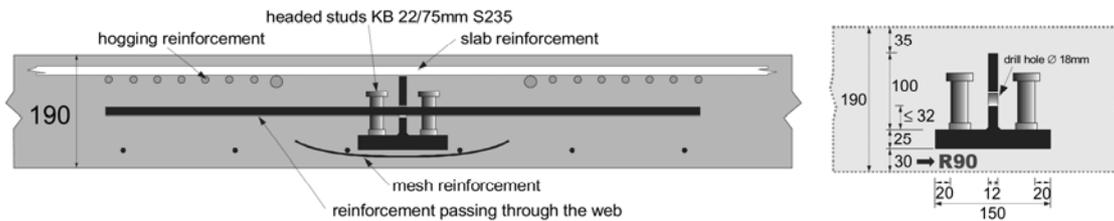


Figura 33. Travi composte in spessore del solaio

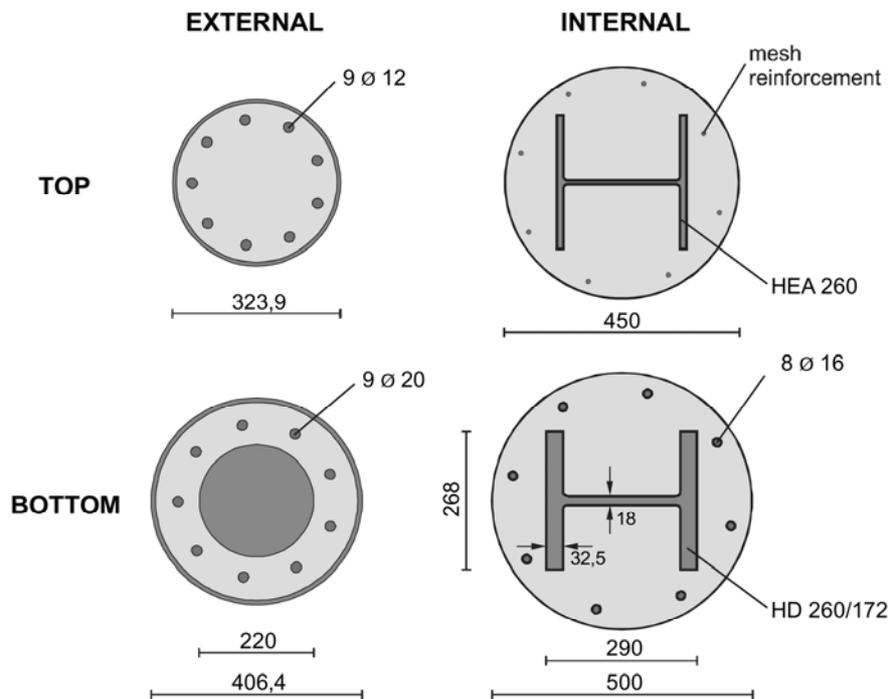


Figura 34. Sezioni delle colonne composte

Le colonne composte hanno diversa sezione a seconda se si prendono in considerazione quelle interne o quelle esterne al fabbricato, e inoltre in base al piano che si considera, hanno diverso diametro e quantità di acciaio aggiuntivo interno. Il loro riempimento ottimale è garantito grazie al getto di calcestruzzo autocompattante nel restante spazio vuoto all'interno della colonna.

I collegamenti tra le travi e le colonne sono realizzati con dei piatti saldati alle colonne e bullonati alle travi. Le forze concentrate che queste travi scaricano sulle colonne tramite la saldatura, si trasmettono al calcestruzzo grazie alla presenza di pioli chiodati lungo tutta la superficie interna delle colonne che lavorano a taglio.

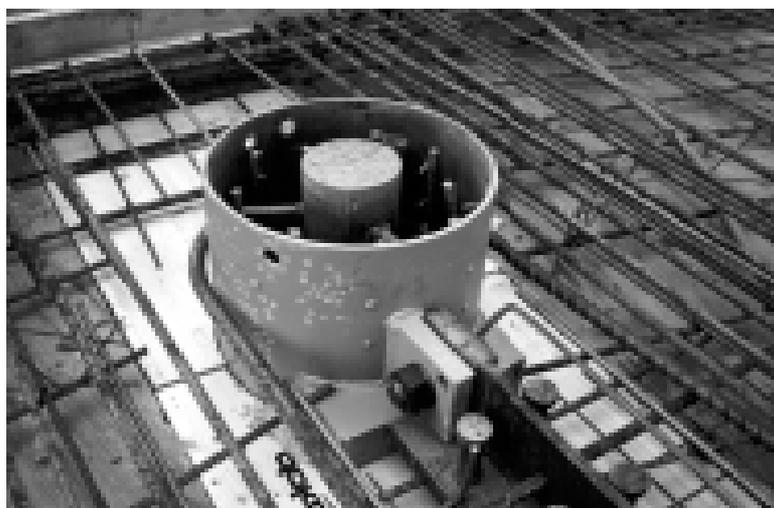
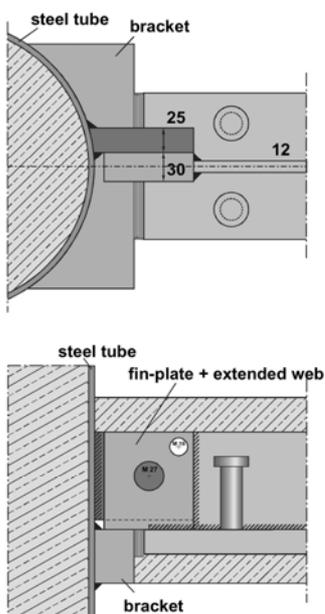


Figura 35. Dettaglio di connessione

Un altro esempio molto semplice è raffigurato in Figura 36, dove le travi in acciaio sono collegate alle colonne del tipo "partially encased", tramite un fazzoletto saldato all'ala del profilo. Il collegamento è eseguito con alcuni bulloni tra l'anima della trave ed il fazzoletto stesso: viene quindi a crearsi una cerniera.

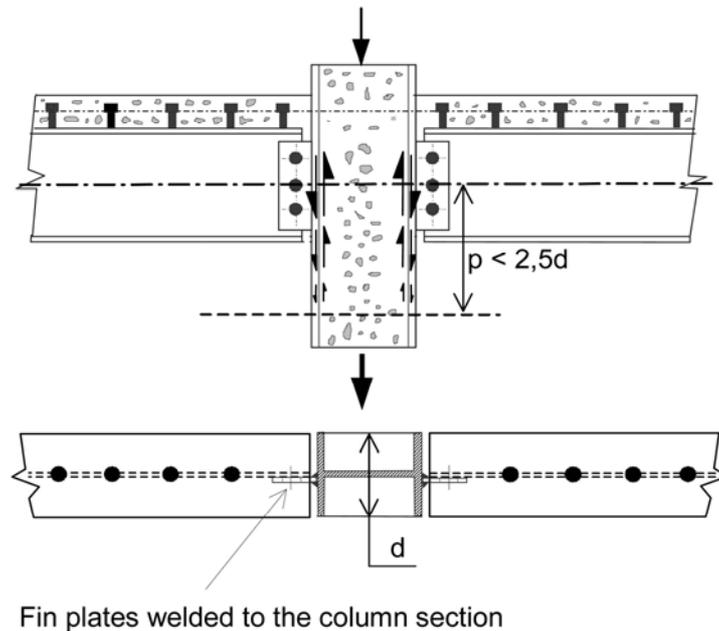


Figura 36. Dettaglio di connessione

## 2.8– CONNESSIONI TRA TRAVI IN ACCIAIO E COLONNE IN CEMENTO ARMATO

Di connessioni tra travi in acciaio e colonne in calcestruzzo armato ne sono state progettate parecchie versioni, soprattutto in Giappone e negli Stati Uniti. Alcuni esempi di queste connessioni sono stati raccolti e raffigurati in Figura 37.

I dettagli compresi dall'1 al 7 sono denominati "travi passanti", dove la trave in acciaio è continua e passante nel nodo per fare in modo che ci sia la continuità del momento negativo nel suo punto di massimo. In queste tipologie di travi si ha la formazione di fratture critiche sulle connessioni rispetto alle normali costruzioni in acciaio.

I dettagli compresi dall'8 all'11 sono denominati "colonne passanti", dove, al contrario di prima, le colonne sono continue nel nodo e vengono interrotte le travi. In questi casi si riducono gli sforzi agenti nel rinforzo della colonna all'altezza dei nodi e si facilitano le operazioni del getto nei nodi stessi.

Infine il dettaglio 12 è un esempio di connessione ibrida, dove né le travi, né le colonne vengono interrotte, ma si crea un blocco monolitico di calcestruzzo armato per poterle rendere passanti entrambe.

In generale, la principale differenza tra i casi delle travi passanti ed i casi delle colonne passanti, sono gli irrigidimenti di rinforzo che vengono applicati nei nodi per trasferire i vari sforzi che si generano dall'acciaio al calcestruzzo.

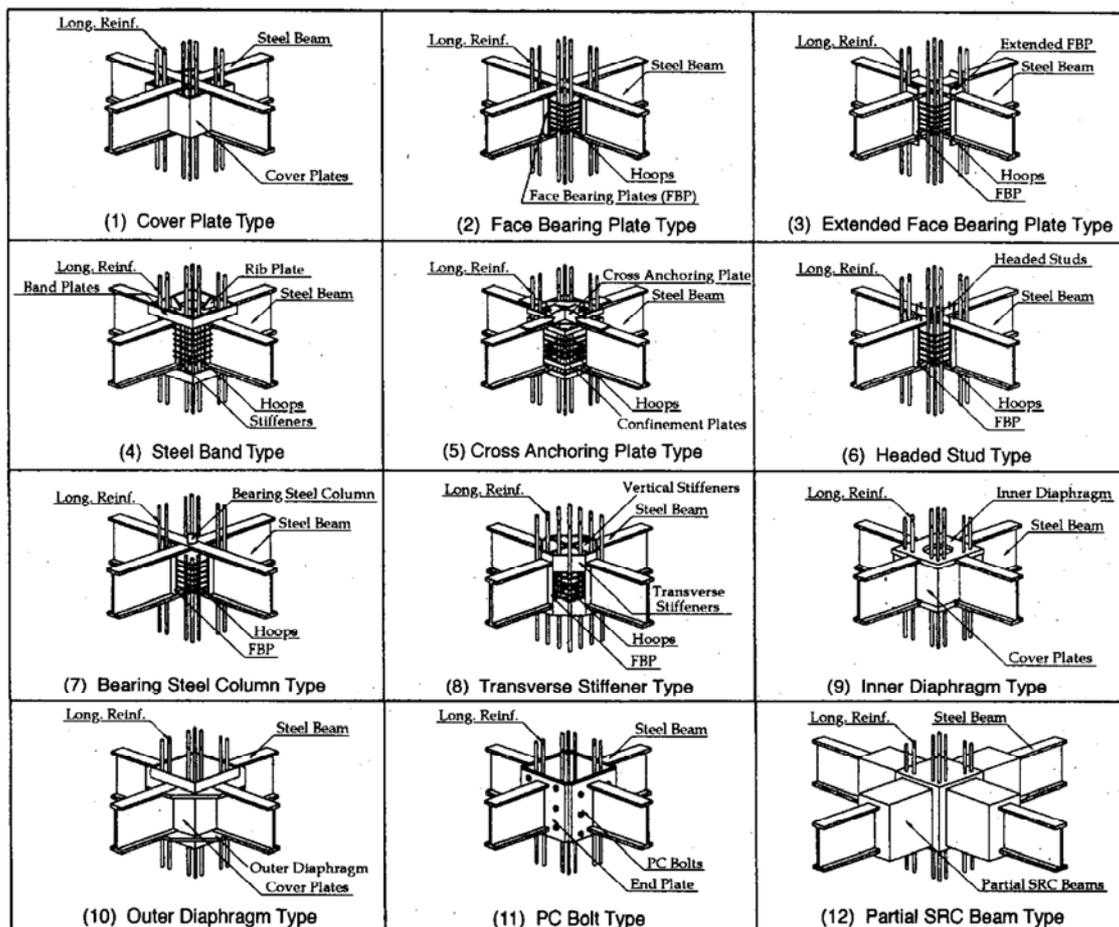


Figura 37. Dettagli di connessione

## 2.9– CONNESSIONI MEDIANTE BULLONATURA DELLE TRAVI ALLE COLONNE IN ACCIAIO

Come ultima tipologia di connessioni si può citare a titolo informativo, quella realizzata tra travi e pilastri in acciaio, dove la struttura composta si ha negli impalcati tramite getto di calcestruzzo sopra una lamiera grecata, collegata alle travi mediante dei connettori simili ai pioli tipo Nelson.

Le connessioni vere e proprie in questi casi si realizzano, molto semplicemente, tramite delle bullonature tra le travi e le colonne, mediante l'utilizzo di angolari che facilitano il collegamento tra l'anima o l'ala inferiore della trave, e l'anima o le ali del profilo della colonna.

In questi casi non si possono realizzare connessioni dove si realizzino le travi passanti, ma solamente colonne passanti.

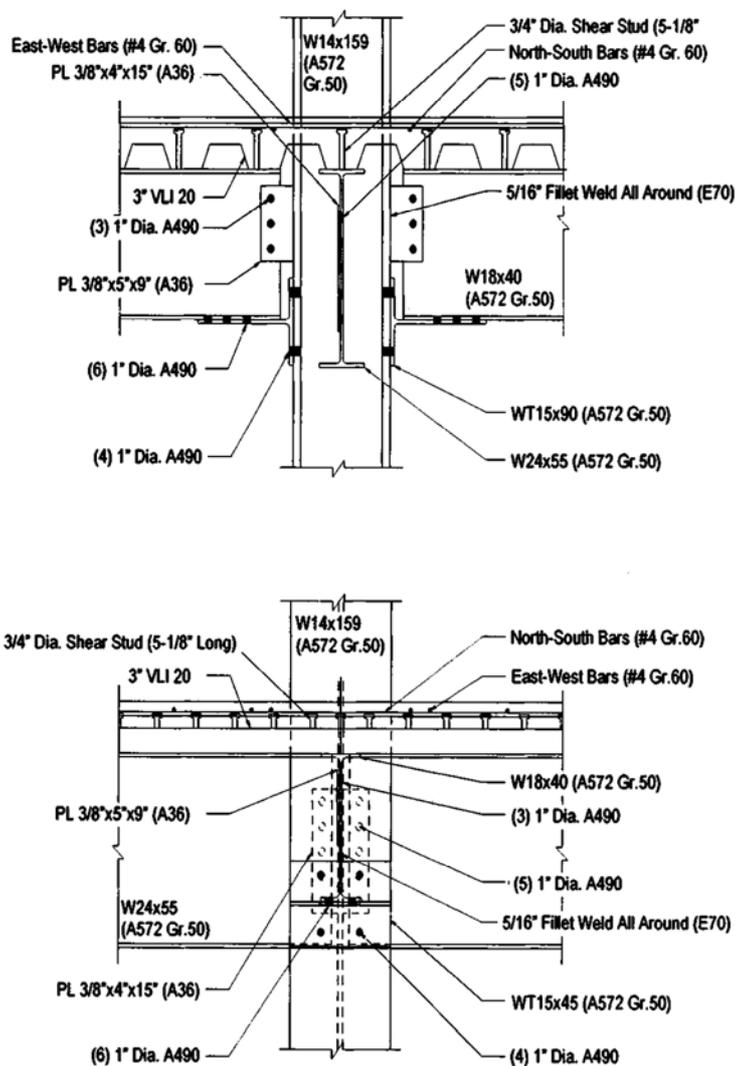
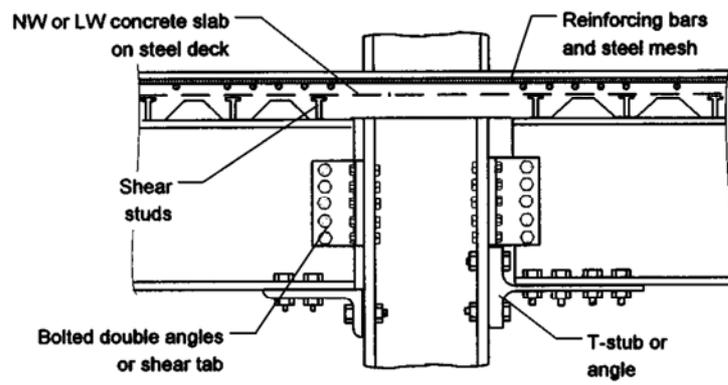


Figura 38. Dettagli di connessione



*Figura 39. Dettaglio di connessione*



---

## CAP. 3 – ANALISI CRITICA DEI NODI TROVATI

---

Dall'illustrazione delle tipologie di nodi si può notare che sono ad uno ad uno diversi tra loro in base ad alcune caratteristiche. Quindi, se studiati singolarmente, si osserverà che ciascuno avrà al tempo stesso caratteristiche positive e negative; conseguenza magari del tipo di connessione realizzata per la specifica struttura dove veniva messo in opera.

I principali problemi evidenziati, di conseguenza nei nodi, sono:

- per alcune tipologie l'interruzione delle travi nel nodo per poter permettere la continuità del pilastro, così facendo però, viene anche interrotto il momento flettente, dato dalle travi stesse;
- per altre tipologie, per ovviare all'interruzione del momento flettente e quindi delle travi, viene interrotta la continuità del pilastro;
- spesso il creare nel nodo particolari dettagli costruttivi, ne condiziona la fragilità del nodo stesso;
- difficoltà di eseguire in opera un corretto montaggio, dato dalla limitata tolleranza d'errore caratteristica di alcune tipologie di nodi;
- bassa protezione antincendio a causa delle molteplici connessioni realizzate con dettagli costruttivi in struttura metallica.



---

## CAP. 4 – CARATTERISTICHE DELLE CONNESSIONI TRAVE-PILASTRO

---

### 4.1 – CLASSIFICAZIONE

Il modo nel quale vengono uniti e collegati tra loro gli elementi strutturali è spesso uno degli aspetti critici del progetto e può, in certe circostanze, influenzare la scelta dello stesso sistema strutturale dei materiali utilizzati e delle forme da assegnare agli elementi che lo compongono. I possibili sistemi per collegare elementi strutturali diversi dipendono dalle proprietà fisiche e geometriche degli elementi da unire.

I parametri più significativi atti a dare ordine logico ai vari tipi di connessioni fra elementi strutturali in acciaio e calcestruzzo armato, sono essenzialmente i tre seguenti:

- la tipologia degli elementi da unire, sia nei riguardi del materiale componente, sia nei riguardi della funzione statica (es. trave in acciaio - pilastro in calcestruzzo armato) cui devono assolvere;
- la tecnologia del collegamento;
- le caratteristiche di sollecitazione trasmesse dalla giunzione, o reciprocamente i gradi di libertà relativa degli elementi strutturali nella giunzione.

#### 4.1.1 – Tipologia degli elementi da unire

Da questo punto di vista i collegamenti più diffusi possono essere divisi in due classi fondamentali:

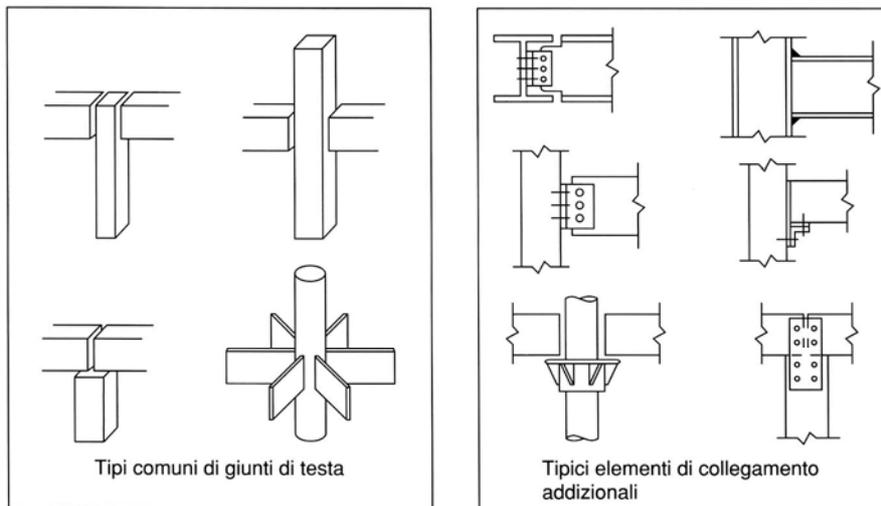
- *unione di elementi lineari;*
- *unione di elementi lineari con elementi piani.*

Per quanto riguarda la presente trattazione, sarà analizzata solo l'unione di elementi lineari e nello specifico il collegamento trave-pilastro.

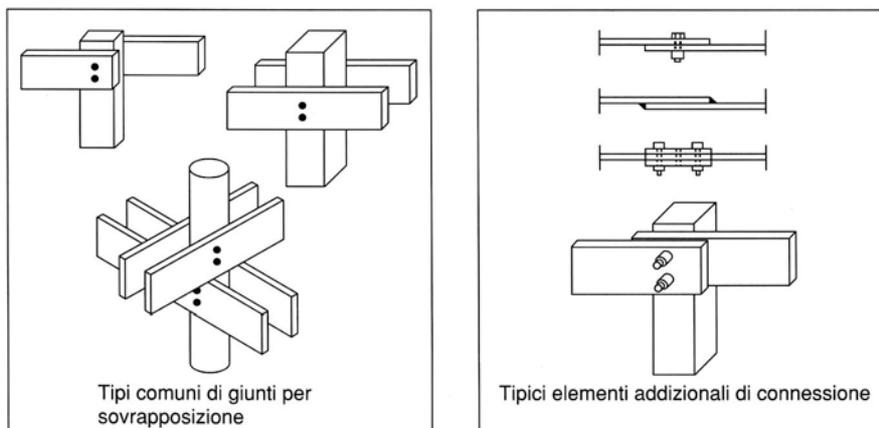
#### 4.1.2 – Tecnologia del collegamento

La maggior parte dei giunti che vengono utilizzati per unire elementi lineari, rigidi, si basa o sulla *sovrapposizione* degli elementi e sul successivo loro

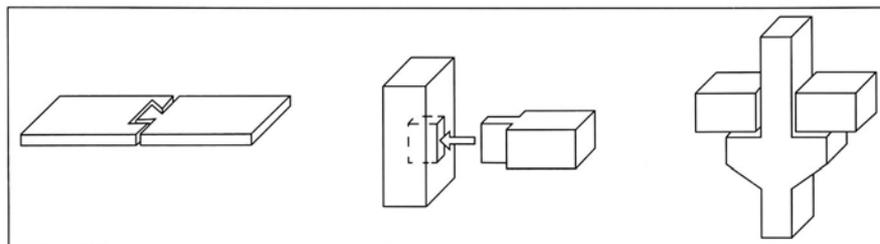
collegamento reciproco, o sulla loro *deformazione fino a realizzare un mutuo incastro* oppure, semplicemente, sul trasferimento delle forze attraverso il solo contatto. Quando si utilizza il calcestruzzo armato è possibile realizzare dei giunti monolitici.



(a) Giunti di testa. La maggior parte dei giunti di testa richiede l'uso di uno o più elementi aggiuntivi di collegamento per effettuare il trasferimento del carico da uno all'altro degli elementi



(b) Giunti per sovrapposizione. Anche i giunti per sovrapposizione richiedono l'uso di uno o più elementi aggiuntivi di connessione per effettuare il trasferimento del carico da un elemento all'altro



(c) Giunti per deformazione o incastro. Sono spesso richieste parti aggiuntive, ma su questi elementi aggiuntivi viene posta meno importanza per trasferire il carico

Figura 40. Esempi di base di giunti

La Figura 40(a) illustra diversi tipi di *giunti di testa*. In questo tipo di collegamento vengono spesso utilizzati elementi aggiuntivi di connessione tipo bulloni o saldature. I giunti possono essere sia a cerniera che rigidi. Nei giunti di testa è comune che l'elemento verticale oppure l'elemento orizzontale, sia realizzato in modo continuo attraverso il giunto. Ovviamente questo ha significative implicazioni strutturali poiché, se si desidera ottenere la continuità sia in verticale che in orizzontale, almeno con alcuni degli elementi, è necessario utilizzare speciali collegamenti rigidi. Nel campo delle costruzioni in acciaio, per esempio, è tipico realizzare le colonne continue e collegare le travi alle superfici laterali delle colonne. Se si desidera ottenere un'azione a telaio si devono realizzare dei giunti in grado di trasferire tutte le componenti dell'azione interna. I giunti di testa possono essere utilizzati vantaggiosamente nel caso di disposizioni orizzontali di tipo inusuale; la Figura 40(a) illustra quanti elementi possano essere collegati nello stesso punto ad una colonna mediante l'utilizzo di un elemento, terzo, di connessione (la flangia circolare). In questi casi la colonna è generalmente continua e le travi discontinue, a meno che non venga realizzata una speciale connessione rigida.

La Figura 40(b) illustra i diversi tipi di giunzioni per *sovrapposizione*. Questo approccio viene frequentemente utilizzato nelle strutture in legno per ottenere la continuità. Questo tipo di unione si presta bene al caso di sistemi intelaiati piani. Tuttavia, le disposizioni complesse di elementi sono difficili da trattare con questo tipo di giunto.

La Figura 40(c) mostra diversi giunti nei quali gli elementi sono stati *deformati* al fine di realizzare la connessione. La tipologia mostrata a destra, in Figura 40(c), viene spesso utilizzata con materiali che sono facilmente modellabili, come il calcestruzzo armato. Molti edifici di tipo prefabbricato sfruttano giunti di questo tipo. Anche gli elementi in legno possono essere localmente modificati per realizzare dei giunti. Il tradizionale giunto a ginocchio ne è un esempio. Nella grande maggioranza dei casi, questi giunti realizzano una connessione del tipo a cerniera oppure un semplice appoggio tra gli elementi. È tuttavia possibile realizzare anche incastri.

I giunti ottenuti conformando, deformando, ed incastrando tra loro gli elementi di base da collegare, non necessitano di particolari elementi di connessione aggiuntivi; così come i collegamenti che sono realizzati avvantaggiandosi delle proprietà di modellabilità proprie di certi materiali (come il calcestruzzo armato). Quest'ultima tipologia viene considerata come una sottoclasse del sistema per deformazione. Talvolta l'utilizzo del sistema per conformazione o deformazione ed incastro implica, al fine di accomodare queste modificazioni locali, che l'elemento

debba essere realizzato con una dimensione maggiore nella zona del giunto. Spesso, a questo incremento delle dimensioni consegue un incremento delle dimensioni anche della restante parte dell'elemento, in modo da mantenere la sezione costante. A volte, internamente ai giunti ottenuti per deformazione, vengono utilizzati degli elementi di connessione aggiuntivi (ad esempio, nel calcestruzzo armato gettato in opera vengono spesso disposte particolari barre di acciaio di rinforzo nei nodi).

Nel nostro caso, la tecnologia del collegamento consiste nell'ancorare nel getto un inserto metallico di ridotte dimensioni al quale l'elemento strutturale in acciaio abbia la possibilità di collegarsi.

Se l'unione è possibile senza getti in opera si parla di **collegamento a secco**, se viceversa sono necessari getti in opera si parla di **giunzione umida**.

Nella giunzione umida l'elemento strutturale in calcestruzzo, presenta una cavità, in cui all'atto della messa in opera viene posizionato l'inserto di acciaio.

L'esecuzione della cavità nell'elemento in calcestruzzo armato è un problema sia di orditura che di cassaforma, che può essere risolto in diversi modi. È tipico, a questo proposito, l'impiego di tubi o elementi scatolari o elementi in polistirolo espanso, annegati nel getto. Va ricordato anche l'impiego di casseforme a perdere in lamiera striata, che, rispetto alle guaine lisce, presentano il vantaggio della migliore ripresa di getto.

È opportuno, di regola, cautelarsi contro i fenomeni di ritiro nel getto della cavità, ricorrendo a calcestruzzi o malte "a stabilità volumetrica", o comunque all'impiego di materiale appositamente studiato come granulometria e come tipo e dosaggio di cemento. Il problema è particolarmente sentito poiché si debbono impiegare calcestruzzi o malte piuttosto fluide, e quindi più sensibili al ritiro.

In alcuni casi, il collegamento umido consiste nel getto, successivo al montaggio dell'elemento metallico di tutta una parte dell'elemento in calcestruzzo.

Nelle giunzioni umide, al vantaggio conseguente alle facilità di regolazione, si contrappongono lo svantaggio dovuto alla impossibilità di trasferire istantaneamente i carichi, e quindi la necessità di puntellare provvisoriamente le strutture metalliche, e lo svantaggio, sul piano dell'organizzazione del cantiere, di avere interferenze fra operazioni di carpenteria metallica e di impresa civile.

Nel collegamento a secco l'unione in opera avviene fra elementi metallici e quindi, per le necessità di regolazione, o mediante saldatura oppure mediante bulloni in fori eseguiti al montaggio.

Oltre a queste due tecnologie se ne affaccia una terza, più recente, valida prevalentemente per unioni non di forza, consistente nell'impiego di tasselli chimici.

L'operazione generalmente consiste nel collegare tramite tasselli di fissaggio la struttura metallica a quella in calcestruzzo armato.

#### **4.1.3 – Il collegamento in relazione alle condizioni di vincolo mutuo**

In termini di gradi di libertà si possono distinguere:

- collegamenti privi di gradi di libertà (incastri);
- collegamenti con libertà di traslazione (incastri scorrevoli);
- collegamenti con libertà di rotazione (cerniere);
- collegamenti con libertà di rotazione e traslazione (carrelli).

#### **4.2– COLLEGAMENTO TRAVE-PILASTRO**

In questo collegamento in genere il pilastro è in calcestruzzo armato.

L'impiego del pilastro in calcestruzzo armato in luogo di quello metallico può derivare da esigenze di protezione contro l'incendio; infatti negli edifici a telaio, l'elemento strutturale più esposto nei riguardi del pericolo di incendio è proprio il pilastro, che d'altronde costituisce un elemento strutturale fondamentale.

Il tipo più comune di questa connessione si verifica con l'appoggio diretto della trave sul pilastro (pilastro interrotto), o su mensole sporgenti da questo (pilastro passante).

In questi casi l'eterogeneità del collegamento non porta sostanzialmente problemi nuovi o diversi da quelli che si incontrano nelle analoghe connessioni fra elementi omogenei.

Più interessante il caso in cui la trave, articolata sul pilastro debba trasmettere azioni verticali positive e negative. Le caratteristiche del particolare esecutivo sono comunque molto influenzate dalla entità delle sollecitazioni da trasmettere.

Solitamente le regolazioni che si possono fare sul calcestruzzo armato sono dell'ordine dei 5 cm, mentre quelle relative alla carpenteria metallica, molto più modeste, sono dell'ordine dei 5 mm.

In alcune soluzioni il getto in due tempi del pilastro permette il corretto montaggio della trave metallica, senza ricorrere a particolari sistemi di regolazione sugli elementi metallici (è l'elemento in calcestruzzo armato che si adatta a quello in acciaio). In questo caso è opportuno che la lunghezza libera dei ferri di chiamata, corrispondente alla lunghezza del pilastro da gettare successivamente, sia

commisurata al diametro dei ferri stessi e comunque non minore di  $40 \phi$ ; questo al fine di poter facilmente adattare i ferri e nello stesso tempo di non produrre in essi troppo brusche deviazioni dall'andamento rettilineo. Le regolazioni in altezza possono essere effettuate facendo uso dei controdadi. Con questo metodo è in generale necessario il puntellamento provvisorio della trave.

Quando le dimensioni della sezione del pilastro sono notevoli (almeno 50 cm la minore dimensione) si può ricorrere all'esecuzione di una cavità che, lasciando liberi per una certa lunghezza (superiore ai  $40 \phi$ ) i ferri di chiamata, ne permetta l'adattamento alla trave. Con questo sistema si può ovviare al puntellamento provvisorio spessorando la piastra d'appoggio sul calcestruzzo.

È opportuno studiare accuratamente le dimensioni della cavità in relazione alle dimensioni del pilastro e alle sollecitazioni presenti.

Nel caso in cui i ferri di chiamata siano inseriti nella cavità è necessario studiare la forma delle cavità e verificare le sezioni indebolite della testa del pilastro.

Le sezioni finora analizzate si prestano anche, con idoneo studio della disposizione dei ferri di chiamata, e con un collegamento di tipo rigido piastra-trave, alla trasmissione di momenti flettenti (collegamento privo di gradi di libertà).

Nel caso di colonne passanti il collegamento è tipicamente secco ed avviene in opera a mezzo di saldature. Le sequenze di saldatura vanno previste in funzione delle condizioni di montaggio.

I collegamenti realizzati con totale contatto della trave sul pilastro sono in grado di trasmettere tutte e tre le caratteristiche di sollecitazione nel piano, mentre il collegamento con piastre di coltello, non è idoneo a trasmettere momento flettente e comunque vale nel caso di modesto impegno statico, soprattutto nei confronti dell'azione tagliante.

Questo collegamento, che mostra la sua validità con pilastri a sezione circolare, può adattarsi convenientemente anche a pilastri rettangolari.

È opportuno curare il posizionamento delle piastre di coltello, prima del getto, soprattutto nei confronti della verticalità e dell'allineamento con l'asse teorico della trave.

I tre collegamenti ad unica via possono essere realizzati con modalità del tutto analoghe anche quando nel nodo convergono più travi (collegamenti a due o più vie).

### 4.3– CARATTERISTICHE DEI NODI IDEALI

Una delle questioni che più influiscono sul comportamento delle costruzioni composte in acciaio-calcestruzzo è quella della connessione tra gli elementi della struttura; infatti essa costituisce un problema di duplice natura: costruttivo–esecutivo, progettuale–strutturale.

Nel primo caso riguarda le condizioni di esecuzione e montaggio in cantiere, nel secondo la trasmissione delle sollecitazioni tra gli elementi della struttura portante.

Naturalmente la **colonna composta** e la **trave composta** si collegano con una **connessione composta** trave-colonna; l'esecuzione con getti in opera può consentire così di realizzare **nodi rigidi**, **semirigidi** o **incernierati** pur mantenendo per la carpenteria metallica le caratteristiche tipiche del procedimento operativo ad essa più congeniale, contraddistinto notoriamente da uno spedito montaggio in sito mediante semplici giunzioni bullonate.

Rispetto alle classiche tipologie ad ossatura portante esclusivamente metallica, questo genere di soluzioni può comportare svariati vantaggi, di ordine statico, funzionale, tecnico-economico; in particolare un nodo per poter essere definito ideale, dovrebbe rispondere alle seguenti caratteristiche:

- continuità nel nodo delle travi e delle colonne, e quindi del momento flettente;
- facilità e velocità di montaggio in cantiere;
- inesistenza dei fenomeni di instabilità sia locale che globale nei componenti in acciaio;
- elevata durabilità strutturale con riduzione dei costi di esecuzione e manutenzione per l'implicita protezione anticorrosiva e antincendio delle parti metalliche in virtù del calcestruzzo di rivestimento e di confinamento;
- duttilità di nodo, che indica la capacità di deformarsi sotto carico prima di giungere a rottura, cioè la capacità di sopportare deformazioni plastiche in modo da poter intervenire prima del crollo;
- evitare, per quanto possibile, eccentricità tra l'asse della trave e l'asse del pilastro concorrenti nel nodo.



---

## **CAP. 5 – PROGETTAZIONE DI UN NODO DALLE CARATTERISTICHE IDEALI**

---

### **5.1– INTRODUZIONE**

Nello studio della progettazione del nodo si è cercato di rispettare tutte le caratteristiche che deve avere un nodo per poter essere considerato ideale, le quali sono elencate nel paragrafo precedente. La maggior parte di queste sono state totalmente soddisfatte, come il creare una continuità nel nodo per le travi e per le colonne ed il realizzare un rapido e veloce montaggio in cantiere. Altre invece sono state parzialmente soddisfatte ed alcune, non rispettate nella progettazione, lo divengono invece grazie ad un intervento successivo, come il verniciare le superfici a vista in acciaio con vernici intumescenti, che migliorano la protezione antincendio globale della struttura, altrimenti realizzata con un rivestimento esterno in calcestruzzo, sempre per gli elementi in acciaio, ma con un sostanziale aumento in termini di costi e di tempi di realizzazione.

Inoltre il realizzare la struttura portante in acciaio implica che si debba costruire con una precisione simile a quella delle strutture totalmente realizzate in acciaio, anche se ciò danneggerebbe sensibilmente la velocità e la facilità di montaggio, precedentemente menzionate; per questo motivo è stata assunta una tolleranza di montaggio pari ad 1/200 dell'altezza delle colonne.

Questa tolleranza è stata considerata per far fronte a possibili errori derivanti da:

- posizionamento delle colonne;
- inclinazione delle colonne;
- altezza delle colonne;
- luce delle travi.

Quindi ipotizzando d'avere un'altezza interpiano di 4 m la tolleranza assunta è di 20 mm e si prenderà in considerazione realizzando, per le giunzioni bullonate, fori asolati dove la differenza tra il diametro maggiore e quello minore è di, appunto, 20 mm.

## 5.2– MATERIALI IMPIEGATI

Nello sviluppo del nodo sono stati utilizzati calcestruzzo, acciaio d'armatura e da carpenteria metallica.

Il calcestruzzo ha classe di resistenza C25/30 dalle caratteristiche riportate nella tabella seguente:

Classi di resistenza del calcestruzzo	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ctm}$	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ctk 0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
$f_{ctk 0,95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3

Tabella 1. Classi di resistenza del calcestruzzo, resistenza caratteristica a compressione  $f_{ck}$  (cilindrica) e resistenza caratteristica a trazione  $f_{ct}$  del calcestruzzo (in  $N/mm^2$ )

L'acciaio per armatura è un acciaio ad aderenza migliorata in barre tipo FeB44K dalle caratteristiche meccaniche seguenti:

Barre tonde lisce	Tipo di acciaio		FeB 22 K	FeB 32 K
	si devono usare barre di diametro compreso fra 5 e 30 mm	Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$	$N/mm^2$	$\geq 215$
Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$		$N/mm^2$	$\geq 335$	$\geq 490$
Barre ad aderenza migliorata	Tipo di acciaio		FeB 38 K	FeB 44 K
	Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$	$N/mm^2$	$\geq 375$	$\geq 430$
si devono usare barre di diametro: $5 \leq \phi \leq 30$ mm per FeB38K $5 \leq \phi \leq 26$ mm per FeB44K	Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$	$N/mm^2$	$\geq 450$	$\geq 540$

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche per acciai da calcestruzzo armato

Le strutture in acciaio da carpenteria metallica vengono realizzate con acciaio del tipo Fe 510 dalle caratteristiche riportate di seguito:

Tipo nominale di acciaio	Spessore $t$ mm <sup>*)</sup>			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 100$ mm	
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
Fe 360	235	360	215	340
Fe 430	275	430	255	410
Fe 510	355	510	335	490

\*)  $t$  è lo spessore nominale dell'elemento.

Tabella 3. Valori nominali della tensione di snervamento  $f_y$  e della resistenza a rottura  $f_u$  per acciai strutturali conformi alla EN 10025

Infine per poter realizzare i collegamenti e le giunzioni tra le parti di struttura in acciaio da carpenteria metallica, si utilizzano bulloni di classe 10.9 dalle caratteristiche riportate nella tabella seguente:

Classe del bullone	4,6	4,8	5,6	5,8	6,8	8,8	10,9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	320	300	400	480	640	900
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	400	500	500	600	800	1000

Tabella 4. Valori nominali della resistenza allo snervamento  $f_{yb}$  e della resistenza a rottura per trazione  $f_{ub}$  per i bulloni

### 5.3– DIMENSIONI E CARICHI DA PROGETTO

Per poter dimensionare verosimilmente ogni singolo dettaglio del nodo si è partiti da un'ipotesi di progetto di una struttura che avesse le seguenti caratteristiche:

- lunghezza delle travi: 5,00 m;
- lunghezza del solaio realizzato con pannelli alveolari: 8,00 m;
- carico di superficie permanente: 300 daN/m<sup>2</sup>;
- carico di superficie accidentale: 500 daN/m<sup>2</sup>.

Realizzando il solaio in pannelli prefabbricati alveolari privi di elementi di alleggerimento in laterizio si può calcolare lo spessore del solaio come 1/30 della sua luce di calcolo, risultando quindi di 27 cm.

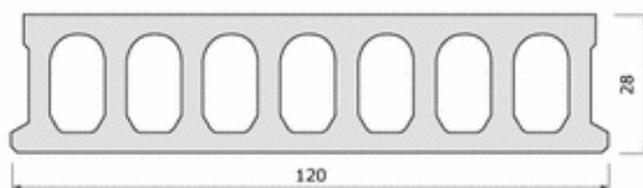


Figura 41. Sezione tipo pannello prefabbricato alveolare

Per semplicità si assume un pannello di spessore 28 cm più comune e presente nel mercato. Il peso al metro lineare di questo pannello è pari a 456 daN/m.

Inoltre per poter realizzare trasversalmente alla disposizione dei pannelli alveolari una correa di ripartizione, si prevede di realizzare una cappa collaborante, dello spessore di 8 cm, che viene quindi ad avere un carico di superficie di 200 daN/m<sup>2</sup>.

Ipotizzando che la trave abbia dimensioni 35x40 cm, in modo da avere continuità strutturale con i pilastri di diametro 35 cm, questa viene a pesare 350 daN/m.

Si hanno quindi, sommando tutti i singoli contributi, i seguenti carichi gravanti sulle travi:

- carico permanente per metro lineare: 7390 daN/m<sup>2</sup>;
- carico accidentale per metro lineare: 4000 daN/m<sup>2</sup>.

## 5.4– DESCRIZIONE DEL NODO

Per eseguire uno studio completo sono state progettate per il nodo un'ipotesi di cerniera ed una di incastro; naturalmente per sviluppare l'incastro si è partiti dal modello della cerniera.

Per entrambe le soluzioni vi è un collegamento tra Travi REP<sup>®</sup> "NOR" con piatto in acciaio e colonne "concrete filled", ovvero profilo circolare in acciaio riempito di calcestruzzo. Per le Travi REP<sup>®</sup> "NOR", il piatto in acciaio oltre a rappresentare parte integrante della struttura portante, è anche appoggio autoportante per il solaio e cassero per il getto di completamento in calcestruzzo;

### 5.4.1 – Cerniera

Questa soluzione strutturale è realizzata semplicemente con un collegamento bullonato tra le travi e la colonna.

Questo avviene grazie ad un piatto passante all'interno della colonna e altri due piatti, opportunamente saldati alla Trave REP<sup>®</sup> "NOR", di spessore pari alla metà di quello del piatto precedente. I fori realizzati sui piatti saldati alla Trave REP<sup>®</sup> "NOR", sono fori asolati, che permettono una libera rotazione delle travi e realizzano quindi una cerniera, oltre a semplificare le operazioni di posa in opera date dalla tolleranza di montaggio.

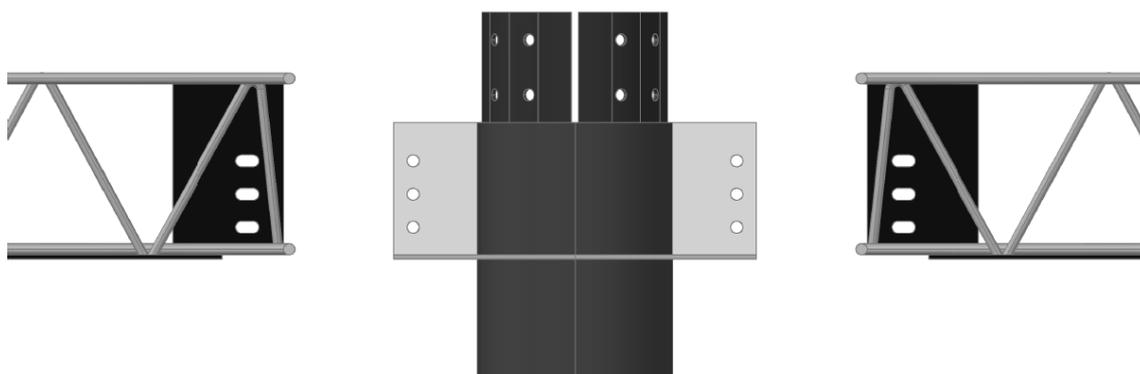
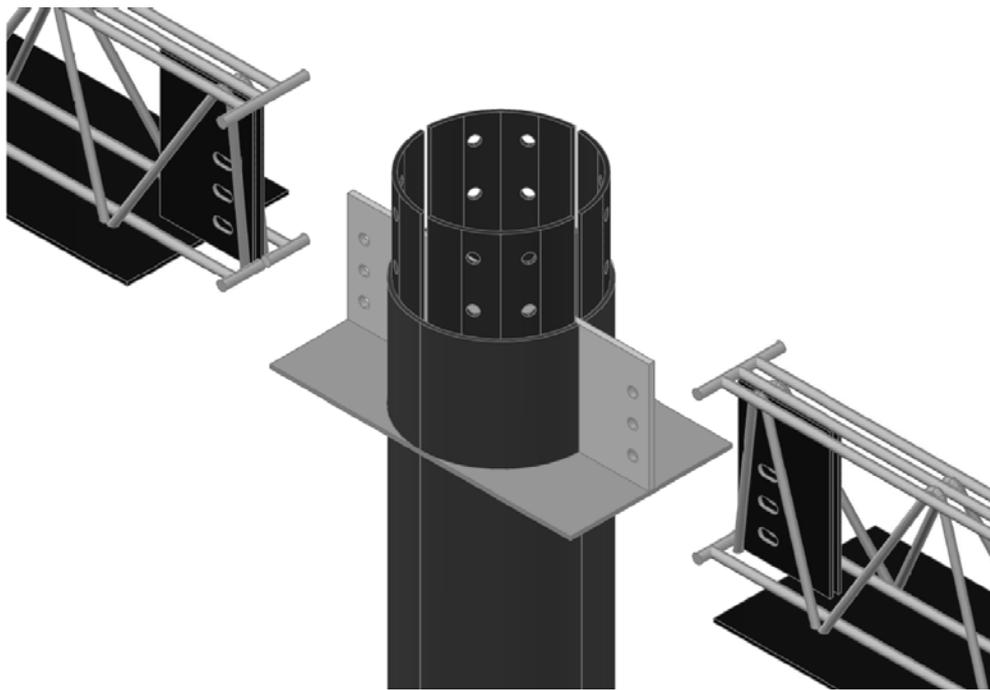
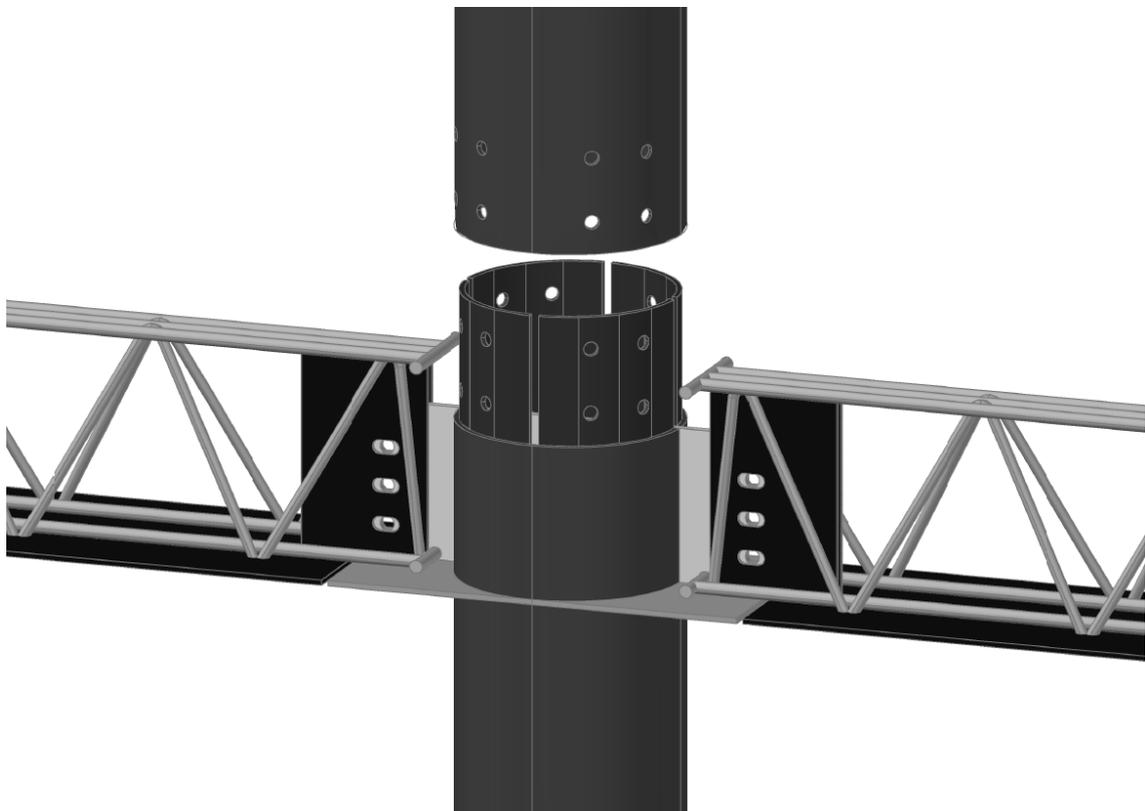


Figura 42. Prospetto



*Figura 43. Esploso assometrico*



*Figura 44. Fasi di montaggio*

Per questa soluzione la continuità nel nodo delle travi è realizzata grazie al piatto di collegamento che ha la sola funzione di scaricare sulla colonna il carico di taglio dato dalle travi stesse. La continuità della colonna è invece garantita da un semplice collegamento mediante bulloni ciechi tra un profilo e quello successivo.

Implicitamente, essendo tutti i collegamenti bullonati, vi è una notevole facilità e velocità di montaggio in cantiere della struttura portante, senza alcun bisogno di puntelli.

#### 5.4.2 – Incastro

L'incastro, oltre ad avere le caratteristiche precedentemente menzionate per la cerniera, deve realizzare anche la continuità al momento flettente negativo. Quindi sono state collegate le travi con un sistema di piatti in acciaio e barre ad aderenza migliorata.

In questo caso però non potendo sfruttare la tolleranza di montaggio, perché altrimenti non si sarebbe realizzata la continuità al momento flettente, si è quindi deciso di collegare i piatti, invece che con un sistema di bulloni, con un sistema di cunei, dove una volta inseriti nei fori di collegamento e incastrati per battitura, realizzano una connessione tale da assicurare anche la trazione.

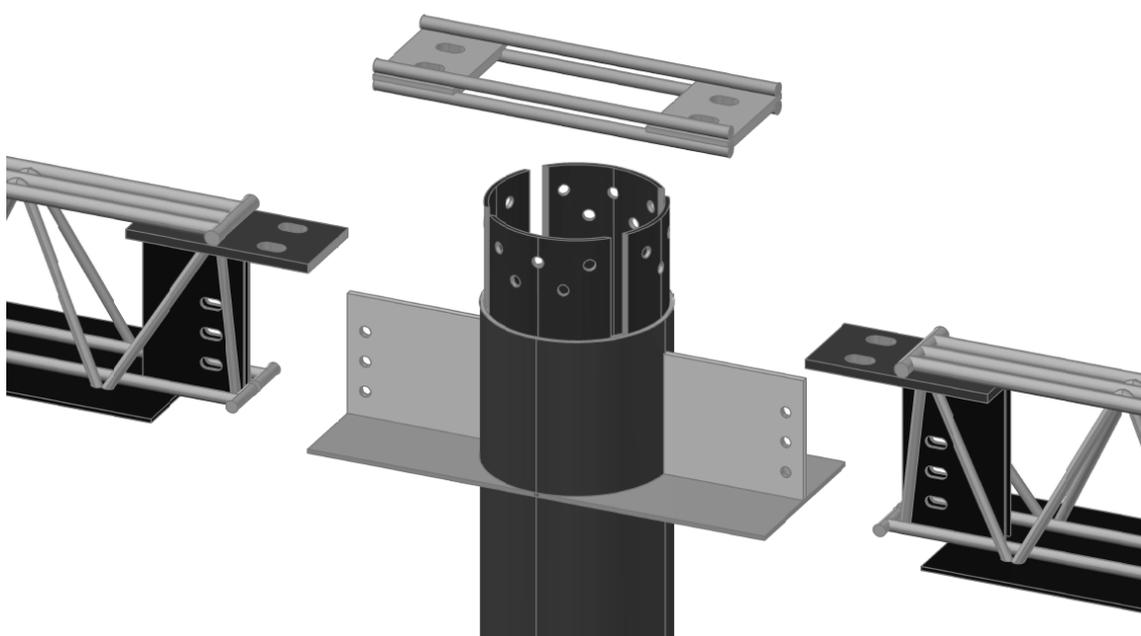
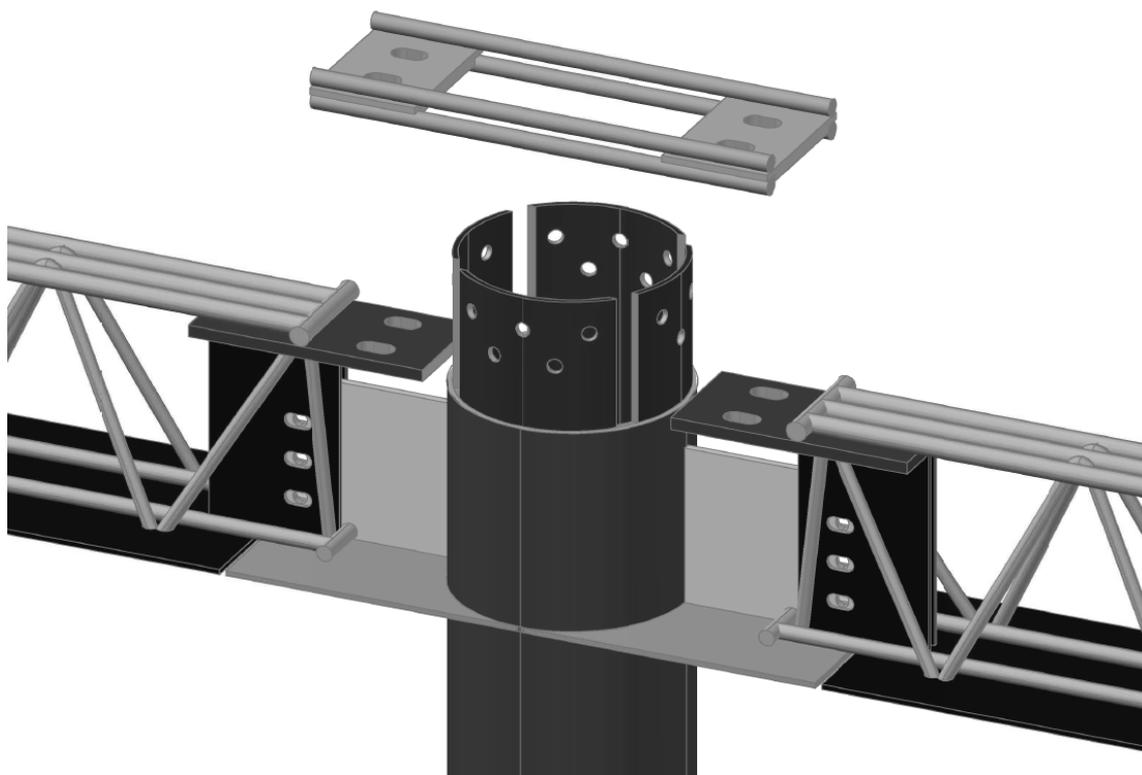
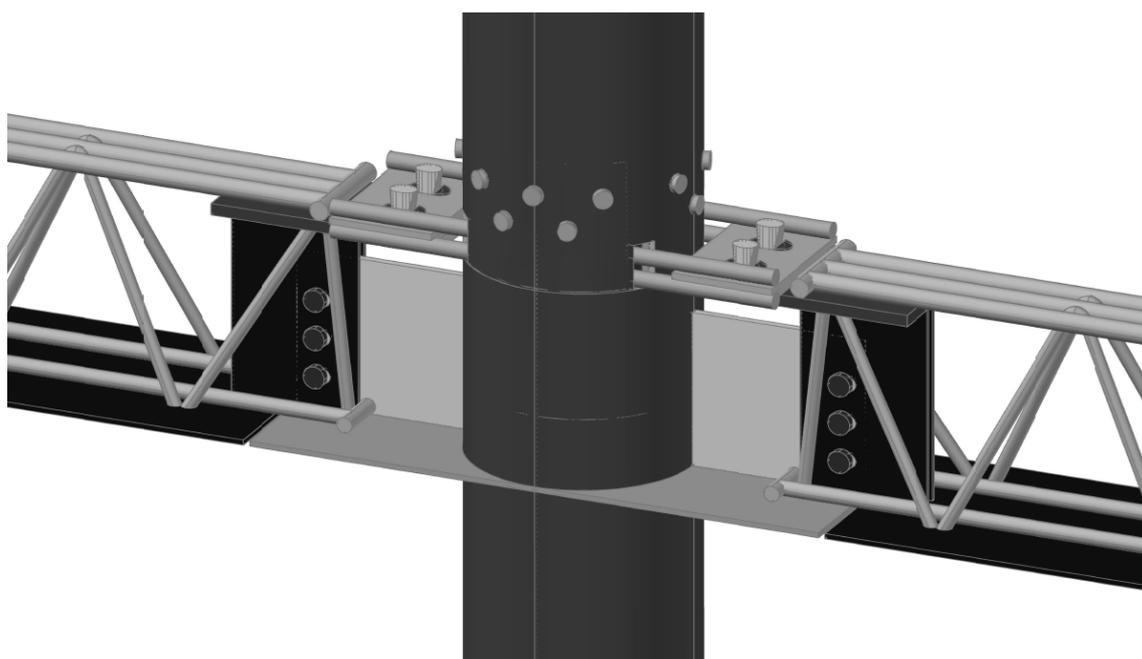


Figura 45. Esploso assometrico



*Figura 46. Fasi di montaggio*



*Figura 47. Incastro realizzato*

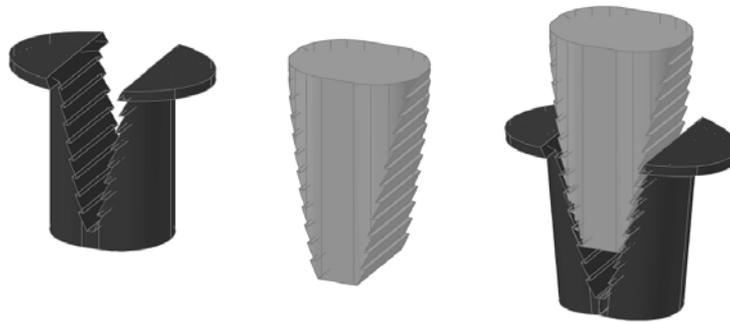


Figura 48. Particolare del cuneo prima e dopo il fissaggio

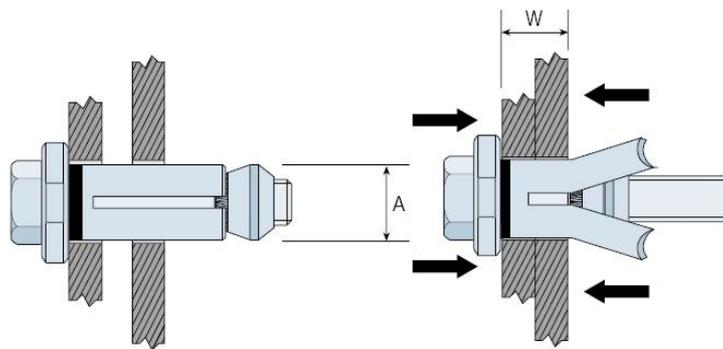


Figura 49. Bullone cieco prima e dopo il fissaggio

## 5.5– AZIONI DI CALCOLO E VERIFICHE

Le combinazioni di azioni agenti sulla struttura ( $F_d$ =azioni di calcolo) e la capacità resistente degli elementi strutturali ( $f_d$ =resistenza di calcolo) sono definite dalla normativa in funzione del metodo di calcolo usato nelle verifiche.

Nel metodo semiprobabilistico agli stati limite si fa riferimento a due tipi di stato limite:

SLU = stato limite ultimo;

SLE = stato limite di esercizio.

Lo stato limite ultimo rappresenta un limite oltre il quale si ha una condizione di pericolo per la resistenza della struttura, mentre lo stato limite di esercizio rappresenta un limite oltre il quale si ha una condizione non ottimale per l'uso dell'edificio studiato che può in condizione limite impedirne il funzionamento.

Nel nostro caso si fa riferimento agli stati limite ultimi (SLU), dove le azioni agenti sulla struttura si cumulano nel modo più sfavorevole secondo la combinazione:

$$F_d = \gamma_g \cdot G_K + \gamma_q \cdot Q_K$$

$G_K$  = azioni permanenti

$Q_K$  = azioni variabili

$\gamma_g = 1,4$

$\gamma_q = 1,5$

Le verifiche poi, sono state effettuate seguendo le indicazioni date dall'Eurocodice 3 (strutture in acciaio) ed Eurocodice 4 (strutture miste acciaio-calcestruzzo), per ogni singolo particolare del nodo studiato.

In particolare ogni singolo piatto forato è stato verificato a rifollamento ed a resistenza della sezione netta, rispettivamente secondo le formule:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}}$$

$f_u$  = resistenza ultima del piatto

$d$  = diametro del bullone

$t$  = spessore del piatto

$\alpha$  = parametro geometrico dipendente dal diametro del foro, dall'interasse fra i bulloni, dalla distanza dal centro del foro all'estremità del piatto nella direzione della forza e dalle resistenze ultime del piatto e del bullone

$\gamma_{Mb} = 1,25$

$$V_{eff,Rd} = \frac{\frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot A_{v,eff}}{\gamma_{M0}}$$

$f_y$  = resistenza a snervamento per il piatto

$A_{v,eff}$  = area efficace a taglio nel meccanismo "block shear"

$\gamma_{M0} = 1,1$

Tutti i bulloni sono stati verificati a taglio e non avendo altri termini di paragone, anche la connessione realizzata con i cunei è stata verificata a taglio come se fosse stata effettuata con bulloni, secondo la formula:

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

$f_{ub}$  = resistenza ultima a trazione del bullone

$A_s$  = area resistente del bullone

$\gamma_{Mb}$  = 1,25

I cunei, per questo motivo, si pensano realizzati dello stesso materiale con il quale si realizzano i bulloni di classe 10.9, utilizzati per le altre connessioni dell'incastro.

Di particolare importanza è la verifica delle barre passanti la colonna, resistenti a momento negativo, in quanto in presenza di eccentricità, sono sottoposte a presso-tensione.

Per ovviare a questa verifica, che anche in presenza di una piccola eccentricità diventa assai gravosa per l'elevata forza di trazione applicata alle barre tese, è stata allineata la risultante delle barre passanti nella colonna con le barre superiori delle Travi REP<sup>®</sup> "NOR" (Figura 49), avendo così eccentricità nulla e di conseguenza verificandole solo a trazione.

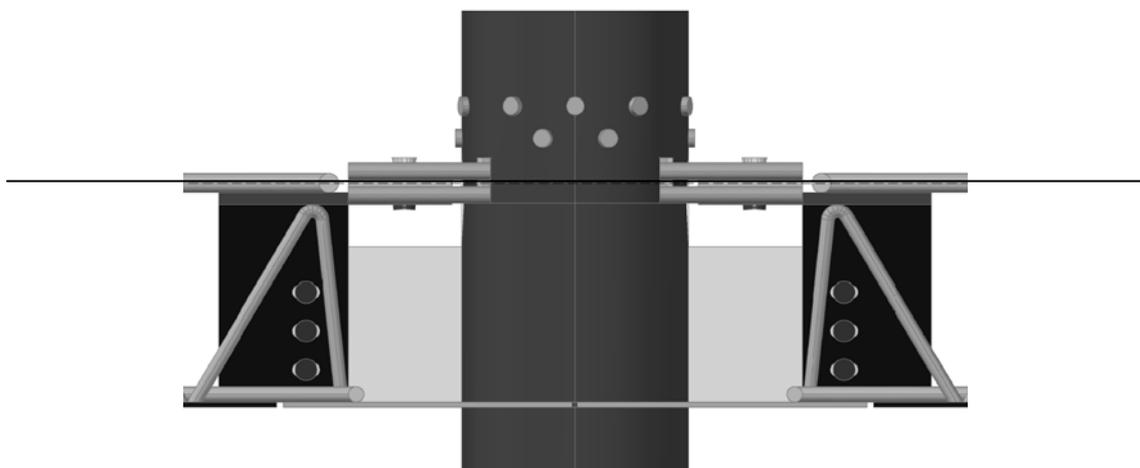


Figura 50. Allineamento delle barre tese

## 5.6– DOMINIO DI RESISTENZA DELLA COLONNA COMPOSTA

Per eseguire uno studio completo della colonna composta è stato studiato il suo dominio di resistenza M-N per quattro diverse ipotesi di sezioni realizzabili.

Il dominio di resistenza M-N consiste nel luogo dei punti del piano N-M corrispondenti alle coppie di coordinate N (sforzo normale) ed M (momento flettente) che determinano la crisi della sezione.

Una volta noto il dominio di resistenza M-N della sezione, detti  $M_{Sd}$  ed  $N_{Sd}$ , rispettivamente il momento flettente e lo sforzo normale che sollecitano la sezione, si riporta sul diagramma il punto di coordinate  $(N_{Sd}; M_{Sd})$  e possono presentarsi due possibilità:

- $(N_{Sd}; M_{Sd})$  punto interno al dominio la sezione è verificata
- $(N_{Sd}; M_{Sd})$  punto esterno al dominio la sezione non è verificata

La costruzione del dominio M-N si fa assegnando una deformata di rottura e si determina il diagramma delle deformazioni, quindi attraverso i legami costitutivi, il diagramma delle tensioni. Si calcolano quindi le risultanti delle tensioni di compressione del calcestruzzo e dell'acciaio in zona compressa, e di trazione dell'acciaio in zona tesa.

Imponendo l'equilibrio alla traslazione di queste tensioni si determina lo sforzo normale N, mentre imponendo l'equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro geometrico della sezione, si determina il momento flettente M.

Le coordinate N ed M, così trovate, corrispondono ad una deformata di rottura ed individuano sul piano N-M un punto del dominio. Studiando quindi tutti le possibili deformate di rottura, si riesce a disegnare sul piano N-M, l'intero dominio di resistenza della sezione.

Le quattro ipotesi di sezioni prese in considerazione per lo studio del dominio di resistenza si riferiscono ad una sezione in posizione intermedia della colonna per il caso integro, ed alla sezione in corrispondenza della posizione dei fori per la giunzione con bulloni ciechi per il caso forata che nello specifico sono le seguenti:

- a) sezione integra con armatura aggiuntiva pari a  $4\phi 20$  interni al profilo circolare;
- b) sezione integra senza armatura aggiuntiva;
- c) sezione forata con armatura aggiuntiva pari a  $4\phi 20$  interni al profilo circolare;
- d) sezione forata senza armatura aggiuntiva.

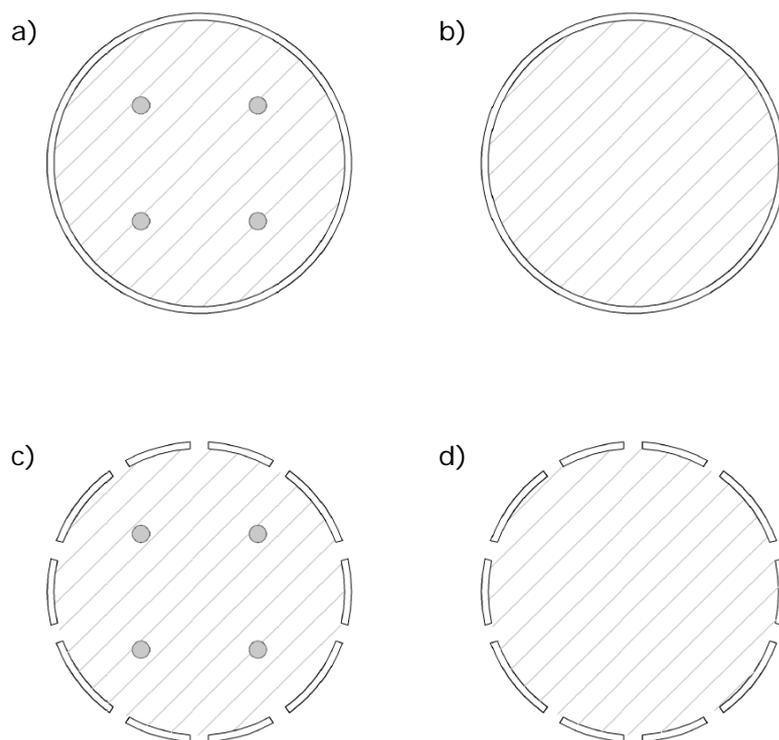


Figura 51. Ipotesi di sezioni

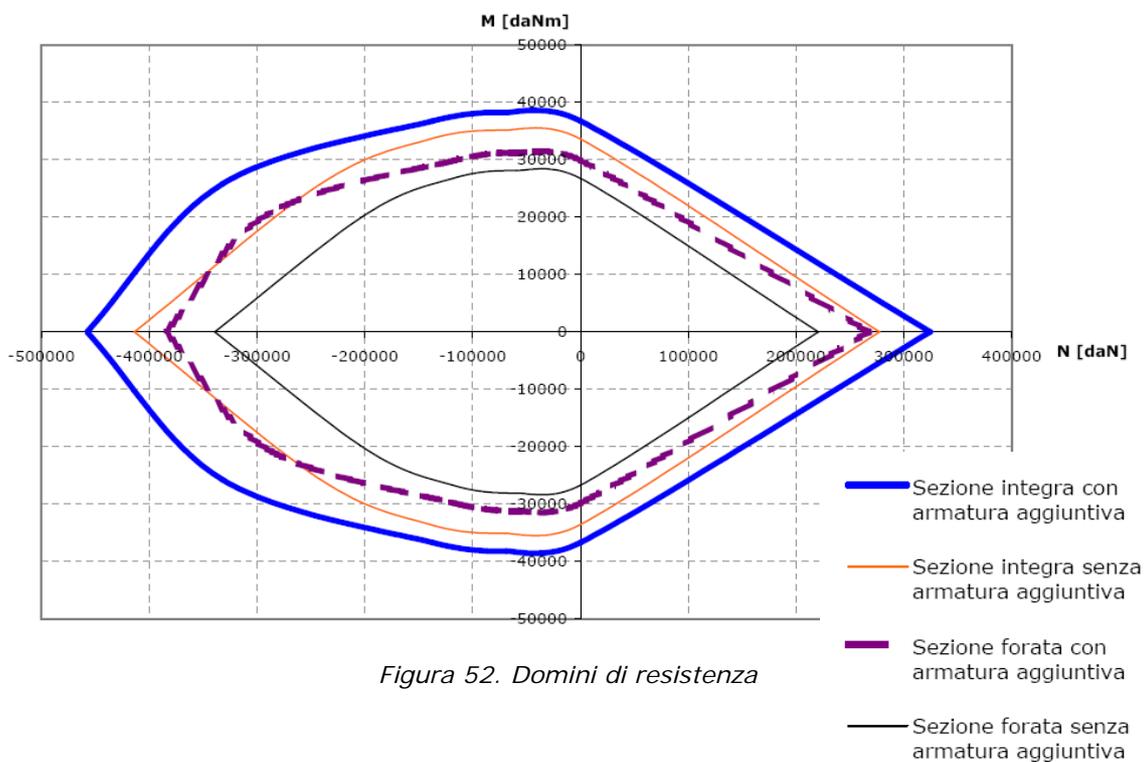


Figura 52. Domini di resistenza

In Figura 52 sono rappresentati i quattro diversi domini di resistenza delle quattro sezioni studiate; è interessante notare che sia nel caso con armatura aggiuntiva pari a  $4\phi 20$  e sia nel caso semplice senza armatura aggiuntiva, la presenza dei fori per il collegamento tra due profili successivi riduce del 20% tutto il dominio di resistenza della colonna. Mentre il disporre l'armatura aggiuntiva nelle due diverse sezioni, integra e forata, non provoca un aumento omogeneo della resistenza, in quanto questa è influenzata molto dai punti di disposizione delle barre.

---

## CAP. 6 – CONCLUSIONI

---

Il nodo studiato è stato progettato per resistere a sforzi statici dati dai carichi di progetto e, soprattutto, cercando di rispettare tutte le caratteristiche proprie di un nodo ideale. Un ulteriore ed interessante studio sarebbe quello di generalizzarlo e renderlo resistente anche a sforzi dinamici come quelli dati da un sisma.

Per questo motivo è stata iniziata la progettazione di un nodo resistente anche a sisma, partendo dal nodo progettato in questa fase e modificandolo in modo tale da resistere anche a momenti positivi. Tutto il lavoro poi sarà sviluppato in un'altra tesi di laurea, già iniziata, che studierà nel dettaglio il comportamento sismico del nodo progettato.

L'ipotesi di nodo resistente anche a sisma, è rappresentata nelle Figure 53, 54 e 55, dove per resistere a momento positivo sono stati saldati al piatto orizzontale della colonna, due pioli tipo Nelson per lato, in modo tale da creare un puntone compresso di calcestruzzo tra di loro ed il martello inferiore della Trave REP<sup>®</sup> "NOR", una volta realizzato l'incastro e sottoposto a momento positivo.

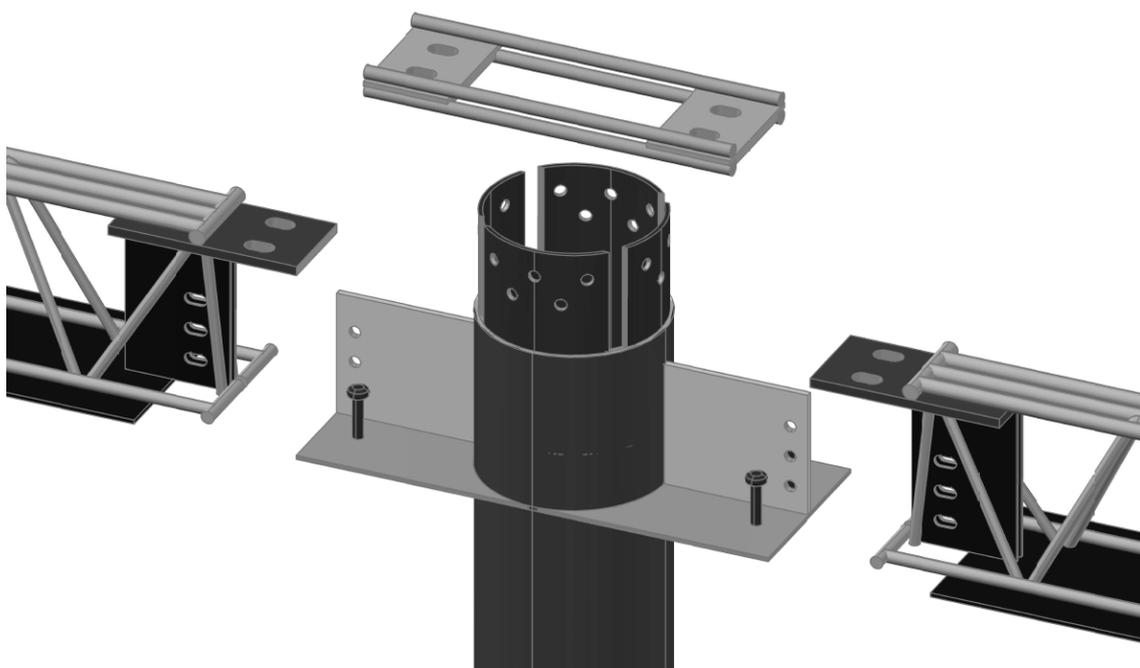
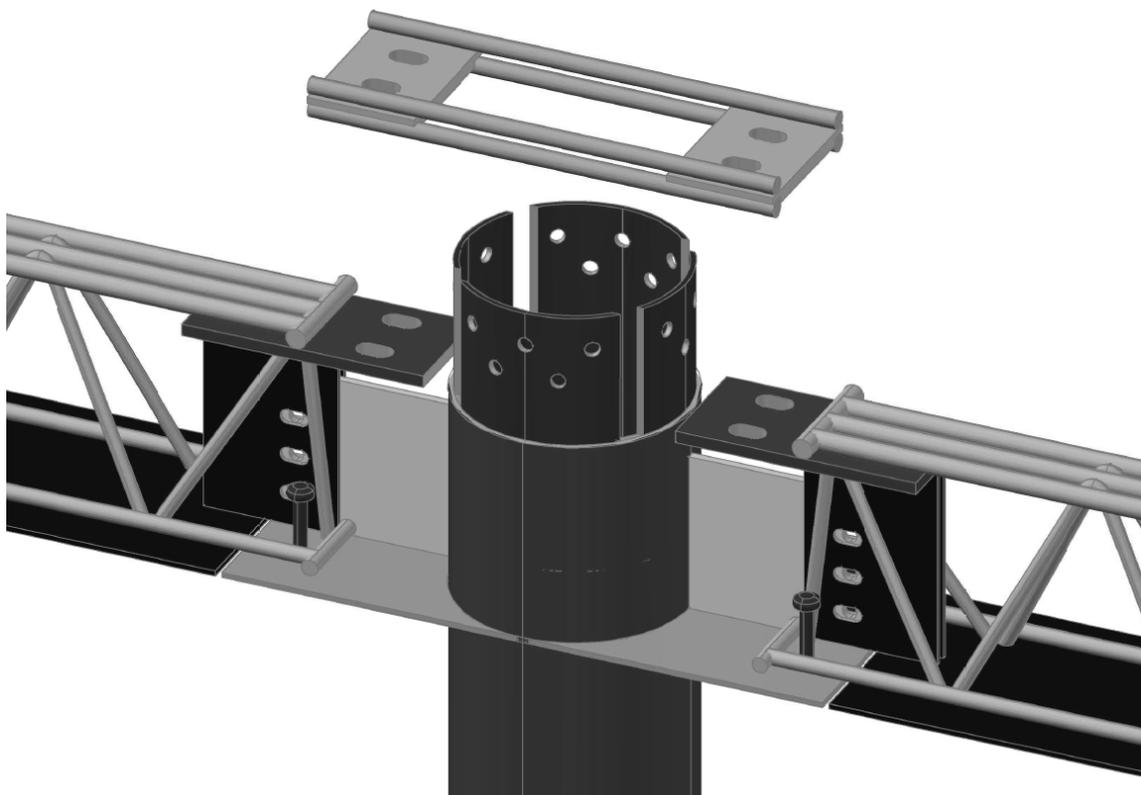
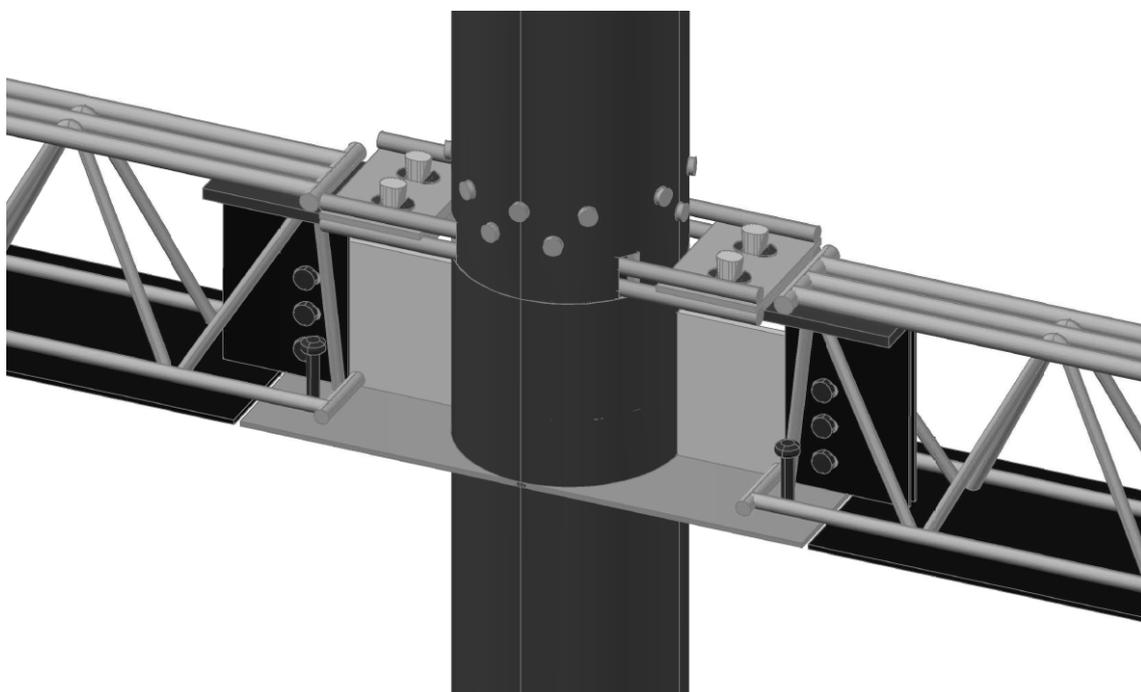


Figura 53. Esploso assometrico



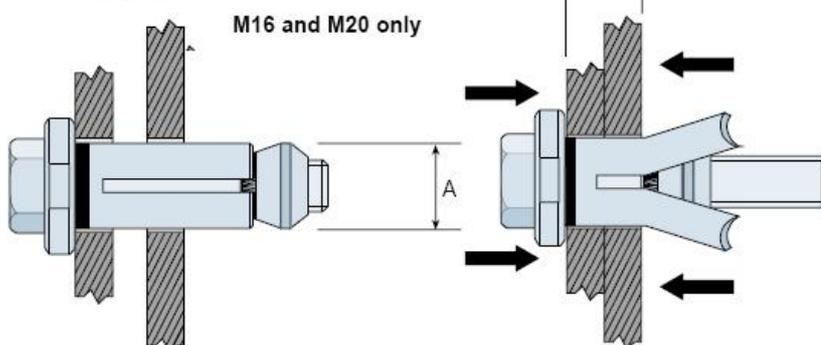
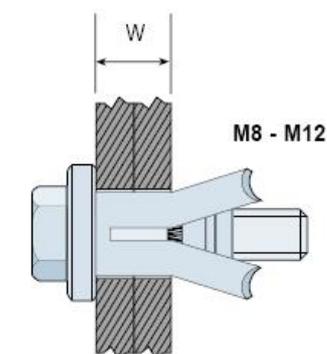
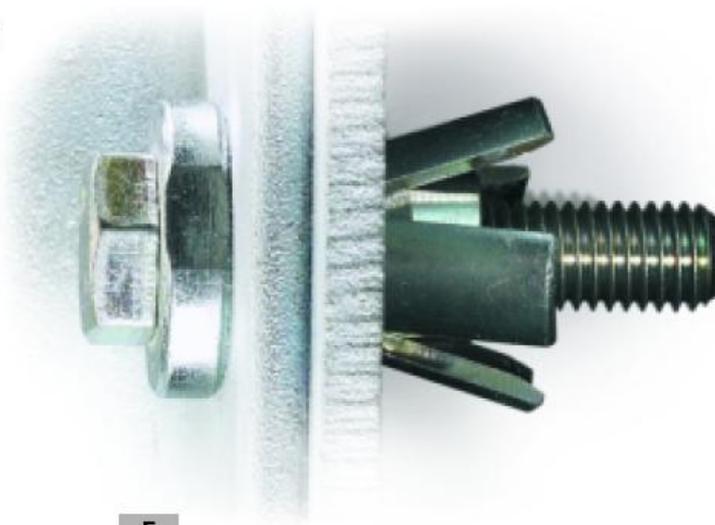
*Figura 54. Fasi di montaggio*



*Figura 55. Incastro realizzato*

## APPENDICE A – CATALOGO BULLONI CIECHI

### Type HB - Holo-Bolt



E  
D7



Il Lindapter Holo-Bolt è un metodo certificato per imbullonare delle flange a delle sezioni scatolari in acciaio di sezione quadrata, rettangolare o circolare dove l'accesso è consentito solo da un lato. Il Holo-Bolt consente di ridurre drasticamente i tempi di installazione e i costi se confrontato con i metodi tradizionali e allo stesso tempo la scelta del prodotto adatto alle esigenze strutturali è facilmente determinato dal progettista che può avvalersi di schede tecniche

redatte dall'azienda produttrice. Il Hollo-Bolt offre una protezione standard agli agenti aggressivi e in caso è disponibile anche in acciaio inossidabile

Le tipologie di bulloni M16 ed M20 sono in grado di creare un meccanismo di collasso che massimizza la forza d'ammorsamento tra le due flange, in modo che essi possano essere utilizzati come connessione primaria per il momento.

Le principali applicazioni di questi bulloni Hollo-Bolt sono la connessione o la sospensione di:

- strutture di acciaio primario;
- strutture di acciaio secondario;
- equipaggiamento meccanico;
- meccanismi di sollevamento;
- equipaggiamenti elettrici;
- sistemi di protezione incendio.

Per le teste dei bulloni sono disponibili una varietà di colori e rifiniture.



Countersunk



Hexagonal Head



Button Head Security



Socket Head Cap Screw

## Type HB - Hollo-Bolt

Bolt Size	Product Code	Setscrew Length (mm)	Fixing Thickness W (mm)		Across Flats Main Body (mm)	Tightening Torque (Nm)	Shank Diameter (mm) A	Hole Size (mm)	RHS Section***	S.W.L. (kN)* 5:1 Factor of Safety	
			Min	Max						Tensile	Single Shear
M8	HB 08 Size 1 Size 2 Size 3	50 70 90	3 22 41	22 41 60	19	23	14	15	100 x 100 x 6.3	4.0	5
									100 x 100 x 10.0	4.0	
									140 x 140 x 5.0 / 6.3 / 8.0 / 10.0 / 12.5	4.0	
									150 x 150 x 6.3	4.0	
									150 x 150 x 10.0	4.0	
									180 x 180 x 8.0	4.0	
200 x 200 x 10.0	4.0										
M10	HB 10 Size 1 Size 2 Size 3	55 75 90	3 22 41	22 41 60	24	45	18	19	100 x 100 x 6.3	7.0	10
									100 x 100 x 10.0	8.0	
									140 x 140 x 5.0	6.0	
									140 x 140 x 6.3	8.0	
									140 x 140 x 8.0 / 10.0 / 12.5	8.5	
									150 x 150 x 6.3	8.0	
150 x 150 x 10.0	8.0										
180 x 180 x 8.0	7.0										
200 x 200 x 10.0	8.0										
M12	HB 12 Size 1 Size 2 Size 3	60 90 110	3 25 47	25 47 69	30	80	20	21	100 x 100 x 6.3	10.0	15
									100 x 100 x 10.0	10.5	
									140 x 140 x 5.0	6.5	
									140 x 140 x 6.3	10.0	
									140 x 140 x 8.0 / 10.0 / 12.5	10.5	
									150 x 150 x 6.3	10.0	
150 x 150 x 10.0	10.5										
180 x 180 x 8.0	10.0										
200 x 200 x 10.0	10.5										
M16	HB 16 Size 1 Size 2 Size 3	75 100 120	12** 29** 50**	29 50 71	36	190	26	28	100 x 100 x 6.3	13.5	30
									100 x 100 x 10.0	18.5	
									140 x 140 x 5.0	8.0	
									140 x 140 x 6.3	15.0	
									140 x 140 x 8.0 / 10.0	20.0	
									140 x 140 x 12.5	22.0	
150 x 150 x 6.3	11.5										
150 x 150 x 10.0	15.0										
180 x 180 x 8.0	17.0										
200 x 200 x 10.0	15.0										
M20	HB 20 Size 1 Size 2 Size 3	90 120 150	12** 34** 60**	34 60 86	46	300	33	35	100 x 100 x 6.3	16.0	40
									100 x 100 x 10.0	25.0	
									140 x 140 x 6.3	16.0	
									140 x 140 x 8.0	23.0	
									140 x 140 x 10.0	25.0	
									140 x 140 x 12.5	40.0	
150 x 150 x 6.3	12.5										
150 x 150 x 10.0	19.0										
180 x 180 x 8.0	18.0										
200 x 200 x 10.0	19.0										

## Stainless Steel Hollo-Bolt

Bolt Size	Product Code	Setscrew Length (mm)	Fixing Thickness W (mm)		Across Flats Main Body (mm)	Tightening Torque (Nm)	Shank Diameter (mm) A	Hole Size (mm)	RHS Section***	S.W.L. (kN)* 5:1 Factor of Safety	
			Min	Max						Tensile	Single Shear
M8	HB 08 316 SS	50	3	22	19	23	14	15	140 x 140 x 12.5	6	5
M10	HB 10 316 SS	55	3	22	24	45	18	19	140 x 140 x 12.5	10	10
M12	HB 12 316 SS	60	3	25	30	80	20	21	140 x 140 x 12.5	15	15
M16	HB 16 316 SS	75	12**	29	36	190	26	28	140 x 140 x 12.5	33	30
M20	HB 20 316 SS	90	12**	34	46	300	33	35	140 x 140 x 12.5	46	40

\* Safe Working Loads for the Hollo-Bolt are dependent upon the yield strength of the hollow section steel particularly with some of the lighter sections. Safe working loads shown above have been determined through testing in material with minimum yield strength of 275 N/mm<sup>2</sup>. Use of steel with lower yield strength will result in lower safe working loads. The highest tensile figure given for each bolt size is the safe working load of the Hollo-Bolt itself. Any lower figures against a particular size show that the mode of failure in that case is the hollow section steel, rather than the Hollo-Bolt.

\*\* Whilst the minimum fixing thickness for M16/M20 is 12mm, it is important that the outer ply is at least 8mm to maximise shear capabilities. Where the outer ply is below 8mm thickness, spacer washers should be used beneath the collar to increase to 8mm.

\*\*\* For further RHS Section details not listed, please contact our technical department.



---

## NORMATIVA DI RIFERIMENTO

---

1. **CNR 10011 (1997)**: "Costruzioni di acciaio: istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione", CNR Bollettino Ufficiale n.182 – Norme tecniche.
2. **CNR 10016 (1999)**: "Strutture composte di acciaio e calcestruzzo: istruzioni per l'impiego nelle costruzioni", CNR Bollettino Ufficiale n.192 – Norme tecniche.
3. **DIN 18800 (1984)**: "Stahlbauten Verbundtragwerke aus Stahl und Beton", Bemessung und Konstruktion.
4. **UNI ENV 1992, Eurocodice 2 (1993)**: Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici. Versione in lingua italiana della norma sperimentale europea ENV 1992-1-1 (edizione dicembre 1991).
5. **UNI ENV 1993, Eurocodice 3 (1994)**: Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici. Versione in lingua italiana della norma sperimentale europea ENV 1993-1-1 (edizione aprile 1992).
6. **UNI ENV 1994, Eurocodice 4 (1995)**: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici. Versione in lingua italiana della norma sperimentale europea ENV 1994-1-1 (edizione ottobre 1992).



---

## BIBLIOGRAFIA

---

**Strutture miste acciaio-calcestruzzo legno-calcestruzzo.** Aspetti generali e tecniche recenti", a cura di Nunzio Scibilia, Dario Flaccovio Editore;

**Le colonne e i telai composti:** tecnologia e metodi di analisi, MARISA PECCE Facoltà di Ingegneria - Università del Sannio- Benevento; GIOVANNI FABBROCINO, EDOARDO COSENZA Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale - Università di Napoli Federico II

**Prontuario REP®.** Introduzione alla prescrizione e utilizzo del sistema originale. Redatto dalla ditta Tecnostrutture S.r.l. di Noventa di Piave (VE).

**JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE.** Articoli vari.

**Connessioni tipo tra elementi in acciaio e membrature in c.a.** Redatto dalla ditta Italsider, gruppo Finsider di Genova (GE).

**Strutture.** Daniel L. Schodek, traduzioni a cura di Dario Coronelli e Luca Martinelli, Pàtron editore.

**Soluzioni innovative per l'impiego delle strutture composte acciaio-clt nell'edilizia antisismica.** Estratto dagli atti del 15° Congresso C.T.E. Bari, 4-5-6 novembre 2004, a cura di Calogero Dentamaro, Vincenzo Dipaola, Francesca Prete e Giuseppe Prete del Politecnico di Bari.