

IDEA Connections

Nodi e connessioni in acciaio

Background Teorico

Contenuti

1 Introduzione	3
2 Modello di analisi – CBFEM	5
2.1 Elementi 1-dimensionali e piastre	6
2.2 Saldature	7
2.3 Ancoraggi e blocco in calcestruzzo	8
2.4 Bulloni e piastre	10
3 Analisi	12
3.1 Modello di analisi	12
3.2 Elemento portante e supporti	14
3.3 Carichi	16
3.4 Analisi dello sforzo	17
3.6 Verifiche di stabilità	18
4 Verifica degli elementi	20
4.1 Piastre	20
4.2 Saldature	20
4.2.1 Saldature a cordone d'angolo	20
4.3 Bulloni	22
4.4 Ancoraggi	23
4.5 Blocco di calcestruzzo	25
4.6 Taglio nel blocco di cemento	26

1 Introduzione

L'elemento trave è preferito dagli ingegneri nell'ambito della progettazione di strutture in acciaio. Ci sono però molti punti della struttura in cui la teoria della trave non è valida, ad esempio nei giunti saldati, nelle connessioni bullonate, in presenza di fori nelle pareti, di rastremazioni dell'altezza delle sezioni o di carichi puntuali. L'analisi strutturale in questi punti è difficile e richiede particolare attenzione. Il comportamento infatti è non-lineare e queste non-linearità vanno rispettate, come la plasticizzazione dei materiali che costituiscono le piastre, i punti di contatto tra piastre di estremità o piastre di base e un blocco di cemento, l'irreversibilità delle azioni dei bulloni e degli ancoraggi, le saldature. La normativa nazionale ceca, CSN EN1993-1-8, così come la letteratura tecnica, offrono metodi ingegneristici per la soluzione di questi problemi. La loro caratteristica generale è il fatto che siano ricavati da forme strutturali tipiche e casi di carico elementari. Molto utilizzato è il metodo delle componenti.

Metodo delle componenti

Il metodo delle componenti risolve i giunti, come un sistema di elementi interconnessi tra loro – le componenti, appunto. Il modello corrispondente è composto per ogni tipo di giunto, in modo da essere in grado di determinare forze e tensioni in ogni componente – vedi figura seguente.

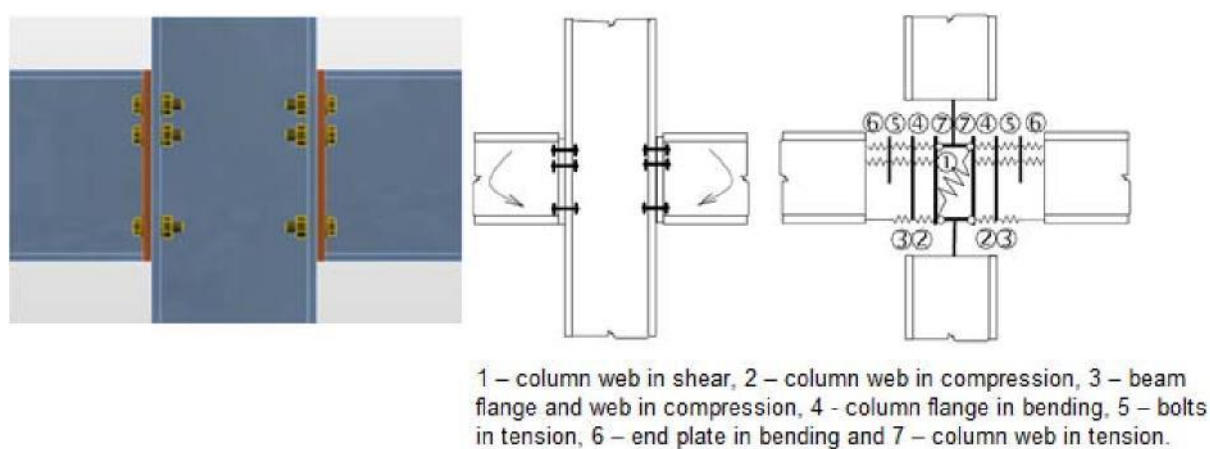


Figura 1. Elementi nel nodo con piastre di estremità bullonate, rappresentate con delle molle.

Ogni componente viene controllata separatamente usando i metodi corrispondenti. Poiché ogni tipo di giunto necessita di un proprio modello specifico, l'utilizzo di questo metodo ha dei limiti nei casi in cui si debbano risolvere giunti di geometrie generiche e carichi qualunque.

IDEA RS, assieme al team di lavoro del Dipartimento di Strutture in Acciaio e Legno della Facoltà di Ingegneria Civile di Praga e dell'Istituto di Strutture in Acciaio e Legno della Facoltà di Ingegneria Civile della Brno University of Technology, ha sviluppato un nuovo metodo per la progettazione avanzata dei giunti nelle strutture in acciaio.

Il nome di questo metodo è CBFEM - Component Based Finite Element Model – ed è:

- **Generale** abbastanza da poter essere utilizzato per la maggior parte dei giunti, degli appoggi e dei dettagli nella pratica ingegneristica.
- **Semplice e veloce** a sufficienza nella pratica quotidiana in modo da fornire risultati in tempi comparabili a quelli dei metodi e degli strumenti attualmente in uso.
- **Esauriente** abbastanza da fornire informazioni chiare di ingegneria strutturale riguardo il comportamento del giunto, tensioni, deformazioni e riserve di deformazione dei singoli componenti e infine riguardo la sicurezza e la realizzabilità del sistema complessivo.

Il metodo CBFEM è basato sull'idea che la maggior parte degli aspetti verificati e molto utili del metodo delle componenti debbano essere conservate. Il punto debole del metodo delle componenti, ossia la sua generalizzazione nell'analizzare le tensioni delle singole componenti, è stato sostituito dalla modellazione e analisi tramite metodo degli elementi finiti.

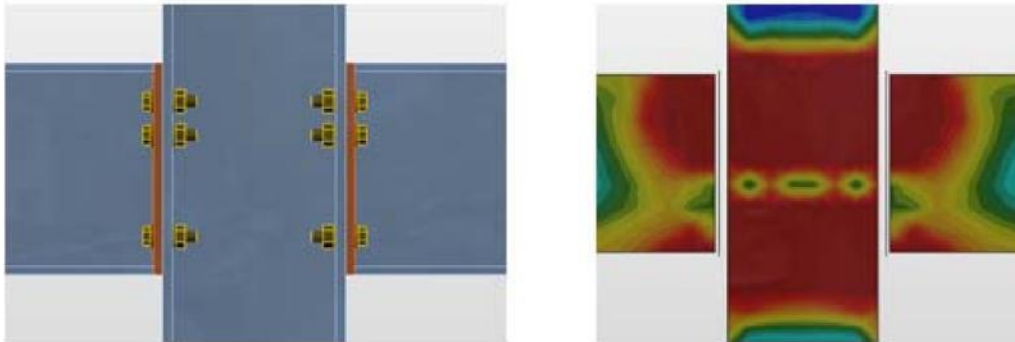


Figura 2. Modello FEM nel nodo con piastre di estremità bullonate.

2 Modello di analisi – CBFEM

FEM (Finite Element Method) è un metodo generale comunemente utilizzato per le analisi strutturali. L'utilizzo del FEM per la modellazione di giunti di qualsivoglia forma sembra offrire un'opzione molto valida (Virdi, 1999). E' richiesta un'analisi elasto-plastica. L'acciaio infatti è soggetto a frequente plasticizzazione all'interno della struttura. Per questo motivo, i risultati di un'analisi lineare sono inutili per il progetto delle connessioni.

I modelli FEM sono utilizzati per motivi di ricerca sul comportamento dei giunti, applicando spesso elementi definiti nello spazio e valori misurati specifici delle proprietà dei materiali.

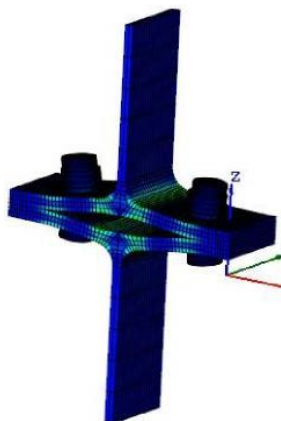


Figura 3. Modello FEM nel nodo realizzato per motivi di ricerca. Usa elementi spaziali 3D sia per le piastre che per i bulloni.

Sia le anime che le ali degli elementi connessi sono modellati nel CBFEM utilizzando piastre sottili, per le quali è disponibile la nota e validata soluzione.

I connettori – bulloni e saldature – sono l'aspetto più difficile del modello di analisi. La modellazione di questo tipo di elementi nei generici programmi ad elementi finiti è complicato, perché questi non offrono le proprietà richieste. Questi speciali componenti FEM devono essere sviluppati per modellare il corretto comportamento saldature e bulloni nel giunto.

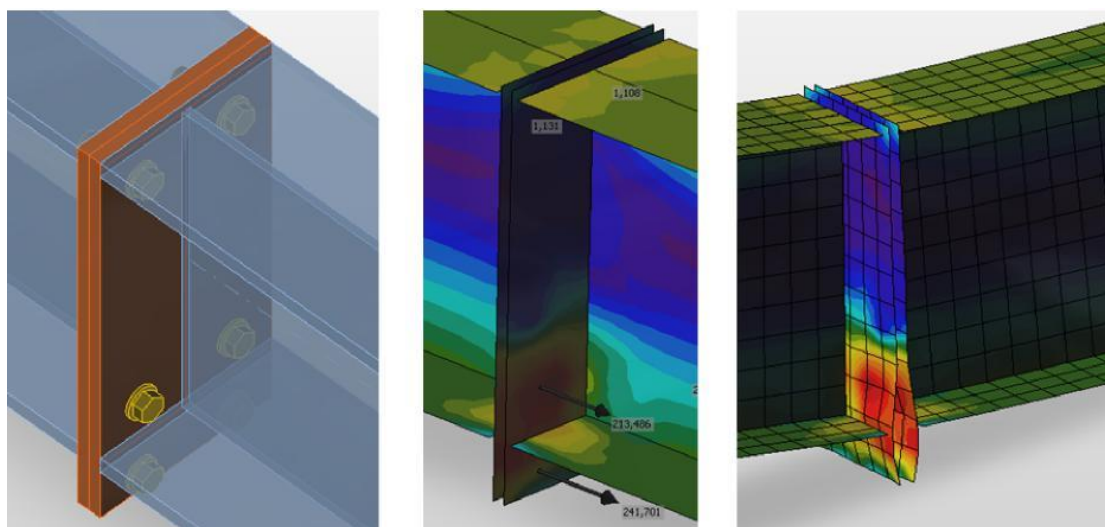


Figura 4. Modello CBFEM della connessione bullonata a piastre di estremità.

I giunti composti da diversi elementi sono modellati come punti privi di massa durante l'analisi di telai in acciaio o strutture reticolari. Le equazioni di equilibrio sono verificate nel nodo e, dopo aver risolto l'intera struttura, vengono determinate le forze interne alle estremità delle travi. Infatti, il nodo è caricato con queste forze. La risultante di tutte le forze proveniente da tutti gli elementi convergenti nel nodo è nulla – il giunto è in equilibrio.

La reale configurazione del nodo non è nota nel modello strutturale. L'ingegnere definisce solo se esso sia da considerare come incastro o cerniera.

E' necessario perciò creare un modello realistico del giunto, che rispetti la situazione reale, in modo da progettare il nodo in maniera adeguata. Nel metodo CBFEM sono usati tronchi finali degli elementi di lunghezza pari a 2-3 volte l'ampiezza massima della sezione. Questi segmenti sono modellati usando elementi plate.

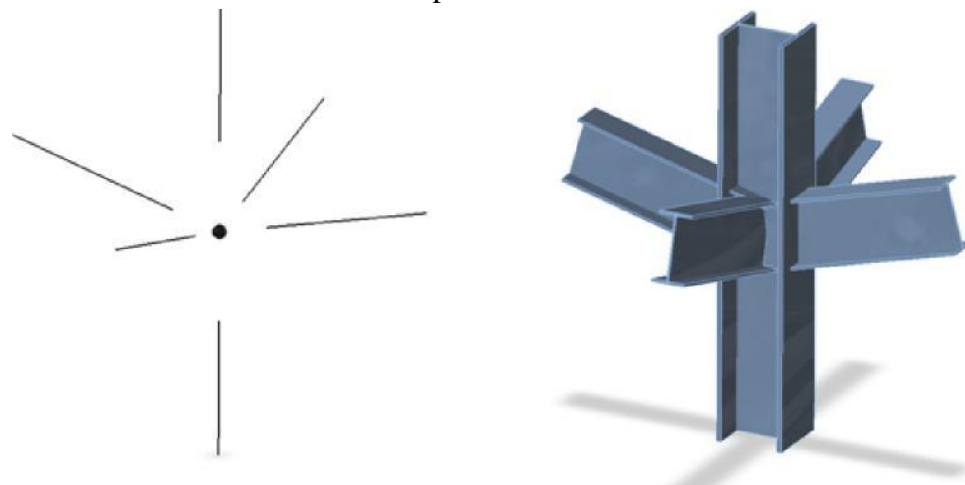


Figura 5. Giunto teorico (senza massa) e forma reale di un giunto senza modifiche alle estremità degli elementi.

Per una migliore precisione del modello CBFEM, le forze di estremità negli elementi unidimensionali sono applicate come carichi puntuali agenti alle estremità del segmento. Le sei componenti di forza (N , T_x , T_y , M_x , M_y , M_z) agenti nel nodo teorico, sono trasferite all'estremità del segmento – il valore delle forze viene mantenuto identico, ma quello dei momenti è modificato e si somma con quello dato dalle forze stesse per il proprio braccio.

Le estremità dei segmenti che convergono nel nodo non sono connesse tra loro. La connessione va infatti modellata. Nel metodo CBFEM vengono utilizzate le cosiddette Operazioni di produzione per modellare la connessione. Queste operazioni sono: tagli, offsets, aperture, rinforzi, nervature, flange e giunzioni, angolari, fazzoletti e altro. Sono aggiunti anche elementi connettori – saldature e bulloni.

2.1 Elementi 1-dimensionali e piastre

Tutte le parti degli elementi monodimensionali e tutte le piastre aggiuntive sono modellati come piastre. Questi elementi sono fatti di acciaio (in generale metallo) e il comportamento del materiale è significativamente non lineare. La non linearità (plasticità) deve essere rispettata nel calcolo.

Per motivi progettuali nella pratica costruttiva, il diagramma reale tensione-deformazione dell'acciaio è sostituito con quello di materiale elasto-plastico ideale – vedi figura. Il vantaggio dell'utilizzo di questo tipo di schema è che per descrivere la curva del materiale, sono sufficienti la tensione di snervamento e il modulo elastico.

La duttilità offerta dall'acciaio da costruzione è il 15%. Il valore reale del limite deformazione plastica utilizzabile per i progetti ordinari è il 5%.

La tensione nell'acciaio non può superare quella di snervamento se si utilizza un modello elasto-plastico ideale. E' perciò inutile portare a termine il controllo della tensione. La deformazione plastica relativa è sufficiente come valore di confronto.

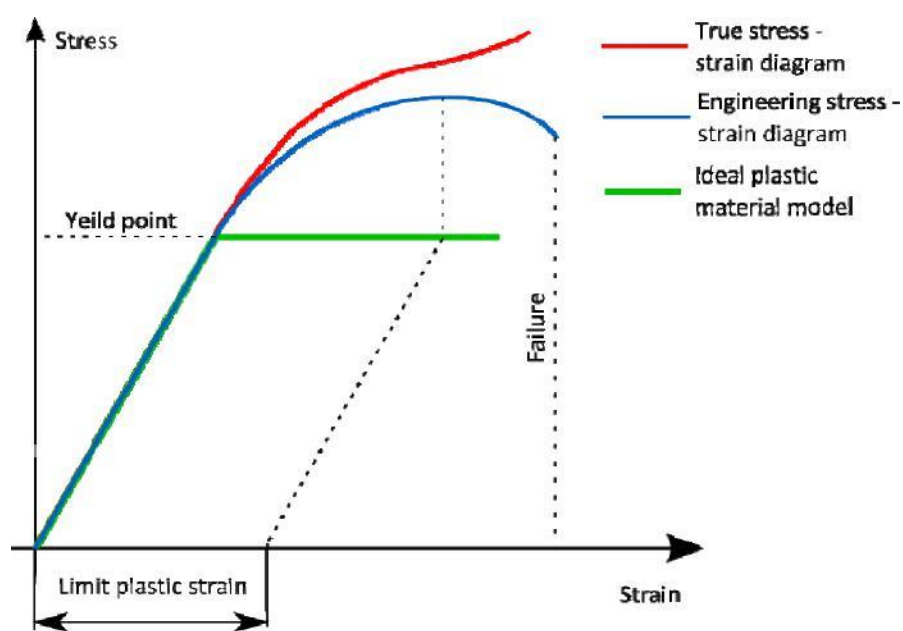


Figura 6. Curva di tensione reale e diagramma relativo a materiale elasto-plastico ideale.

2.2 Saldature

Le piastre di acciaio sono modellate come elementi individuali. La loro interconnessione è garantita da saldature e bulloni.

Il metodo CBFEM cerca di modellare precisamente la situazione reale. I plate utilizzati per l'analisi non sono interconnessi, non vengono generate intersezioni tra loro, nonostante questo sia uso comune nella modellazione di strutture e edifici. La mesh agli elementi finiti viene generata su ogni singola piastra indipendentemente dalle mesh delle piastre vicine.

Le saldature sono modellate come speciali vincoli di interpolazione di forze prive di massa, il che assicura la connessione tra lo spigolo di una piastra e la superficie o lo spigolo di un'altra.

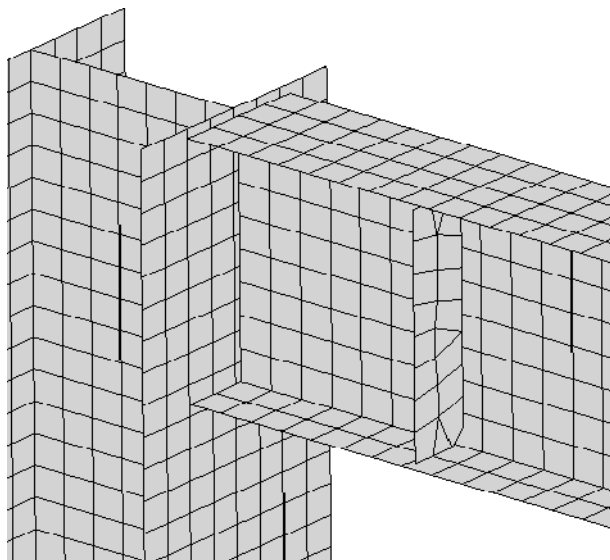


Figura 7. La mesh di elementi finiti di una piastra non è influenzata dalle altre.

2.3 Ancoraggi e blocco in calcestruzzo

Nei CBFEM, i bulloni di ancoraggio (e i bulloni in generale) sono modellati come semplici molle con diagramma tensione- deformazione differente per trazione e taglio. Il bullone agisce solo in trazione per sforzo assiale, la compressione non può avere effetti sul bullone. La molla agisce simmetricamente su entrambi i lati per quanto riguarda lo sforzo di taglio.

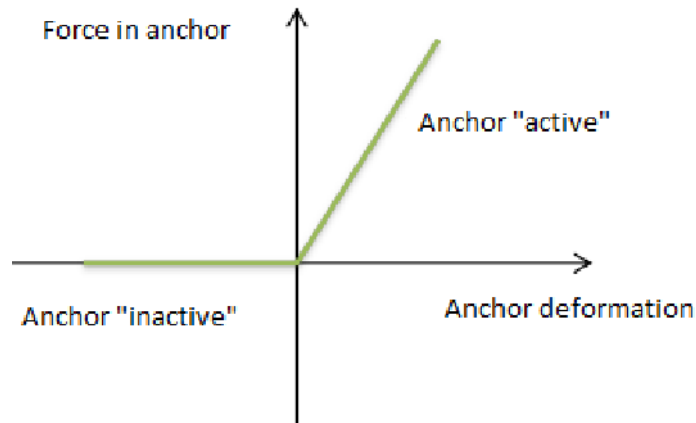


Figura 8. Diagramma tensione-deformazione dell'ancoraggio sotto sforzo assiale.

I punti finali delle molle/bulloni non sono direttamente collegate alla mesh agli elementi finite che compone la piastra, ma sono utilizzate anche in questo caso i vincoli di interpolazione tra le forze. Per migliorare la precisione, vengono meshati anche i fori dei bulloni. Questo garantisce un comportamento molto più realistico a taglio e anche nella resistenza della piastra a flessione o a trazione/compressione.

Questo metodo unico di calcolo dei bulloni produce risultati molto buoni – sia dal punto di vista della precisione, che della velocità di analisi. Il metodo è protetto da brevetto.

Il blocco in calcestruzzo influenza significativamente il comportamento della piastra di base e degli ancoraggi. Nel CBFEM esso è modellato usando il modello di terreno Winkler-

Pasternak. Questo metodo è comunemente usato per il calcolo delle fondazioni delle strutture e può essere adoperato anche per l'analisi degli ancoraggi. La rigidezza del sottosuolo è determinato usando il modulo di elasticità del calcestruzzo e l'altezza effettiva del blocco.

Il blocco di calcestruzzo non è progettato usando il metodo CBFEM. Viene determinato solo lo spessore minimo del blocco sotto la piastra di base per evitare la rottura a cono del calcestruzzo.

La piastra di base in acciaio è localizzata genericamente sulla fondazione in calcestruzzo. E' un elemento di contatto nel modello di analisi – la connessione resiste completamente a compressione, ma non resiste a trazione.

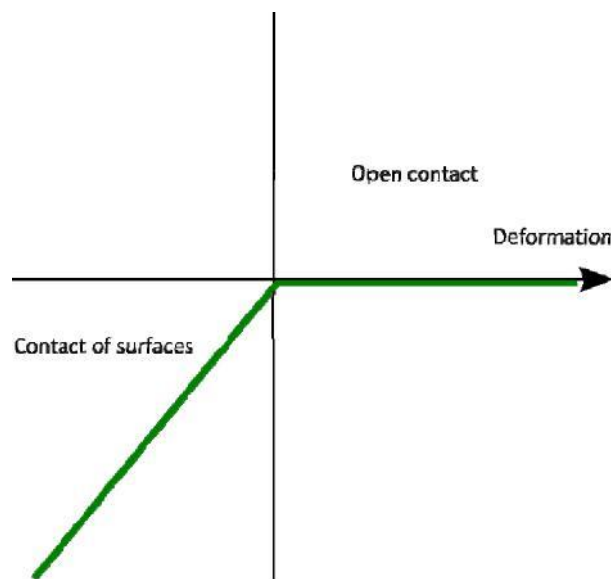


Figura 9. Diagramma tensione-deformazione relative alla superficie di contatto tra blocco di calcestruzzo e piastra di base.

Le forze di trazione tra la piastra di base e il blocco di calcestruzzo sono sopportate dagli ancoraggi.

Le forze di trazione possono essere assorbite usando i seguenti metodi:

- Attrito tra la piastra di base e il blocco di calcestruzzo;
- Ferri a taglio;
- Flessione degli ancoraggi (e attrito).

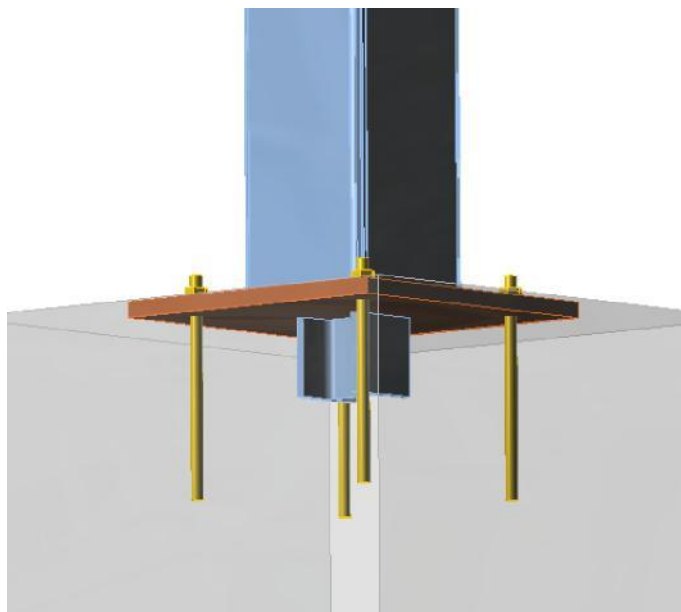


Figura 10. Esempio di nodo di fondazione con ferro a taglio.

2.4 Bulloni e piastre

La connessione bullonata consiste in due o più piastre serrate e uno o più bulloni. Le piastre sono poste genericamente una sopra l'altra.

Un elemento di contatto viene inserito tra le piastre nel modello di analisi, e agisce solo in compressione. Nessuna forza è sopportata a trazione.

Il modello di analisi dei bulloni è lo stesso descritto per gli ancoraggi. Il contatto tra la testa del bullone e la piastra è modellata usando i vincoli di interpolazione. I fori per i bulloni vengono modellati nelle piastre.

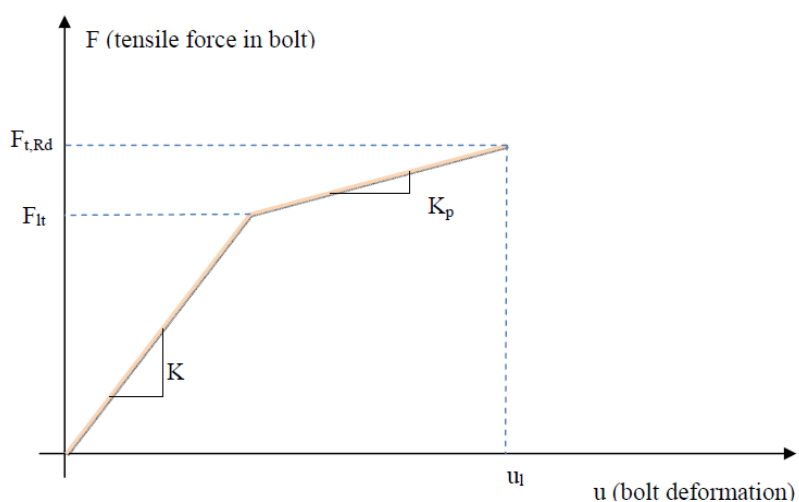


Figura 11. Diagramma di tensione dei bulloni.

Legenda dei simboli:

- K – rigidezza lineare del bullone
- K_p – rigidezza del bullone nel ramo plastico
- F_{lt} – forza limite per il comportamento lineare del bullone
- $F_{t,Rd}$ – resistenza limite del bullone
- u_l – deformazione limite del bullone

3 Analisi

3.1 Modello di analisi

Il nuovo metodo delle componenti ((CBFEM – Component Based Finite Element Model) permette un'analisi veloce dei giunti di diverse forme e configurazioni.

Il modello FEM è generato automaticamente. Il progettista non crea il modello, ma solo il giunto, usando le Operazioni di produzione – vedi figura.

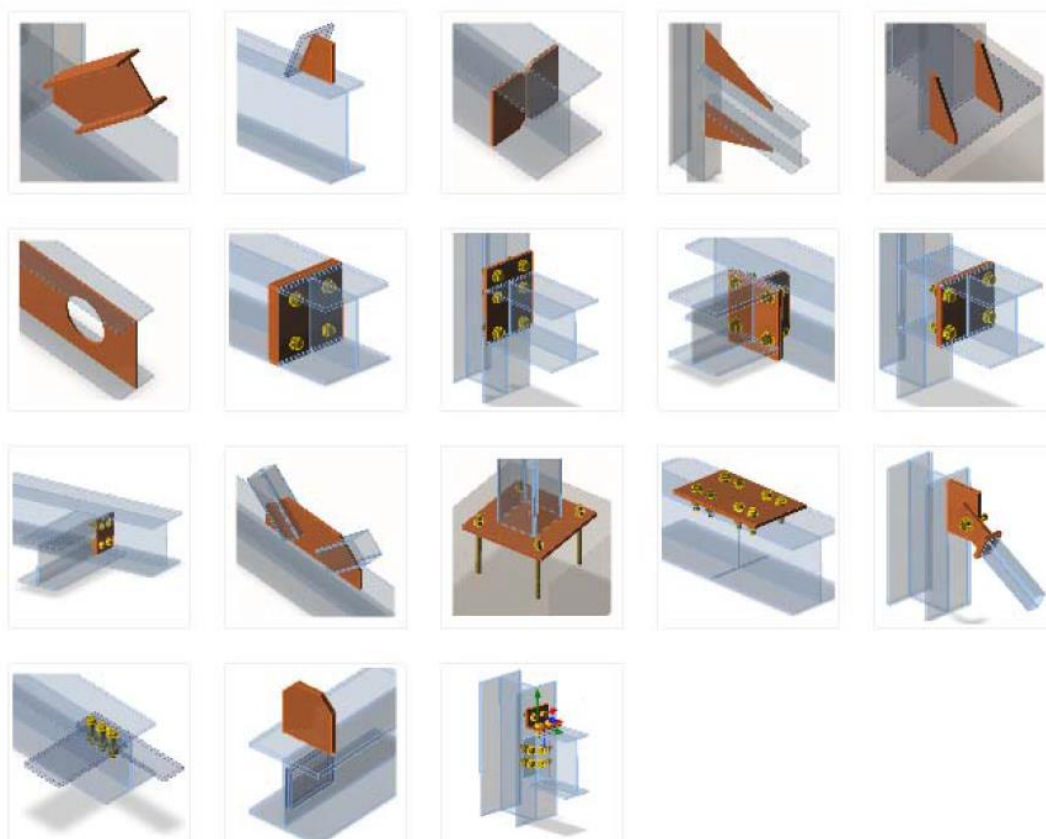


Figura 12. Operazioni di produzione/voci che possono essere usate per la creazione del giunto.

Lista delle Operazioni di produzioni possibili in IDEA connection:

- Taglio di un'estremità di un elemento da parte di altri elementi o piastre.
- Taglio di una piastra da parte di un'altra piastra o elemento.
- Rinforzo della sezione a taglio di un elemento – unilaterale o bilaterale, perpendicolare o inclinato.
- Irrigidimento – permette di estendere le ali o l'anima della sezione. Forma rettangolare o triangolare, con o senza ali.
- Nervatura – tra due elementi o tra elemento e piastra.
- Apertura – nell'anima o nell'ala.
- Piastra con piastra – elemento di giunzione bullonato o saldato tra due membri, dritto o inclinato.

- Flangia – collegamento di una trave con l'ala o l'anima di una colonna, collegamento di una trave all'anima di un'altra trave. Piastra di estremità (che include accavallamenti) o piastra di estremità corta.
- Giunto con flangia sfalsata – collegamento di una trave a un'altra trave tramite piastra connessa a un'altra, saldata a sua volta alle ali della seconda trave.
- Moncone – collegamento traslato dell'elemento, il moncone può avere la stessa sezione della trave o essere rastremato.
- Piatto rinforzato – Connessione a taglio trave-trave.
- Fazzoletto/travi reticolari – connessione bullonata o saldata di un elemento al fazzoletto, connessione a qualsiasi piastra esistente, connessione all'ala di un elemento.
- Piastra di base – piastra di base perpendicolare alla colonna o inclinata, bulloni di ancoraggio, ferro a taglio, blocco di calcestruzzo.
- Giunzione – Giunzione bullonata o saldata all'ala o all'anima dell'elemento.
- Piastra di connessione – connessione a truss di sezioni cave (tubolari circolari o rettangolari)
- Griglia fissaggi – connessione bullonata tra piastre (max 5).
- Piastra – relativa all'origine del giunto o all'anima o all'ala di un elemento come nervatura, irrigidimento o rinforzo locale; oppure relativa a una piastra qualunque come nervatura o rinforzo locale.
- Coprigiunto – connessione dell'ala o dell'anima di una trave per mezzo di un profilo angolare.

Ogni operazione di produzione aggiunge nuove opzioni nella connessione – tagli, piastre, connessioni, bulloni, saldature.

3.2 Elemento portante e supporti

Un elemento del nodo è sempre impostato come “portante”. Tutti gli altri membri sono “connessi”. L’elemento portante può essere scelto dal progettista. Esso può essere “continuo” o “finito” nel nodo. Gli elementi “finiti” terminano sempre nel nodo.

Gli elementi “connessi” possono essere di diversi tipi, in accordo col carico che l’elemento può sopportare:

- Tipo N-Vy-Vz-Mx-My-Mz – l’elemento è in grado di trasferire tutte le sei componenti di forza interna.
- Tipo N-Vy-Mz – l’elemento è in grado di trasferire solo i carichi che agiscono nel piano XY – forze interne N, Vy, Mz.
- Tipo N-Vz-My – l’elemento è in grado di trasferire solo i carichi che agiscono nel piano XZ – forze interne N, Vz, My.
- Type X – l’elemento è in grado di trasferire solo i carichi lungo la direzione X – sforzo normale N.

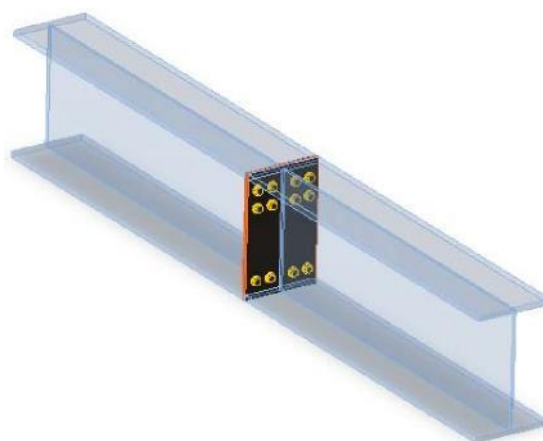


Figura 13. La connessione piastra-piastra trasferisce tutte le componenti di forza interna.

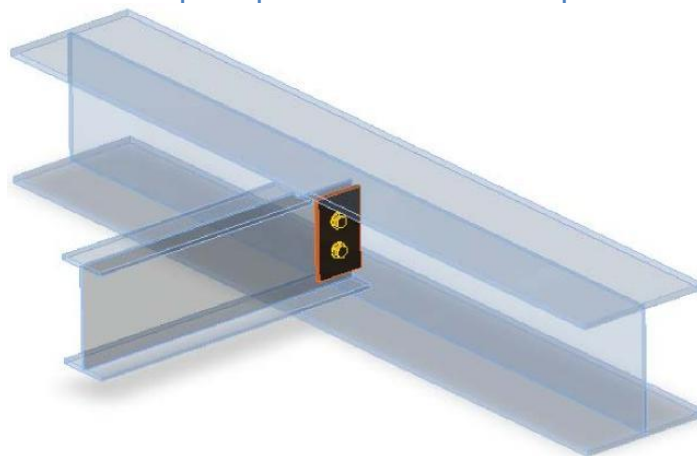


Figura 14. Piastra rinforzata. La connessione può trasferire solo i carichi nel piano xz - forze interne N, Vz, My.

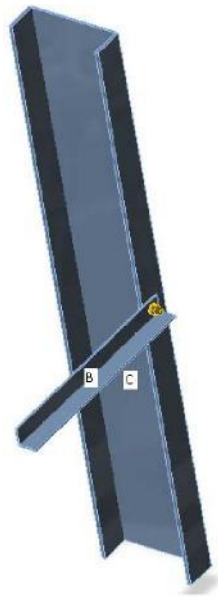


Figura 15. Fazzoletto/travi reticolari. La connessione può trasferire solola forza assiale N.

Ogni nodo è in stato di equilibrio durante l'analisi della struttura a telaio. Se le forze di estremità dei singoli elementi sono applicate al modello CBFEM dettagliato, lo stato di equilibrio si riscontra nuovamente. Perciò non sarebbe necessario definire i supporti nel modello di analisi. Tuttavia, per ragioni pratiche, un supporto resistente a tutte le traslazioni viene posto in corrispondenza della prima estremità dell'elemento portante. Questo non influenza lo stato di sforzo o il sistema di forze interne nel giunto, ma solo le deformazioni. Per prevenire l'apparire di meccanismi di instabilità, vengono scelti tipi di supporto appropriati, che rispettino le caratteristiche dei singoli elementi.

3.3 Carichi

Le forze di estremità degli elementi di un modello di analisi a telaio sono trasferite alla fine dei relativi segmenti. Le eccentricità degli elementi rispetto al nodo, causate dal progetto del nodo stesso, vengono rispettate in questo passaggio.

Il fatto che le forze così definite siano correlate al nodo teorico deve essere rispettato. Le forze reali nelle sezioni degli elementi vengono calcolate rispettando i principi della scienza delle costruzioni.

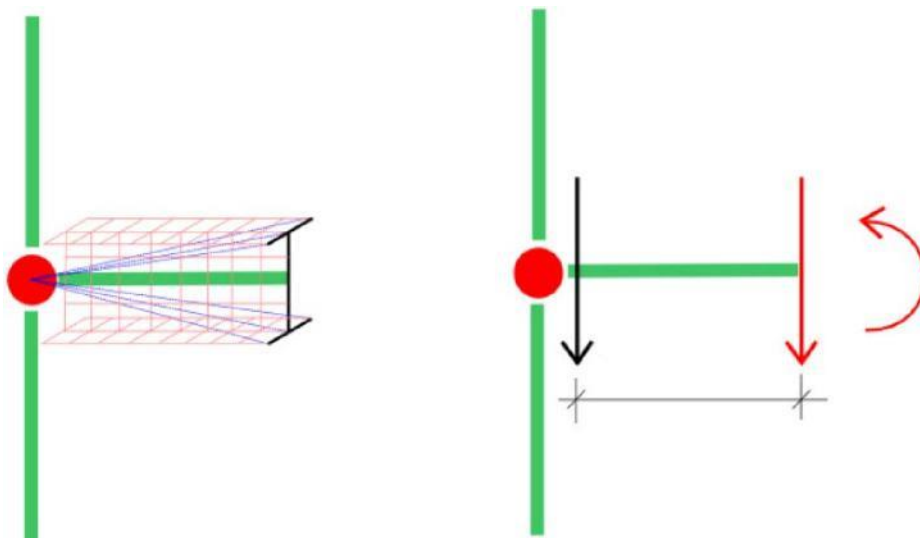


Figura 16. Trasferimento dello sforzo di taglio dal giunto all'estremità più lontana del segmento.

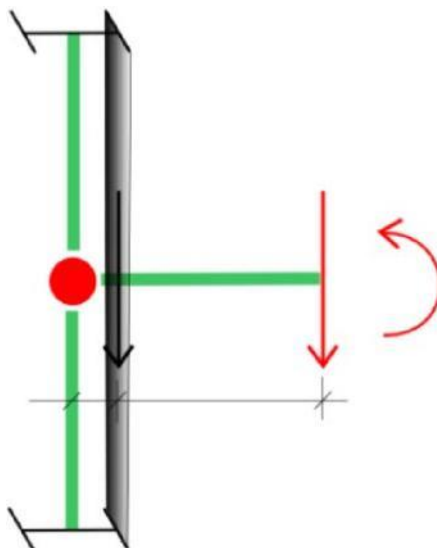


Figura 17. Trasferimento della forza dal nodo alla sezione nella quale viene progettata la piastra di estremità.

3.4 Analisi dello sforzo

L'analisi del nodo è non-lineare. Gli incrementi di carico sono applicati gradualmente e si calcola lo stato di tensione. In IDEA Connection ci sono due possibili metodi di analisi:

- **Risposta della struttura (nodo) al carico complessivo.** Con questo metodo viene applicato tutto il carico definito (100%) e conseguentemente sono calcolati lo stato di tensione e quello di deformazione.

Status of FE analysis

	Loads ▾	Applied [%] ▾	Status
>	LE1	100,0	✓

- **Termine dell'analisi al raggiungimento dello stato limite ultimo.** Gli stati di tensione e deformazione sono quelli corrispondenti all'ultimo step di carico per cui tutte le verifiche della struttura sono soddisfatte. Nel caso in cui il carico applicato sia più alto della capacità calcolata, l'analisi viene contrassegnata come non-soddisfacente e viene stampata la percentuale di carico utilizzata.

Status of FE analysis

	Loads ▾	Applied [%] ▾	Status
>	LE1	84,0	✗

Il secondo modo è più adatto per il progetto pratico. Il primo metodo è preferibile per le analisi dettagliate di nodi complessi.

3.6 Verifiche di stabilità

Nei codici nazionali (cechi) CSN EN 1993-1-5 and CSN EN 1993-1-6, I metodi di analisi agli elementi finiti sono suddivisi in 5 sottocategorie a seconda delle assunzioni rispettate da ognuna:

1. Linearità geometrica e di materiale
2. Non linearità per materiale, linearità geometrica
3. Linearità di materiale, perdita lineare di stabilità – fenomeni di buckling
4. Linearità di materiale, non linearità geometrica per imperfezioni
5. Non Linearità di materiale, non linearità geometrica per imperfezioni

Nel capitolo 8 del codice CSN EN 1993-1 viene menzionata una procedure, che combina le analisi di cui ai punti 2 e 3 – combinazione di non linearità di materiale e analisi di stabilità.

L'applicazione dei risultati ottenuti col modello FEM viene descritta nell'appendice B e C del code CSN EN 1993-1-5. Questa procedura è utilizzata per un'ampia varietà di strutture, eccezion fatta per le piastre sottili, dove un'analisi geometricamente non lineare per imperfezioni iniziali è più indicata (4 e 5). Quest'ultima è in corso di implementazione nel software sviluppato.

Il metodo usa coefficienti di carico α , ottenuti come risultato dell'analisi FEM.

Si determina il coefficiente di carico α_{ult} , ossia quello corrispondente al carico che comporta il raggiungimento della capacità plastica senza considerare la non linearità geometrica. In ogni caso, bisogna ricordare che il punto in cui si determina questo coefficiente non è il punto più critico per il nodo. E' però importante perché collegato alla perdita di stabilità del nodo stesso. Di solito corrisponde al punto con la massima ampiezza della STABILITY EIGENSHAPE. La procedura conservativa semplificata è citata nel EN 1993-1-6. Il controllo della capacità plastica è già stato implementato nel software. La determinazione automatica più generale di α_{ult} è invece in corso di implementazione.

Successivamente viene determinato il coefficiente di carico α_{cr} – il coefficiente critico di perdita di stabilità, che è ottenuto usando un'analisi FEM di perdita di stabilità lineare. E' determinato automaticamente nel software usando lo stesso modello FEM utilizzato per α_{ult} . Viene quindi determinata la snellezza adimensionale per la forma di perdita di stabilità considerata:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult}}{\alpha_{cr}}}$$

Viene perciò calcolato un coefficiente riduttivo ρ , utilizzando la snellezza adimensionale appena citato. Il coefficiente riduttivo è funzione della snellezza adimensionale e la sua determinazione è citata nell'Appendice B del CSN EN 1993-1-5. Il grafico tipico che rappresenta la dipendenza del coefficiente riduttivo dalla snellezza adimensionale è riportato nella figura seguente. E' simile a quello usato per la verifica della perdita di stabilità lineare delle travi. Dalla figura risulta chiaro che per valori di snellezza minori o uguali a λ_{p0} la perdita di stabilità è trascurabile.

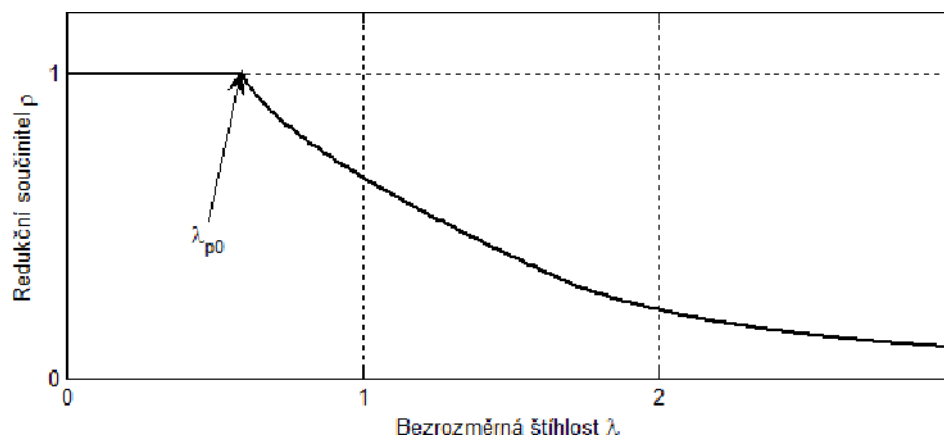


Figura 18. Tipica dipendenza del coefficiente riduttivo con la snellezza adimensionale.

Infine viene controllata la perdita di stabilità per il tipo di instabilità considerato, in accordo con le seguenti condizioni (vedi CSN EN 1993-1-6). Bisogna sottolineare che nelle strutture più complesse il tipo di instabilità con il minimo α_{cr} potrebbe non essere il più critico in accordo con le condizioni seguenti. Altri tipi di instabilità devono essere verificati sulle strutture più complesse, perché può dipendere da parti diverse della struttura, con diversi α_{ult} .

$$\frac{\alpha_{ult} \cdot \rho}{\gamma_{M1}} \geq 1$$

Nonostante il processo sembri banale, esso è generale e abbastanza robusto e l'algoritmo può essere sviluppato facilmente. La forza di questo processo è basata sull'analisi FEM avanzata del nodo. Inoltre è inclusa in codici nazionali validi. Essendo parte di un software avanzato, dà un'idea veloce del reale comportamento della struttura e delle sue parti critiche. Perciò una veloce applicazione dei passi per prevenire l'instabilità del giunto è possibile.

4 Verifica degli elementi

Il metodo CBFEM combina i vantaggi del metodo generale agli elementi finiti e il metodo standard delle componenti. Le tensioni e le forze interne calcolate col modello CBFEM vengono quindi usate nelle verifiche di ogni componente.

Le singole componenti vengono verificate in accordo con l'Eurocodice EN 1993-1-8.

4.1 Piastre

La tensione equivalente e la deformazione plastica vengono calcolate sulle piastre. La verifica delle tensioni non può essere effettuata, poiché il massimo valore di tensione che può essere raggiunto è quello di snervamento. Perciò la verifica effettuata a livello di deformazione plastica equivalente. Nell'Eurocodice si suggerisce valore limite del 5%, tra le impostazioni di progetto questo valore può però essere modificato.

Check of members and steel plates						
	Item	Th [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{PI} [%]	Status
>	COL-bfl	21,5	LE1	222,6	0,1	✓
	COL-tfl	21,5	LE1	155,0	0,0	✓
	COL-web	12,0	LE1	106,1	0,0	✓
	BP1	30,0	LE1	159,6	0,0	✓

Design data			
	Material	Fy [MPa]	ϵ_{lim} [%]
>	S 235	235,0	5,0

Il metodo CBFEM può produrre tensioni abbastanza maggiori rispetto al valore di snervamento. La ragione di ciò è la leggera inclinazione del ramo plastico del diagramma sforzo-deformazione che è utilizzato nell'analisi per migliorare la stabilità nel calcolo delle interazioni. Questo non è un problema per il progetto pratico del nodo. Infatti per tensioni più alte la deformazione plastica equivalente viene superata e il nodo non è in ogni caso verificato.

4.2 Saldature

4.2.1 Saldature a cordone d'angolo

Resistenza di progetto

La tensione nella sezione di gola della saldatura è determinata in accordo con l'art. 4.5.3.

$$\sigma_{w,Ed} = [\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0.5}$$

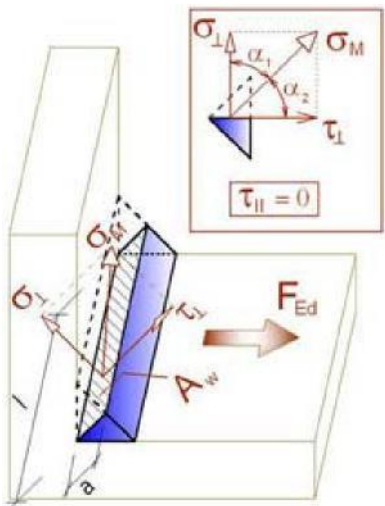
$$\sigma_{w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$0.9\sigma_{w,Rd} = f_u/\gamma_{M2}$$

Utilizzazione delle saldature

$$U_t = \min(\sigma_{w,Ed}/\sigma_{w,Rd} ; \sigma_{\perp}/0.9\sigma_{w,Rd})$$

β_w - fattore di correlazione tab 4.1



Valutazione delle tensioni nella saldatura:

1. Tensione massima
2. Tensione media
3. Interpolazione lineare delle forze nelle saldature

Vedi interpolation.docx

Tutti i valori richiesti per la verifica sono stampati nelle tabelle. La verifica può essere svolta per il valore massimo o per quello mediato lungo l'intera lunghezza della saldatura.

Check of welds									
	Item	Edge	Size [mm]	Type	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	σ_{\perp} [MPa]	Ut [%]	Status
>	BP1	COL-bfl	21,5	Fillet	LE1	168,1	-92,8	46,7	✓
	BP1	COL-tfl	21,5	Fillet	LE1	37,8	16,4	10,5	✓
	BP1	COL-web	12,0	Fillet	LE1	54,7	-28,3	15,2	✓

Design data				
	Material	β_w	$\sigma_{w,Rd}$ [MPa]	$0.9 \sigma_{w,Rd}$ [MPa]
>	S 235	0,8	360,0	259,2

4.3 Bulloni

Resistenza di progetto del bullone:

$$F_{tRd} = 0.9 f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$$

Resistenza a taglio di progetto **at punching of bolt head or nut EN 1993-1-8:**

$$B_{pRd} = 0.6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$$

Resistenza a taglio di progetto per un piano di taglio:

$$F_{vRd} = \alpha_v f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$$

Resistenza a flessione di progetto della piastra EN 1993-1-8:

$$F_{pRd} = k_1 a_b f_u d t / \gamma_{M2}$$

Utilizzazione in tensione [%]:

$$U_{tt} = F_{tEd} / \min(F_{tRd}; B_{pRd})$$

Utilizzazione in taglio [%]:

$$U_{tt} = V / \min(F_{vRd}; F_{bRd})$$

Interazione taglio-trazione [%]:

$$U_{tts} = V / F_{vRd} + F_{tEd} / 1.4 F_{tRd}$$

A_s	-	area resistente del bullone
f_{ub}	-	resistenza ultima di trazione del bullone
d_m	-	diametro della testa del bullone
d	-	diametro del bullone
t_p	-	spessore della piastra sotto alla testa/dado del bullone
f_u	-	resistenza ultima dell'acciaio
α_v	-	0,6 per classi (4.6, 5.6, 8.8)
	-	0,5 per classi (4.8, 5.8, 6.8, 10.9)
k_1	-	2.5
a_b	-	1.0
F_{tEd}	-	forza di trazione di progetto agente sul bullone
V	-	risultante delle forze di taglio nel bullone

Check of bolts and anchors

	Item	Material	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	V [kN]	Utt [%]	Uts [%]	Utts [%]	Status
>	B1	M16 - 8.8 - 1	LE1	4,285	12,585	4,7	20,9	24,3	✓
	B2	M16 - 8.8 - 1	LE1	4,277	12,581	4,7	20,9	24,2	✓
	B3	M16 - 8.8 - 1	LE1	2,037	12,425	2,3	20,6	22,2	✓
	B4	M16 - 8.8 - 1	LE1	2,212	12,411	2,4	20,6	22,3	✓
	B5	M12 - 6.8 - 2	LE1	0,963	4,757	2,7	23,6	25,5	✓
	B6	M12 - 6.8 - 2	LE1	0,972	4,758	2,7	23,6	25,5	✓
	B7	M12 - 6.8 - 2	LE1	0,224	4,745	0,6	23,5	24,0	✓
	B8	M12 - 6.8 - 2	LE1	0,253	4,740	0,7	23,5	24,0	✓

Design data

	Item	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]
>	M16 - 8.8 - 1	90,432	130,288	60,288	115,200
	M12 - 6.8 - 2	36,288	103,145	20,160	86,400

4.4 Ancoraggi

Resistenza a rottura del cono di calcestruzzo con un ancoraggio o un gruppo di ancoraggi:

$$N_{Rkc} = N_0 A_{cN} / A_{cN}^0 \psi_{sN} \psi_{reN}$$

Valore iniziale di resistenza caratteristica:

$$N_0 R_{kc} = 7.2 f_{ck}^{0.5} hef^{1.05}$$

A_{cN}^0 - area del cono di calcestruzzo di un ancoraggio singolo. Circonferenza del diametro di $1.5 * hef$

hef - lunghezza dell'ancoraggio nel calcestruzzo

f_{ck} - resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo

A_{cN} - area effettiva del cono di calcestruzzo dell'ancoraggio in corrispondenza della superficie di calcestruzzo rispettando l'influenza degli spigoli e degli ancoraggi aggiuntivi.

ψ_{sN} - 1

ψ_{ReN} - 1

Resistenza a taglio degli ancoraggi in caso di trasferimento delle forze di taglio. L'attrito non viene preso in considerazione. Valido nel caso in cui la rottura degli ancoraggi preceda quella del calcestruzzo ETAG-001 5.2.3.2:

$$V_{Rks} = 0.5 f_y A_s$$

Rottura per scalzamento del calcestruzzo ETAG-001 5.2.3.3:

$$V_{Rkcp} / \gamma_{Mc} \leq V$$

$$V_{Rkcp} = k * N_{Rkc}$$

V - forza di taglio

k - 1 per $hef < 60$
2 per $hef \geq 60$

Rottura del bordo di calcestruzzo ETAG-001 5.2.3.4:

$$V_{Rkc} / \gamma_{Mc} \leq V$$

$$V_{Rkc} = V_{Rkc}^0 A_{cV} / A_{cV}^0 \psi_{sV} \psi_{reV}$$

$$V_{Rkc}^0 = 1.7 d^\alpha lf^\beta f_{ck}^{0.5} c_1^{1.5}$$

$$\alpha = 0.1 (lf / c_1)^{0.5}$$

$$\beta = 0.1 (d / c_1)^{0.2}$$

lf - hef

c_1 - distanza dal lato

d - diametro dell'ancoraggio

ψ_{sv} - 1

ψ_{rev} - 1

A_{cv}^0 - area del cono di calcestruzzo di un singolo ancoraggio alla superficie laterale del calcestruzzo non influenzata dagli spigoli ($4.5 c_1^2$).

A_{cv} - area effettiva del cono di calcestruzzo dell'ancoraggio alla superficie laterale del calcestruzzo.

Check of bolts and anchors

	Item	Loads	Ft,Ed [kN]	Nrkc [kN]	Uff [%]	Status
>	B1		0,000	0,000	0,0	✓
	B2		0,000	0,000	0,0	✓
	B3	LE1	81,329	87,670	92,8	✓
	B4	LE1	20,507	87,670	23,4	✓

Design data

	Item	Ft,Rd [kN]	Bp,Rd [kN]	Fv,Rd [kN]	Fb,Rd [kN]
>	M22 - 10.9 - 1	185,436	553,725	121,200	475,200

4.5 Blocco di calcestruzzo

Resistenza del calcestruzzo ed un carico di compressione concentrato:

$$F_{jd} = \beta_j k_j f_{ck} / \gamma_C$$

Tensione media alla base della piastra:

$$\sigma = N / A_{eff}$$

Utilizzazione in termini di compressione [%]:

$$U_t = \sigma / F_{jd}$$

f_{ck} - resistenza a compressione caratteristica del calcestruzzo

β_j - 0.6

k_j - fattore di concentrazione

γ_C - coefficiente di sicurezza

A_{eff} - area effettiva su cui è distribuita la forza N proveniente dal pilastro

Check of contact stress in concrete

	Item ▼	Loads ▼	Aeff [m2] ▼	σ [MPa] ▼	Fjd [MPa] ▼	Ut [%] ▼	Status
>	C25/30	LE1	0,098	9,338	20,000	46,7	✓

L'area effettiva è calcolata in accordo con il reale andamento della tensione di contatto. Il valore della tensione come percentuale della tensione limite viene definita nelle impostazioni di progetto. Solo l'area in cui la tensione è maggiore viene considerata area effettiva. La tensione totale risultante è mediata sull'intera area effettiva.

4.6 Taglio nel blocco di cemento

Le forze di taglio sono valutate in questa tabella rispettivamente nel caso di trasmissione del taglio per attrito o tramite ferro a taglio.

1. Il taglio viene trasmesso solo tramite attrito

$$V_{rdy} = N f_c$$

$$V_{rdz} = N f_c$$

2. Il taglio viene trasmesso tramite ferro a taglio e attrito

$$V_{rdy} = N f_c + A_{vy} f_y / (3^{0.5} \gamma_{M0})$$

$$V_{rdz} = N f_c + A_{vz} f_y / (3^{0.5} \gamma_{M0})$$

Utilizzazione in termini di taglio [%]

$$U_t = \min (V_y / V_{rdy} ; V_z / V_{rdz})$$

A_{vy} - Area di taglio A_y della sezione di acciaio

A_{vz} - Area di taglio A_z della sezione di acciaio

f_y - tensione di snervamento

γ_{M0} - coefficiente di sicurezza


V_y - componente della forza di taglio nel piano della piastra di base in direzione y

V_z - componente della forza di taglio nel piano della piastra di base in direzione z

N - forza perpendicolare alla piastra di base

f_c - coefficiente di attrito

Shear in contact plane

	Item	Loads	Vy [kN]	Vz [kN]	Vrdy [kN]	Vrdz [kN]	Ut [%]	Status
>	BP1	LE1	14,900	-29,739	384,560	662,947	4,5	

Design data

	Friction	Css
>	0,25	HEB140