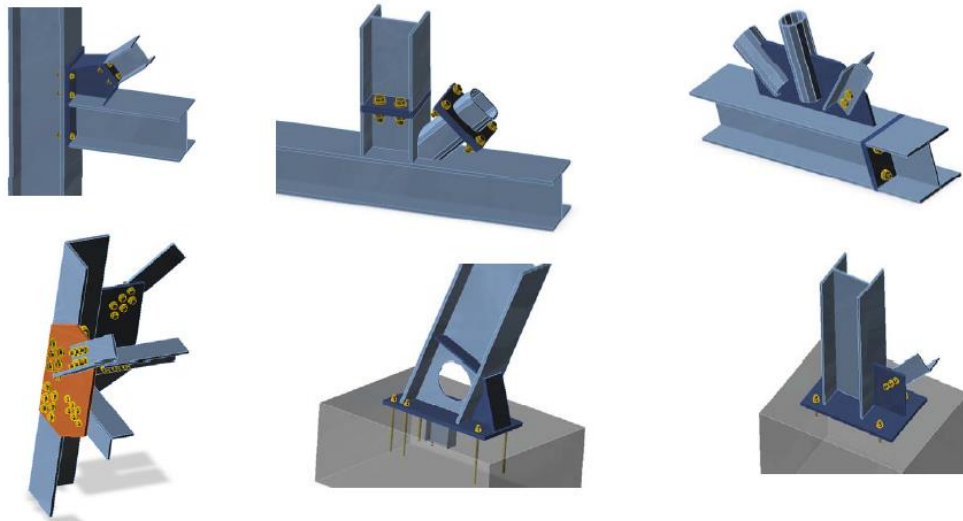


# **METODO CBEFEM (Componenti Based Finite Element Method)**

*Metodologia INNOVATIVA per progettare, analizzare e verificare connessioni in acciaio di qualunque tipo*

## **1. STORIA**

L'idea nasce nel 2005, a Brno, Repubblica Ceca. Fino ad allora infatti le connessioni dei nodi in acciaio vengono calcolate utilizzando il metodo delle componenti. Metodo valido senza dubbio, ma mancante di generalità: i nodi analizzabili rientrano in una gamma ristretta. Ci si è chiesto quindi: perché non poter progettare un nodo qualsiasi?



Da questa domanda è iniziato un periodo di studio alla ricerca di una soluzione, che ha coinvolto discussioni e collaborazioni con ingegneri del settore, con le università e con altri ambiti (industria aerospaziale).

Nel 2013 parte quindi il progetto “Merlion” che coinvolge una squadra di ricerca e sviluppo formata da :

- FCE CTU Praga – Prof. Frantisek Wald & team
- FCE BUT Brno – prof. Miroslav Bajer & team
- IDEA RS – Lubos Sabatka, Jaromir Kabelac, Martin Pospisil, Drahos Kolaja, Lukas Hron, Lukas Heryan

La società IDEA RS è nata precedentemente (luglio 2009), fondata dal prof. Wald e da Lubos Sabatka, M.Sc, Ph.D.. La società si occupa dello sviluppo e distribuzione di software strutturali e FEA, ed è quindi la casa produttrice del software IDEA StatiCa, suddiviso nelle sezioni Steel, Concrete e Prestressing. All'interno della sezione Steel, il modulo IDEA Connection, è quello che utilizza e mette in pratica il metodo CBFEM, permettendo di analizzare e verificare qualsiasi tipo di nodo in acciaio.

Il bagaglio tecnico delle varie squadre partecipanti al progetto vanta lunga esperienza nello sviluppo del metodo delle componenti così come nella progettazione delle strutture in acciaio, nonché comprovata capacità di implementazione dei software FEM. L'investimento in termini monetari è di 800000 Euro.

L'obiettivo del progetto Merlion è quindi sviluppare una soluzione per l'analisi e verifica dei nodi che sia:

- GENERALE abbastanza da poter essere utilizzato per la totalità dei nodi.
- SEMPLICE E VELOCE a sufficienza, in modo da fornire risultati in tempi comparabili con quelli dei metodi e strumenti attualmente in uso.
- COMPRENSIBILE 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.

## 2. DESCRIZIONE DEL METODO CBFEM – MODELLO UTILIZZATO

### 2.1. Introduzione

La teoria della trave è molto usata dagli ingegneri nell'ambito della progettazione di strutture in acciaio. Vi sono però punti della struttura in cui essa non può essere usata, come ad esempio nei giunti saldati, nelle connessioni bullonate, in presenza di fori o di rastremazioni nell'altezza delle sezioni. L'analisi strutturale in questi casi richiede particolare attenzione a causa del comportamento non-lineare degli elementi, come la plasticizzazione delle piastre in acciaio, i punti di contatto tra piastre o tra piastra di base e blocco in calcestruzzo, saldature...

La letteratura tecnica offre metodi ingegneristici per la soluzione di questi problemi. La caratteristica comune ad essi è che sono ricavati da forme strutturali tipiche e casi di carico elementari, mancando quindi di completa generalità.

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. Viene quindi realizzato un modello che è formato dalle varie componenti, in modo da poter determinare per ognuna di esse forze e tensioni.

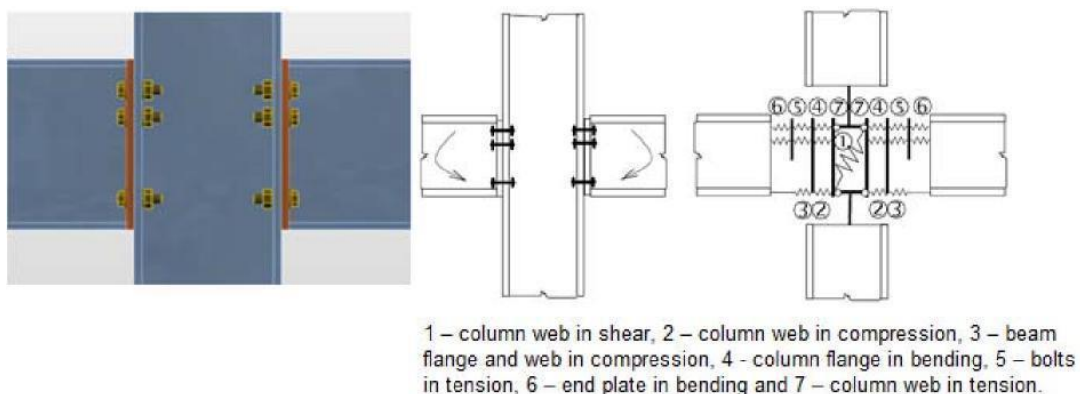


Figura 1. Nodo a T con il metodo delle componenti.

Ogni componente (bulloni, piastre, saldature..) viene poi verificata singolarmente, usando i metodi ad essa relativi.

Poiché ogni tipo di nodo necessita di un proprio specifico modello, questo metodo presenta dei limiti nei casi in cui si debbano risolvere giunti con geometrie generiche e carichi qualunque.

Per la progettazione avanzata dei giunti in acciaio entra quindi in gioco IDEA RS, assieme al Dipartimento di Strutture in Acciaio e Legno della Facoltà di Ingegneria Civile di Praga e all'Istituto di Strutture in Acciaio e Legno della Facoltà di Ingegneria Civile della Brno University of Technology, con la metodologia CBFEM.

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 mancanza di generalizzazione nell'analizzare le tensioni delle singole componenti, è stato sostituito dalla modellazione e analisi tramite metodo degli elementi finiti.

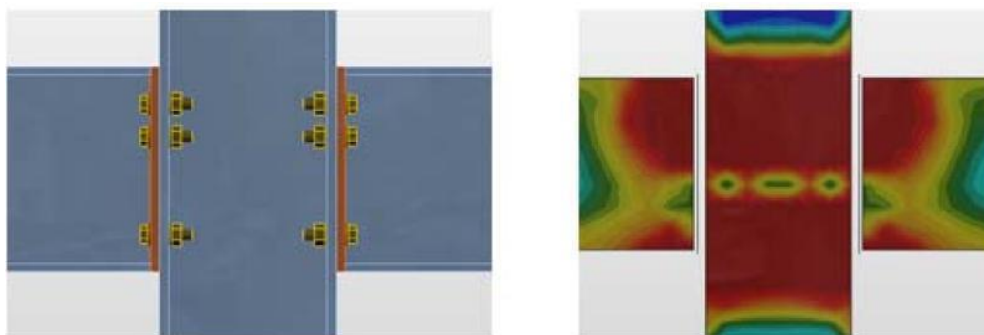


Figura 2. Nodo a T analizzato col FEM.

## 2.2. Analisi degli sforzi e deformazioni nel nodo

Il metodo delle componenti è uno strumento valido per gli ingegneri e dà risultati veritieri per molti tipi di connessioni con cui gli ingegneri hanno a che fare. Ma il punto debole, come già accennato, è il modello necessario a calcolare forze interne e tensioni. Per ogni tipo di giunto infatti serve un modello specifico. Una volta poi ricavate le forze, si possono applicare le verifiche specifiche dettate da normativa per bulloni, saldature e altre componenti.

Lo scopo del metodo CBFEM, come il nome stesso suggerisce (Component Based finite Element Method, cioè metodo agli elementi finiti basato sulle componenti) combina il tradizionale metodo delle componenti con un modello di tipo FEM.

Le forze interne e le tensioni verranno quindi calcolate attraverso un'analisi FEM, le verifiche saranno poi applicate come nel metodo delle componenti.

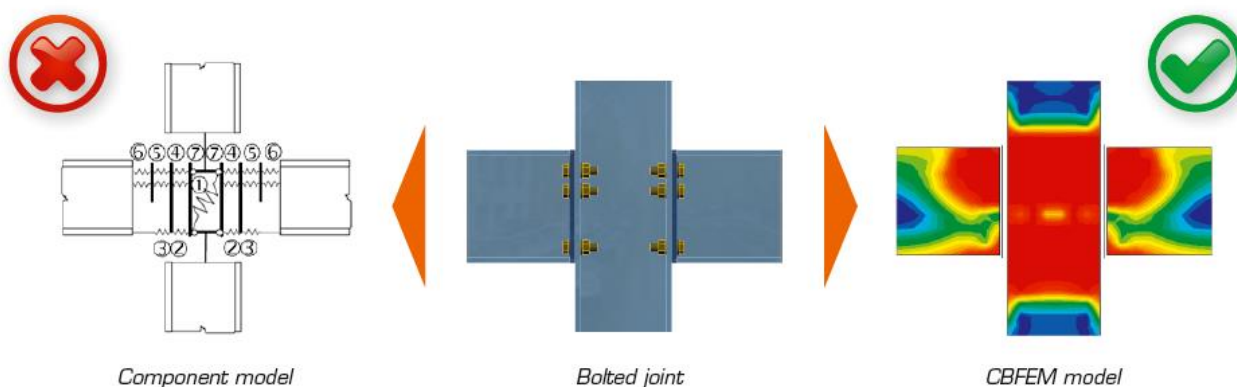


Figura 3. Confronto Modello per componenti - Modello CBFEM.

Riassumendo, il modello in questione è una sinergia tra il metodo delle Componenti e il modello FEM. Il metodo è generale, si può eseguire un'analisi delle tensioni, un'analisi di buckling e un'indagine della rigidezza. Tutto questo si combina con una verifica globale e intuitiva dell'unione.

Unire tutti questi pezzi e giungere alla soluzione descritta non è stato facile, e il metodo CBFEM è quindi protetto da brevetto, sia a livello nazionale che internazionale. Il software IDEA Connection è l'unico a sfruttare il metodo CBFEM.

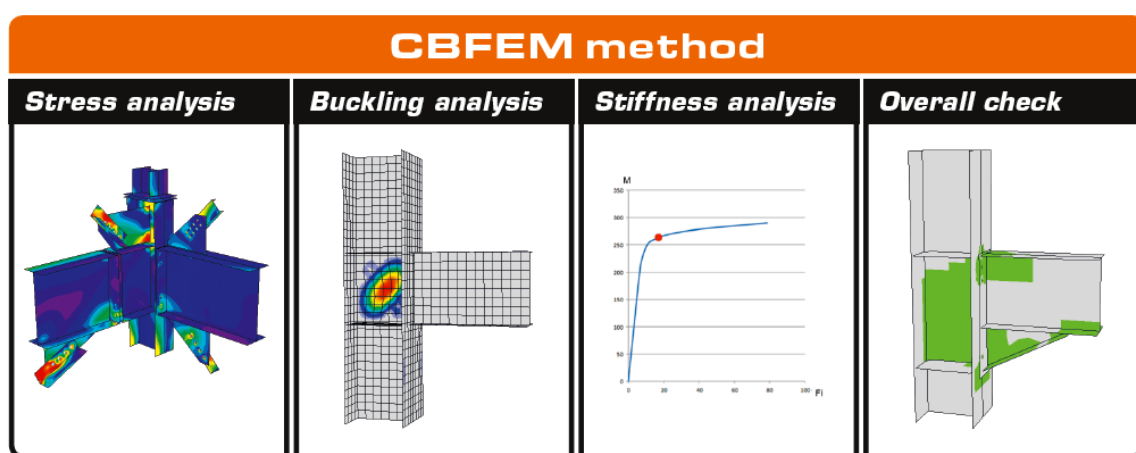


Figura 4. Elenco delle funzionalità del metodo CBFEM.

### 2.3. Elementi lineari (travi, pilastri..) e piastre in acciaio

Tutte le parti (ali, anime..) degli elementi lineari (travi, pilastri..) e tutte le piastre aggiuntive (flangie, piastre di base..) sono modellati come elementi plate. Questi elementi sono fatti di acciaio (in generale metallo) e il comportamento del materiale è significativamente non lineare. La non linearità (plasticità) deve essere perciò rispettata in fase di 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 5, diagramma

verde. 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% (EC3).

La tensione nell'acciaio non può superare quella di snervamento se si utilizza un modello elasto-plastico ideale, ma una volta raggiunta questa, mantiene ancora delle riserve di plasticità importanti. E' perciò inutile portare a termine il controllo della tensione. La verifica viene quindi effettuata in termini di deformazione plastica: quella calcolata nella piastra andrà quindi confrontata col limite, che da EC3 è pari al 5%.

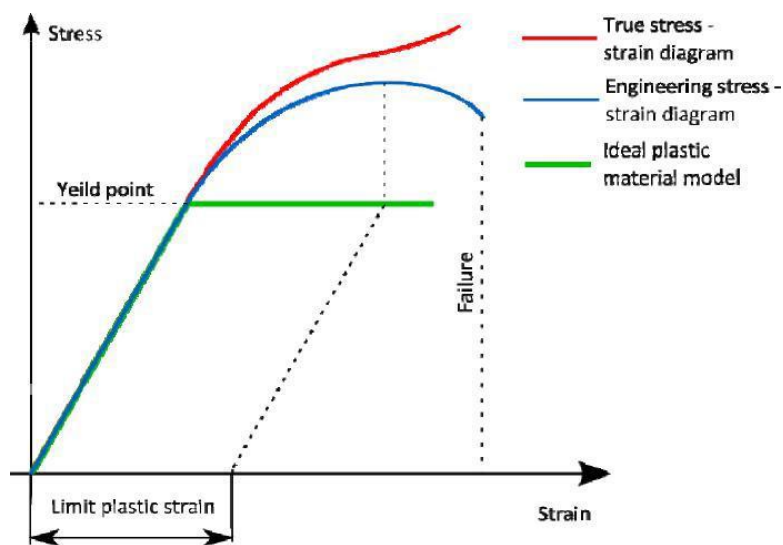


Figura 5. Comportamento elasto-plastico dell'acciaio.

## 2.4. Saldature

Le piastre di acciaio dei vari elementi vengono modellate come elementi individuali e successivamente interconnesse tra loro grazie a saldature e bulloni.

Poiché il metodo CBFEM cerca di modellare precisamente la situazione reale, i plate utilizzati per l'analisi non sono interconnessi e non vengono generate in automatico intersezioni tra loro, nonostante questo sia di uso comune nella modellazione di strutture ed edifici. La mesh agli elementi finiti viene quindi generata su ogni singola piastra indipendentemente dalle mesh delle piastre vicine (vedi figura 6).

Questo è fonte di enormi vantaggi computazionali, poiché senza dover raffinare la mesh in corrispondenza degli spigoli, il tempo di calcolo è decisamente abbattuto (sono presenti meno elementi).

Inoltre permette di modellare le saldature come speciali vincoli di interpolazione di forze, permettendo tramite esse la connessione tra le piastre (come nella realtà costruttiva). Per rendere l'idea, si immaginino piccoli bracci tra i nodi di piastre adiacenti.

Il vantaggio aggiunto è quello di potersi calcolare le forze esatte nei bulloni e nelle saldature.

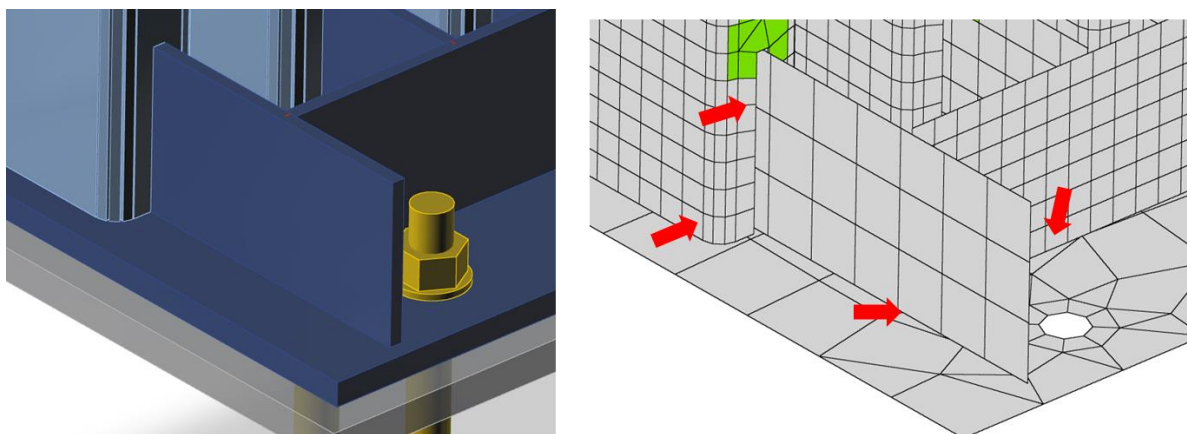


Figura 6. Dettaglio della mesh tra piastre adiacenti.

## 2.5. Bulloni in trazione

Un'unione bullonata vede l'interazione tra piastre e bulloni. Avremo due piastre e diversi bulloni.

Bisogna tenere in conto un paio di aspetti fondamentali.

Primo, bisogna analizzare il contatto tra le due piastre (due piastre a contatto lavorano solo se in compressione), vedi Figura 7.

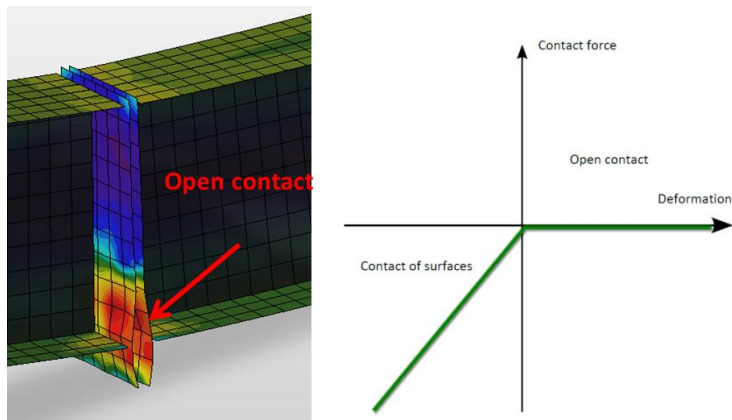


Figura 7. Esempio di distacco tra due piastre (sinistra) e diagramma (destra).

In secondo luogo, i bulloni lavorano in sola trazione. Essi sono modellati come molle elasto-plastiche, e dovrò adottare un diagramma adatto, che tenga in considerazione la plastificazione e gli altri effetti che possono aver luogo quando il bullone sta per raggiungere la sua capacità ultima.

Il diagramma utilizzato per i bulloni (e ricavato da dati sperimentali e da letteratura) sarà quindi quello in Figura 8.

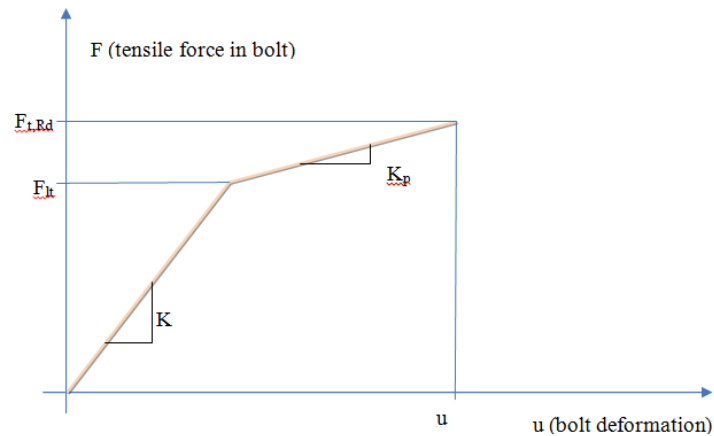


Figura 8. Diagramma costitutivo dei bulloni.

## 2.6. Bulloni a taglio

Anche nel caso di bulloni sottoposti a forze di taglio, essi sono modellati come molle elasto-plastiche.

I bulloni non sono quindi modellati come elementi solidi. E' stato però sviluppato un sotto-sistema attorno ai fori delle piastre, con una sua mesh predefinita.

L'elemento bullone ha quindi una sola dimensione (è un punto), ma viene connesso con i nodi sul bordo del foro. Vi sono quindi speciali vincoli di interpolazione e elementi di contatto tra il bullone e il bordo del foro.

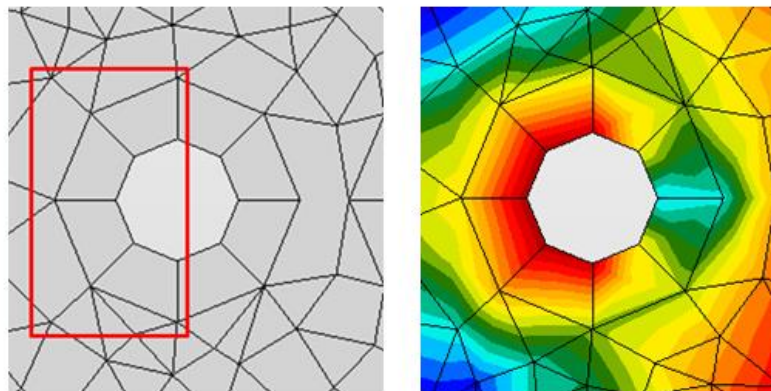


Figura 9. Mesh e disposizione delle tensioni attorno al foro.



## 2.7. Tirafondi e blocco in calcestruzzo

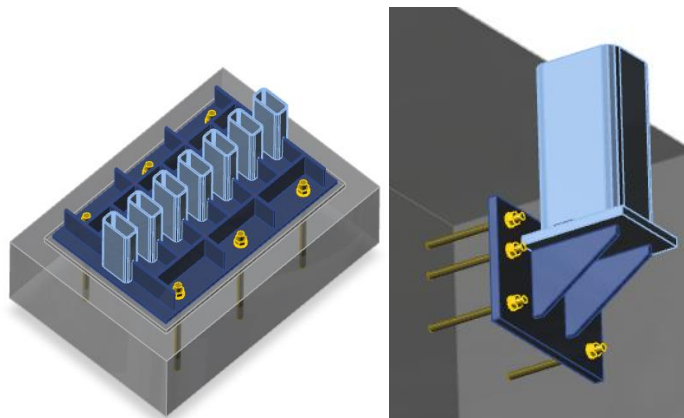


Figura 10. Esempi di utilizzo di un blocco in calcestruzzo.

Trovandosi di fronte a casi come quelli in Figura 10, è sorta la necessità di modellare all'interno del CBFEM anche i tirafondi e il blocco in calcestruzzo.

Il blocco non è modellato agli elementi finiti, ma usando un modello di sottosuolo alla Winkler-Pasternak. Su ogni punto della mesh della piastra di base vi sono elementi di contatto e molle che rappresentano la rigidità del calcestruzzo. Dopo la richiesta di diversi clienti, è stata aggiunta anche la possibilità di inserire un giunto di malta tra la piastra e il blocco.

I tirafondi di ancoraggio sono invece modellati come molle non lineari e sono svolte le verifiche secondo normativa EN o ETAG.

Con questo tipo di modello, si calcola la tensione di contatto sotto la piastra di base. Si deriva quindi l'area effettiva, come da Eurocodice, e si calcola la tensione media per quest'area effettiva. Questa viene quindi confrontata con la capacità ultima del calcestruzzo.

Per quanto riguarda gli sforzi di taglio alla base, si può scegliere tra tre opzioni di trasferimento di essi: solo tramite attrito, con ferro a taglio o con gli ancoraggi.

## 3. ANALISI

### 3.1. Progetto della connessione

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

L'idea è quella di una modellazione “no limits”. Valida quindi per qualsiasi tipo di sezione (cave, saldate, formate a freddo..), per un numero qualsiasi di elementi convergenti nell'unione, per configurazioni 2D o 3D.



Il modello FEM viene generato automaticamente. Il progettista non crea quindi il modello, ma solo il giunto, usando le svariate Operazioni di produzione offerte – vedi figura 11.

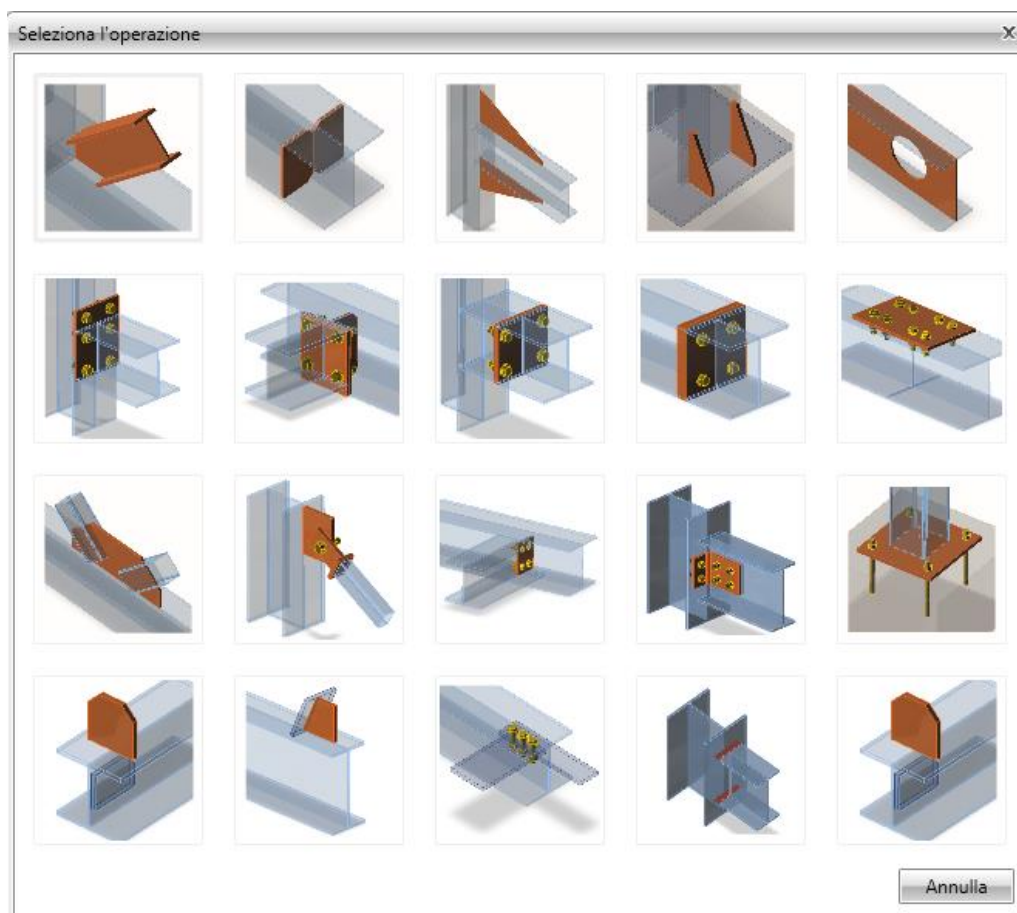


Figura 11. Possibili operazioni di produzione applicabili al nodo.

Attraverso quindi, tagli, rinforzi, irrigidimenti, nervature, flange, flange sfalsate, monconi, piastra con piastra, giunzioni, fazzoletti, piatti rinforzati, coprighiunti, piastre di base, piastre generiche, fissaggi, saldature, è possibile modellare qualsiasi tipo di nodo, dei più semplici, ai più complessi (vedi figura 11).

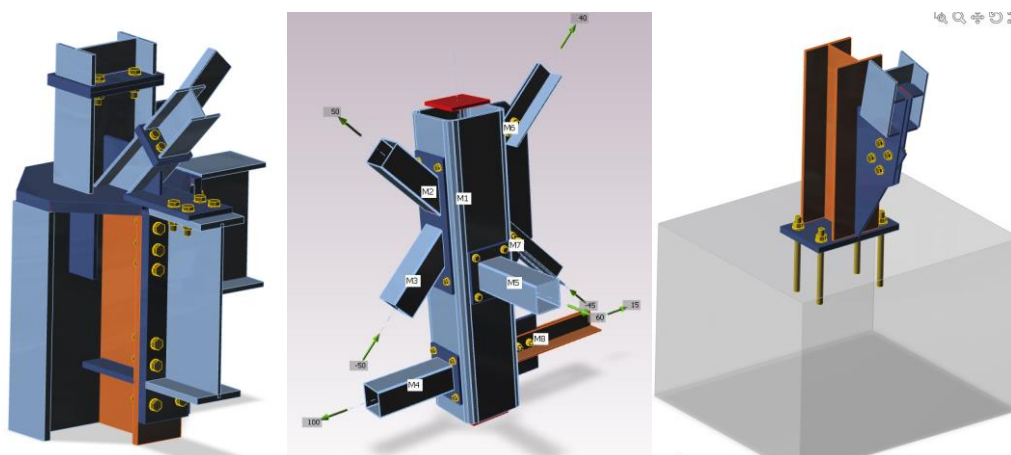


Figura 12. esempi di nodi complessi modellabili con IDEA Connection.

### 3.2. Elemento resistente e elementi ad esso connessi

Un elemento del nodo è sempre impostato come “resistente”. Tutti gli altri membri sono “connessi”. L’elemento resistente 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.

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 sollecitazioni convergenti in un nodo dai vari elementi che vi si intersecano in un modello di analisi a telaio vengono trasferite alla fine dei relativi segmenti. Le eccentricità degli elementi rispetto al nodo, causate dal progetto del nodo stesso, vengono rispettate in questo passaggio.

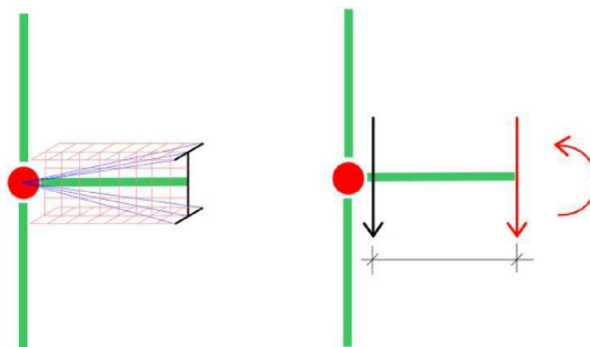


Figura 13. Trasferimento dello sforzo di taglio dal giunto all'estremità più lontana del segmento.

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.

### 3.4. Modalità di analisi

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.

### 3.5. Analisi 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 procedura, 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  $\alpha$ , ottenuti come risultato dell'analisi FEM.

Si determina il coefficiente di carico  $\alpha_{ult}$ , 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  $\alpha_{ult}$  è invece in corso di implementazione.

Successivamente viene determinato il coefficiente di carico  $\alpha_{cr}$  – 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  $\alpha_{ult}$ . 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  $\rho$ , 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  $\lambda_{p0}$  la perdita di stabilità è trascurabile.

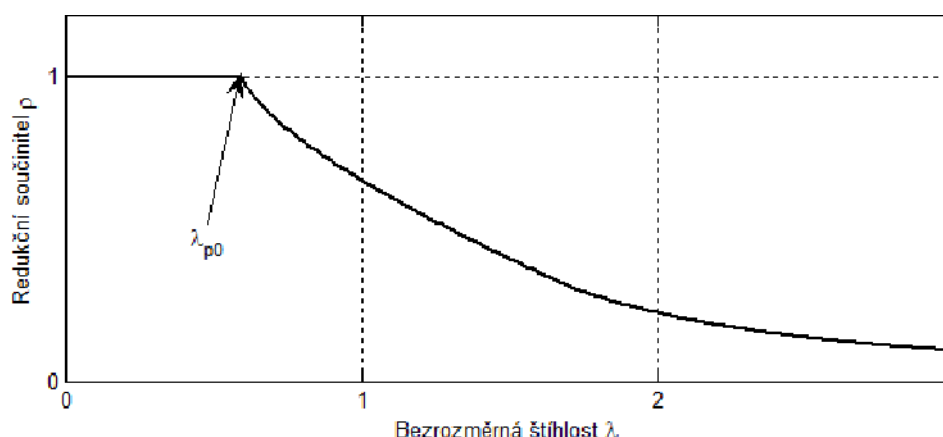


Figura 14. Tipica dipendenza del coefficiente riduttivo con la snellezza adimensionale.

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  $\alpha_{cr}$  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  $\alpha_{ult}$ .

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

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.

Per ogni giunto si ottengono quindi le possibili forme di buckling, con la localizzazione grafica delle instabilità e con il relativo fattore.

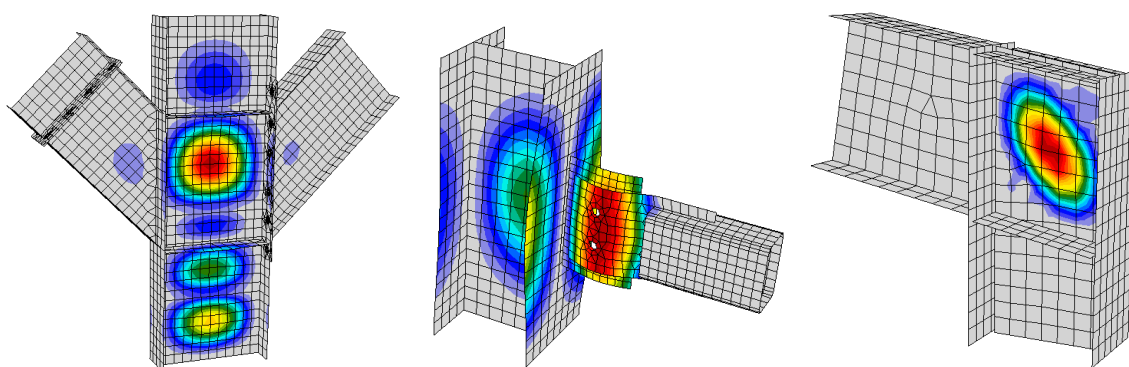


Figura 14. Configurazioni di buckling in alcuni nodi.

### 3.6. Verifica della rigidezza

Ogni nodo è classificato a seconda della propria rigidezza tramite EC3 (vedi figura 15).

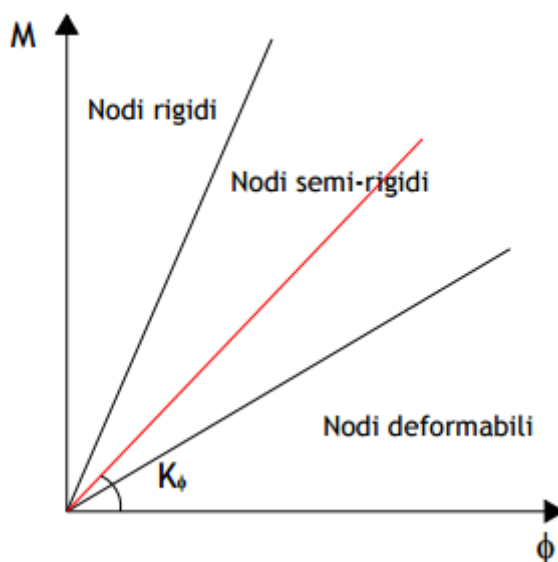


Figura 15. Classificazione del nodo tramite rigidezza.

Applicando un certo carico (momento flettente, torsionale o assiale), verrà calcolata la rotazione (o lo spostamento) dell'elemento relativo a quel carico. Verrà poi calcolata la rigidezza secante e classificato il nodo in base ad essa.

Applicando una serie di combinazioni di carichi con valori crescenti del momento, otterrò i corrispettivi valori di rotazione e sarà possibile costruire un diagramma Momento-Rotazione.

## 4. VERIFICHE

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

### 4.1. Piastre

Sulle piastre vengono calcolate sia la tensione equivalente che 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 viene effettuata a livello di deformazione plastica equivalente. Nell'Eurocodice si suggerisce un 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 | $\sigma_{Ed}$ [MPa] | $\epsilon_{Pl}$ [%] | 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 | $F_y$ [MPa] | $\epsilon_{lim}$ [%] |
| >           | 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.

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

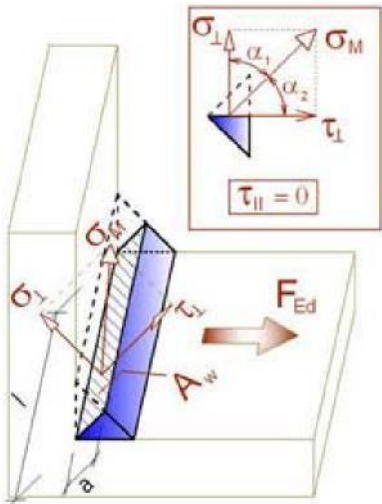
$$\sigma_{w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

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

## Utilizzazione delle saldature

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

$\beta_w$  - fattore di correlazione tab 4.1



Valutazione delle tensioni nella saldatura:

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

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] | $\sigma_{\perp}$ [MPa] | $U_t$ [%] | 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 | $\beta_w$ | $\sigma_{w,Rd}$ [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 rifollamento della piastra EN 1993-1-8:

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

Utilizzazione in tensione [%]:

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

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                           |
| $\alpha_v$ | - | 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 ▼ | Ft,Ed [kN] ▼ | V [kN] ▼ | Utt [%] ▼ | Uts [%] ▼ | Uts [%] ▼ | 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          | Ft,Rd [kN] | Bp,Rd [kN] | Fv,Rd [kN] | Fb,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 conica del 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:

$$N_0 R_{kc} = 7.2 f_{ck}^{0.5} h e f^{1.05}$$

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

$h e f$  - 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.

$\psi_{sN}$  - 1

$\psi_{reN}$  - 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  $h e f < 60$

2 per  $h e f \geq 60$

Rottura lato calcestruzzo ETAG-001 5.2.3.4:

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

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

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

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

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

$l f$  -  $h e f$

$c_1$  - distanza dal lato

$d$  - diametro dell'ancoraggio

$\psi_{sV}$  - 1

$\psi_{reV}$  - 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] | Utt [%] | 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

$\beta_j$  - 0.6

$k_j$  - fattore di concentrazione

$\gamma_c$  - 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] | $\sigma$ [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

$\gamma_{M0}$  - 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 |