



136MI – COSTRUZIONI IN ACCIAIO

Giunti trave-colonna

Giunzioni (esempi)



Giunzioni (esempi)

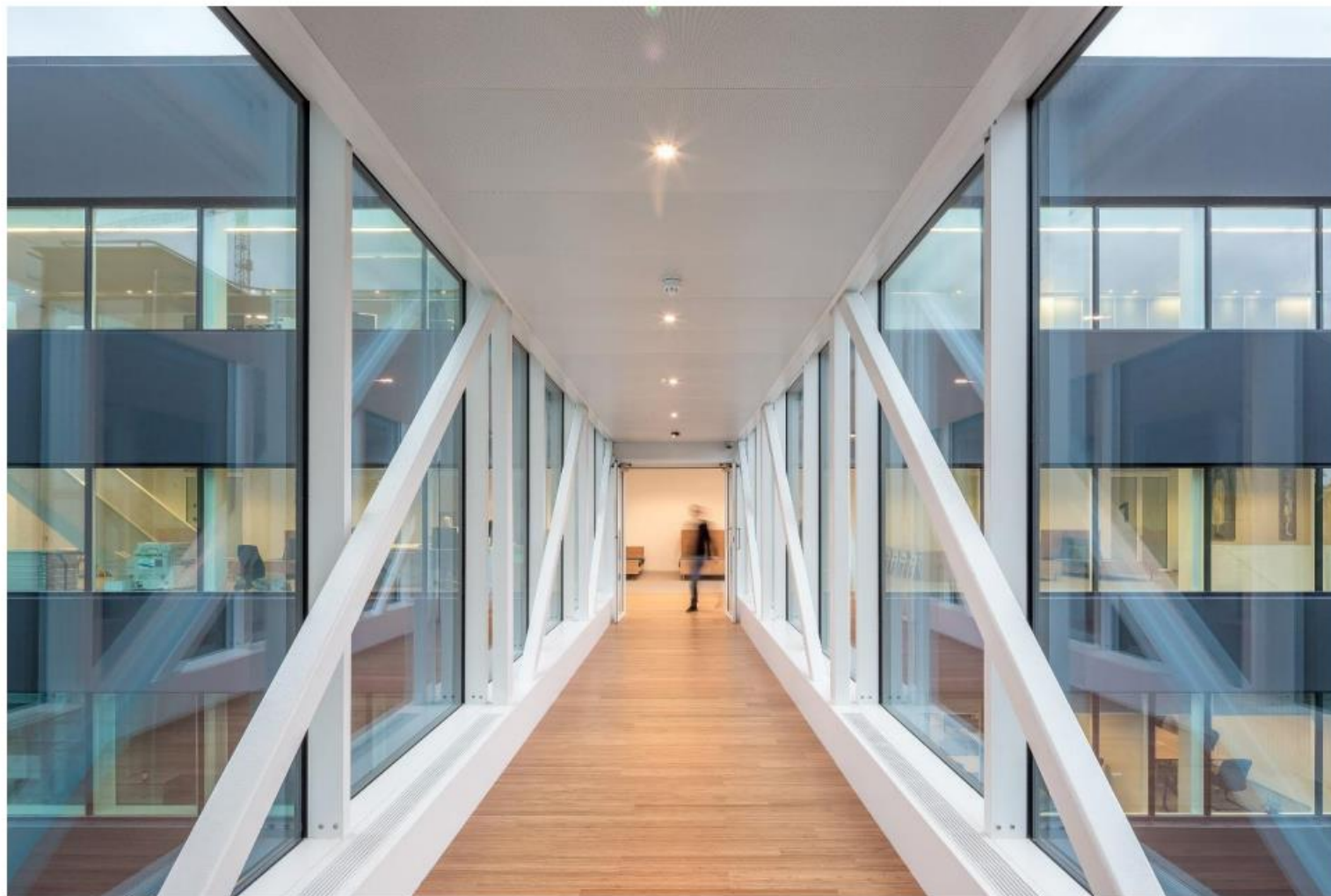


Fig.7 – Esempio di travatura reticolare con profili tubolari saldati

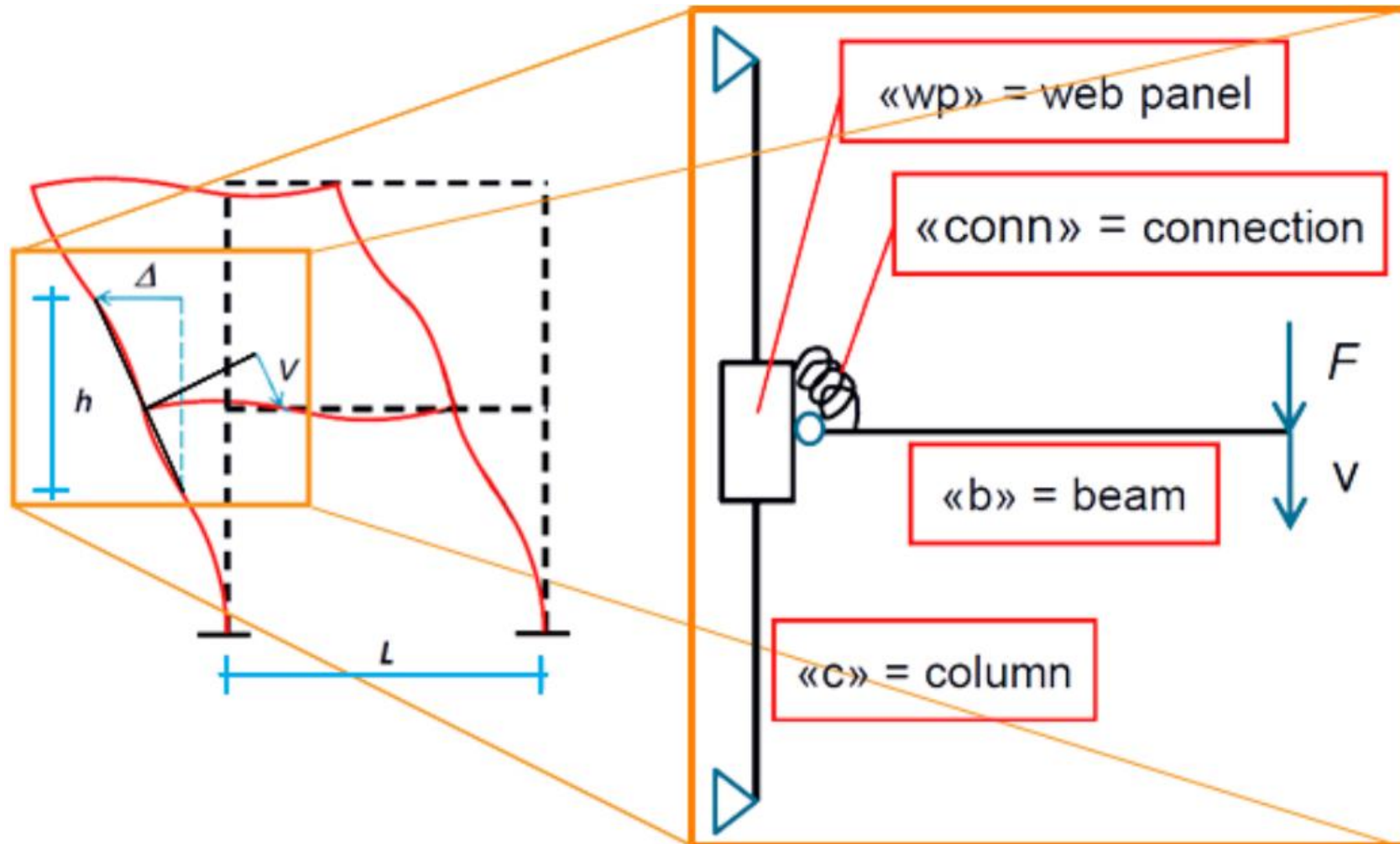
Giunzioni (esempi)



Giunzioni (esempi)



Giunzioni (esempi)



Giunzioni di telai in acciaio

- Hanno l'obiettivo di garantire il **collegamento** tra membrature monodimensionali
- L'interazione meccanica tra le **singole membrature** (anche tipologicamente diverse), e quindi il comportamento strutturale d'insieme, dipende dalle caratteristiche stabilite in fase di progetto
- Il giunto in sé comprende un insieme di elementi in acciaio (piatti, profilati), organi meccanici (bulloni, perni, ecc.), saldature
- Le giunzioni possono essere classificate in termini di:
 - **Tipologia** / soluzione tecnologica (bullonati, saldati, misti)
 - **Caratteristiche meccaniche** / comportamento strutturale, e in particolare:
 - ✓ **Rigidità** (rotazionale)
 - ✓ **Resistenza** (momento resistente)

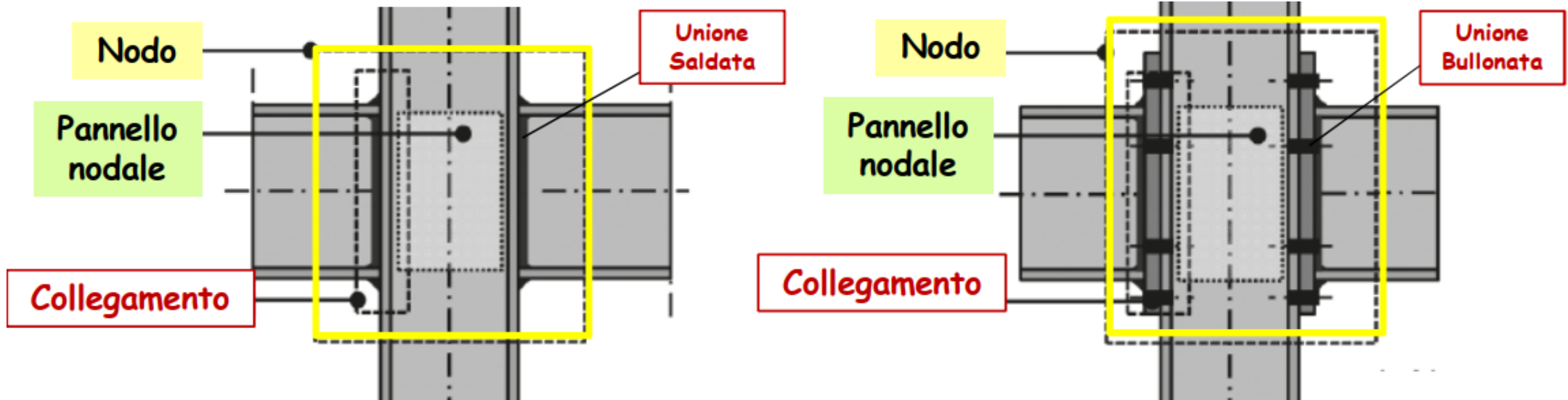
- Trave-colonna
- Trave-trave
- Colonna-colonna
- Di controvento
- Di fondazione

- DECRETO 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (NTC 2018)
- UNI EN 1993-1-8 (Eurocodice 3): Progettazione delle strutture di acciaio – Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti.

Giunti trave-colonna

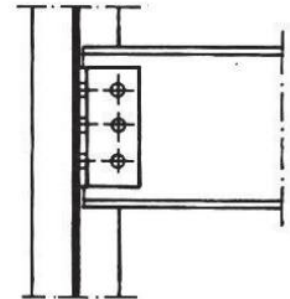
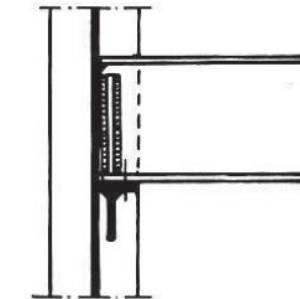
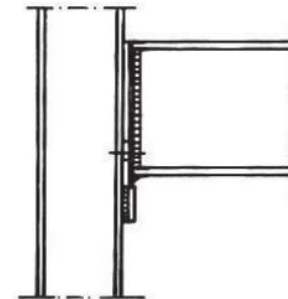
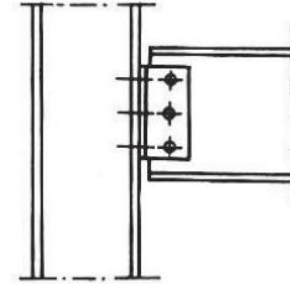
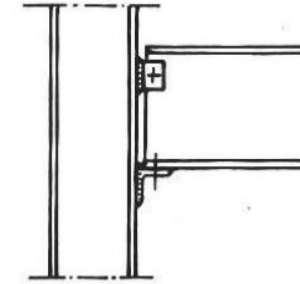
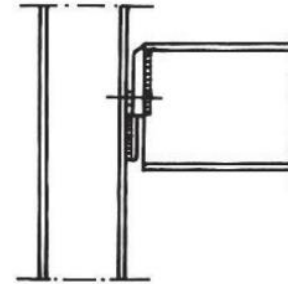
Si parla di:

- Nodi strutturali
- Collegamenti
- Unioni elementari

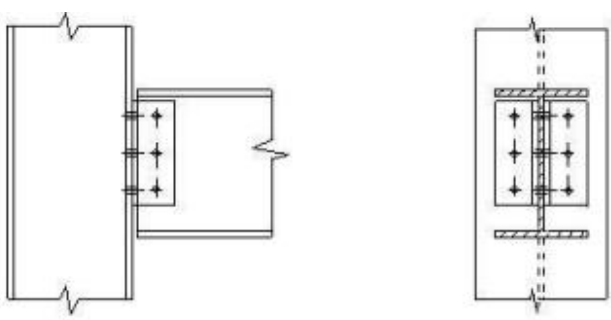


Giunti a cerniera per strutture controventate

- Telai controventati (strutture pendolari) → **isostaticità**
- **Ripartizione** dei carichi tra varie componenti (trave, colonna, giunzioni)
- I collegamenti sono chiamati a riprendere solo **azione tagliante**
- Si tratta di collegamenti di **semplice realizzazione**
- Eventualmente semi-rigidi

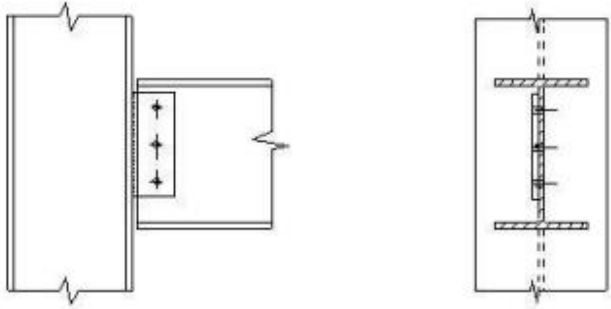


A)



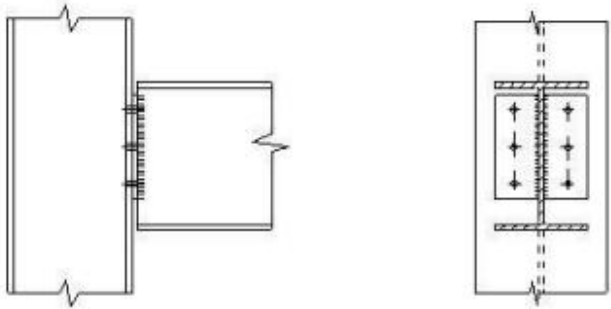
• giunto realizzato mediante angolari bullonati all'ala della colonna e all'anima della trave;

B)



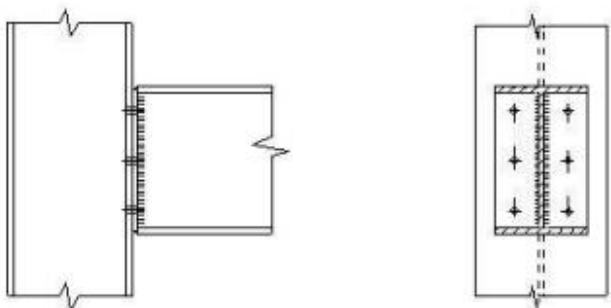
• giunto con piatto saldato in aggetto alla colonna e bullonato all'anima della trave;

C)



• giunto con piastra saldata a parte di anima all'estremità della trave e bullonata alla colonna;

D)

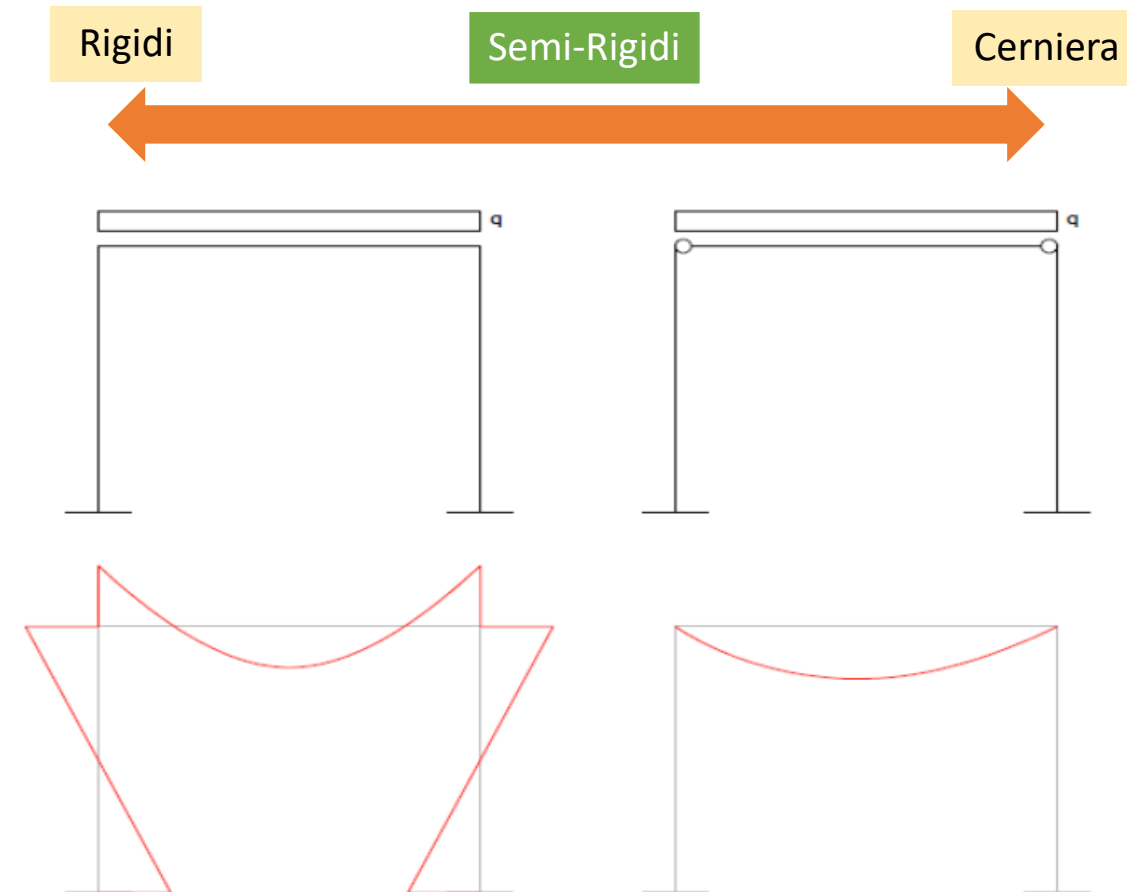


• giunto con piastra saldata, con cordoni di saldatura sia all'anima sia all'ala della trave e bullonata alla colonna.

Giunti a cerniera (esempi) ¹¹

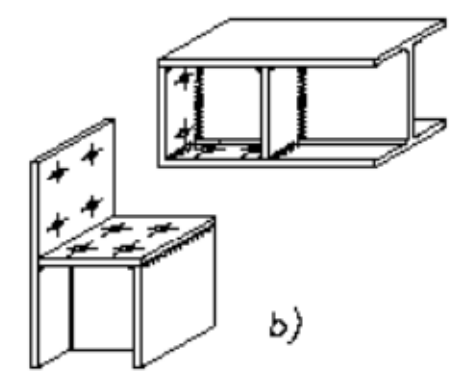
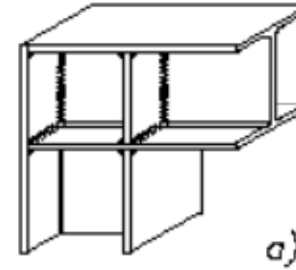
Giunti rigidi per strutture intelaiate

- Strutture non controventate
- Devono garantire un collegamento ad elevata rigidezza e resistenza a flessione → **iperstaticità**
- **Più onerosa sollecitazione** per travi e pilastri (momento flettente trasmesso dalle travi alle colonne)
- Si tratta in genere di giunzioni di **complessa realizzazione** e **costo** particolarmente elevato

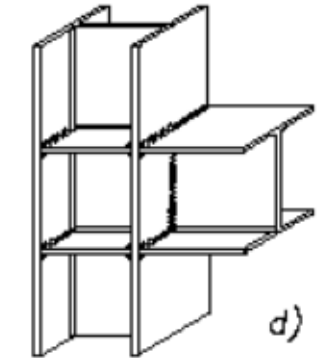
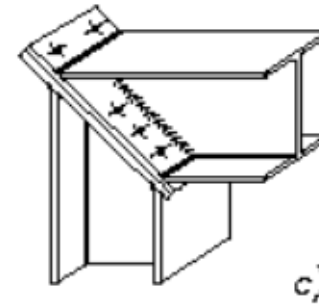


Giunti rigidi (esempi)

a) nodo di sommità per colonna perimetrale (preparato in stabilimento)

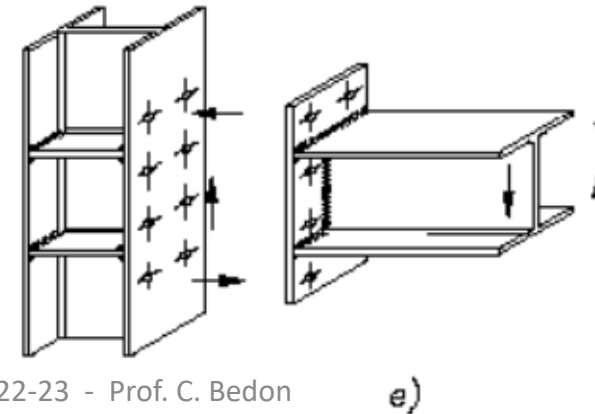


b)-c) nodo di sommità per colonna perimetrale, realizzato saldando piatti forati poi bullonati in opera

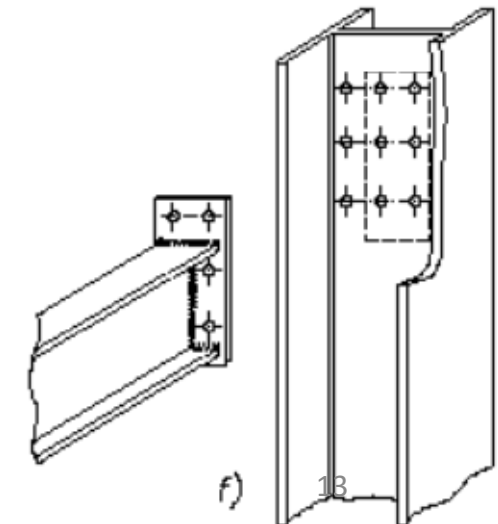


d) nodo interno trave-colonna con trave saldata all'ala della colonna e costole di irrigidimento

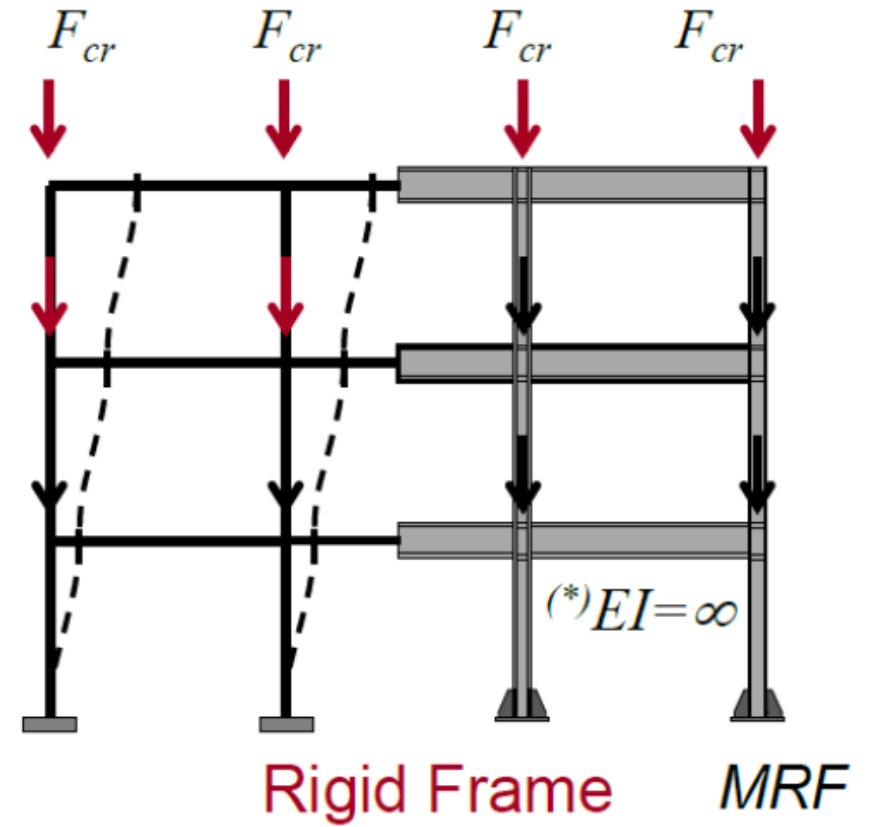
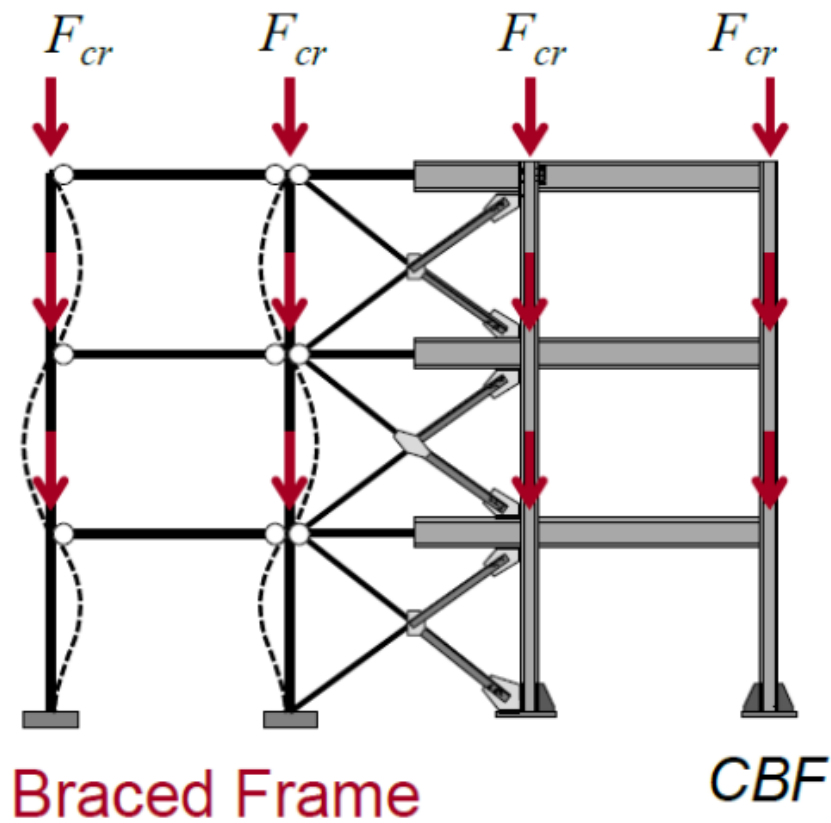
e) nodo interno trave-colonna con piastra forata saldata all'estremità della trave e bullonata all'ala della colonna, con irrigidimenti d'anima



f) nodo trave (con saldata una piastra forata in aggetto) -colonna (con anima preventivamente forata)

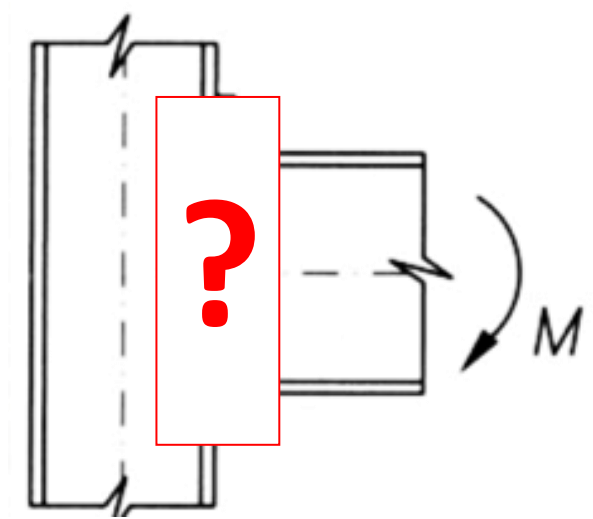


Tipo di comportamento atteso

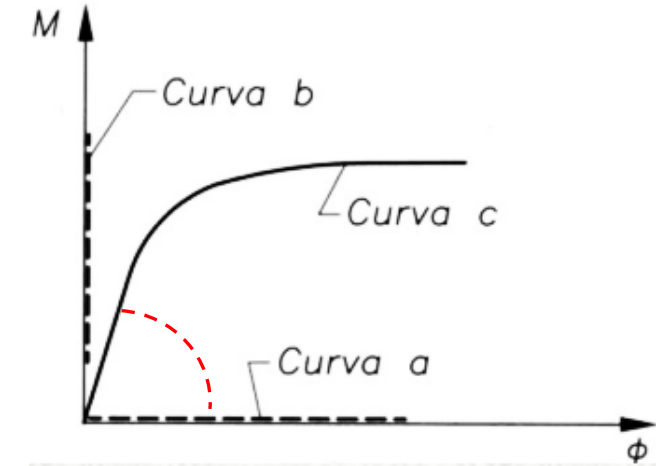


Giunti trave-colonna

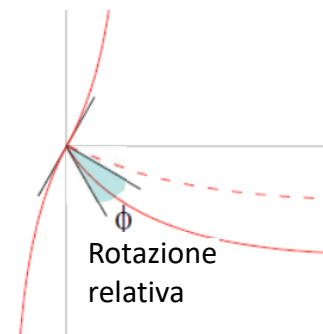
- Capacità rotazionale
- Capacità portante flessionale



- La caratterizzazione meccanica avviene in termini di **legame momento-rotazione ($M-\phi$)**
- Questo legame esprime le capacità del nodo in termini di **rigidezza e resistenza**
- In termini di **rigidezza**, il legame momento-curvatura consente di definire tre tipologie di giunto, note come:
 - **A cerniera** (curva a) → strutture pendolari
 - **Rigido** (curva b) → incastro → sistemi intelaiato
 - **Semi-rigido** (curva c) → soluzione intermedia → telai semi-continui



- In termini di **resistenza**, si definiscono nodi:
 - **A cerniera**
 - **A completo ripristino** → plasticizza la trave
 - **A parziale ripristino** → plasticizza il giunto



Legame multi-lineare

- Fase elastica
- Fase post-elastica (plasticizzazioni locali o fenomeni non-lineari nelle componenti più deboli)
- Eventuale fase incrudente
- Fase plastica

Rigidezza

Giunti:

➤ **A cerniera**

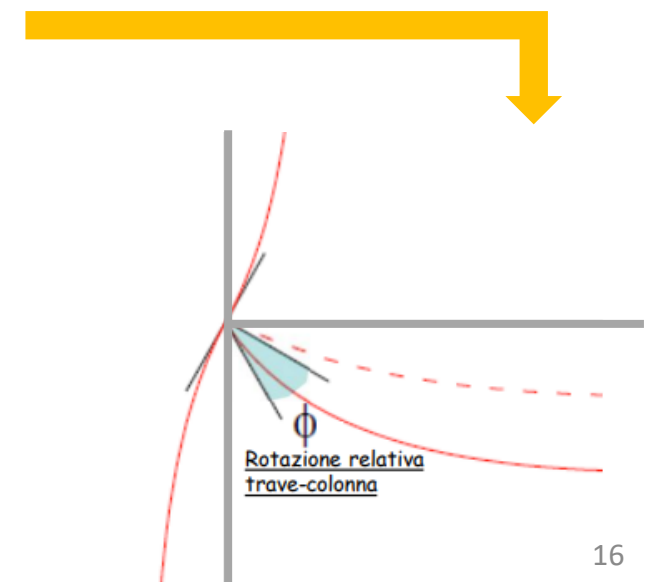
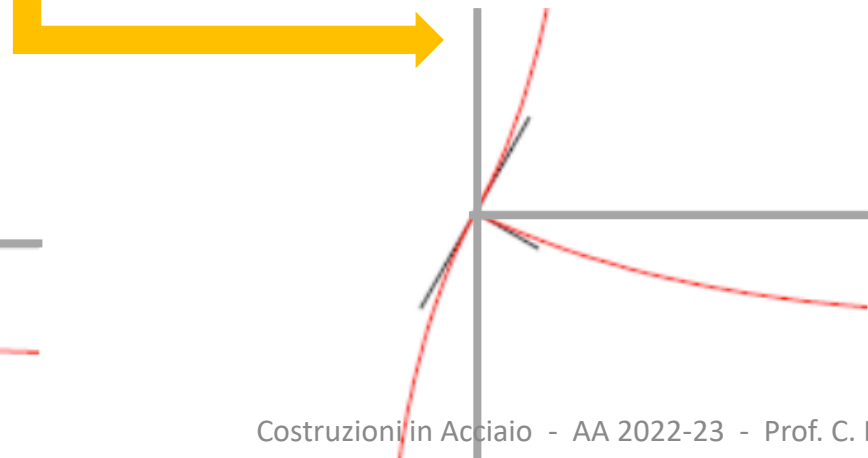
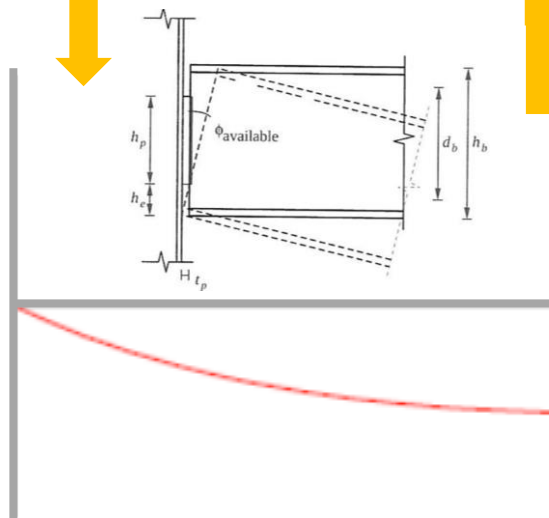
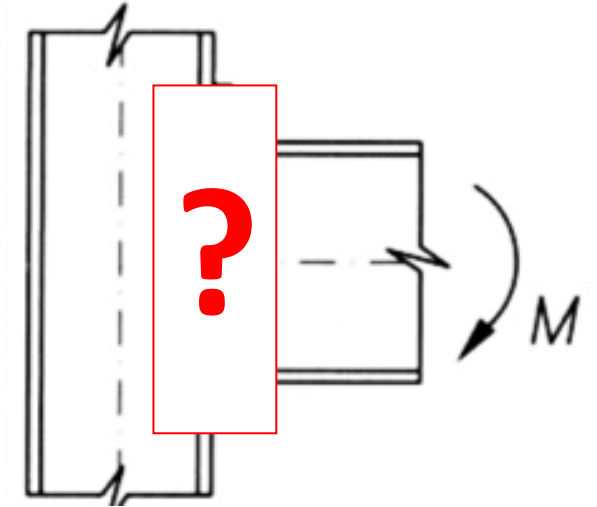
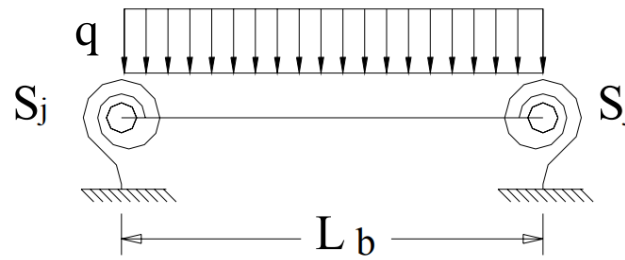
➔ rotazioni relative consentite
(strutture pendolari)

➤ **Rigidi**

➔ rotazioni relative nulle (incastro)

➤ **Semi-rigidi**

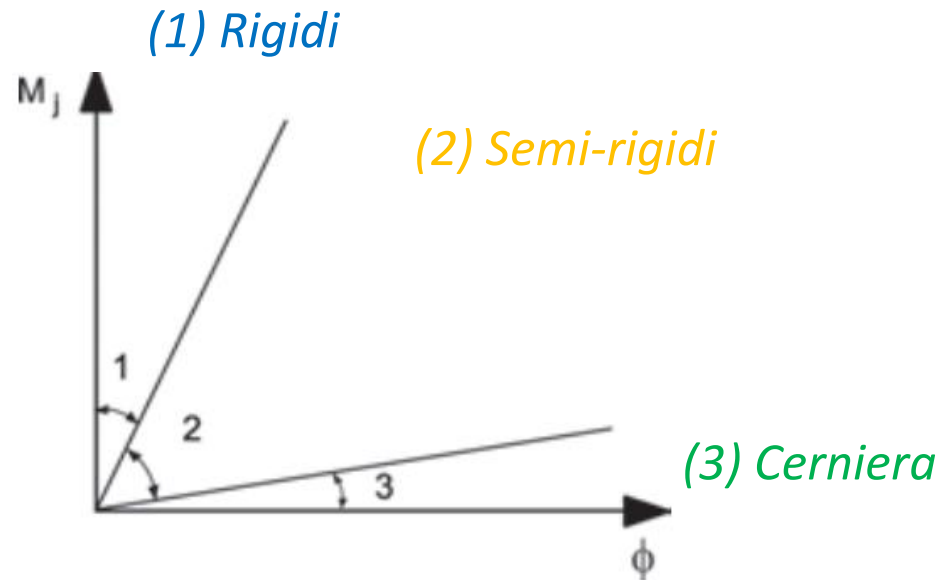
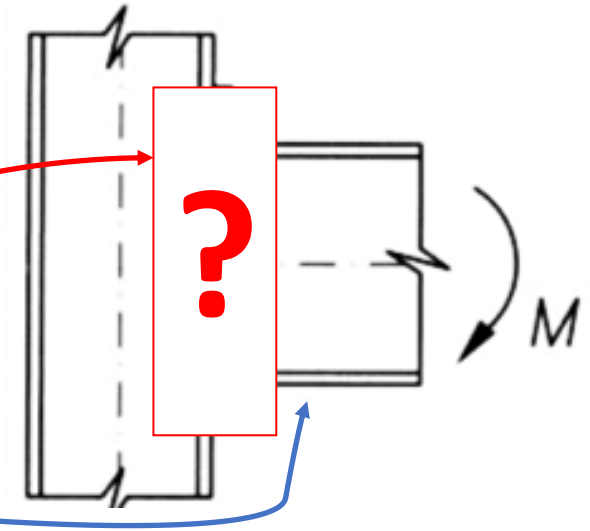
➔ rotazioni relative in parte consentite



Rigidezza

Si valuta il rapporto tra:

- Rigidezza rotazionale iniziale del nodo, $S_{j,ini}$
- Rigidezza flessionale della trave collegata, EI_b/L_b

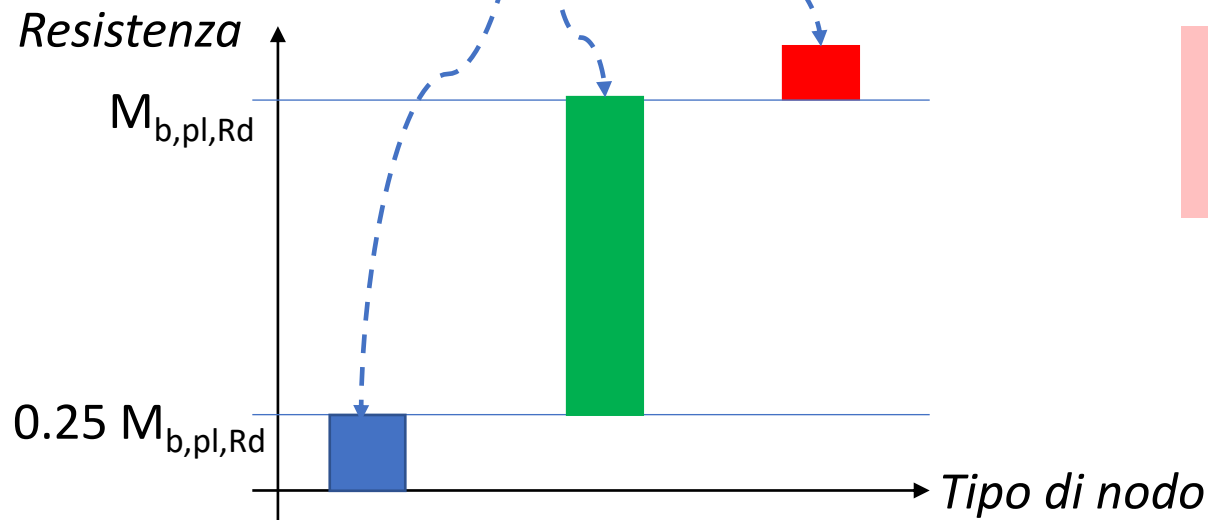


$$k_b = \frac{S_{j,ini}}{E I_b / L_b} \left\{ \begin{array}{l} \geq 8 \text{ telai controventati} \\ \geq 25 \text{ non controventati} \end{array} \right. \quad (1)$$
$$\leq 0.5 \text{ qualsiasi struttura} \quad (3)$$

Resistenza

Giunti:

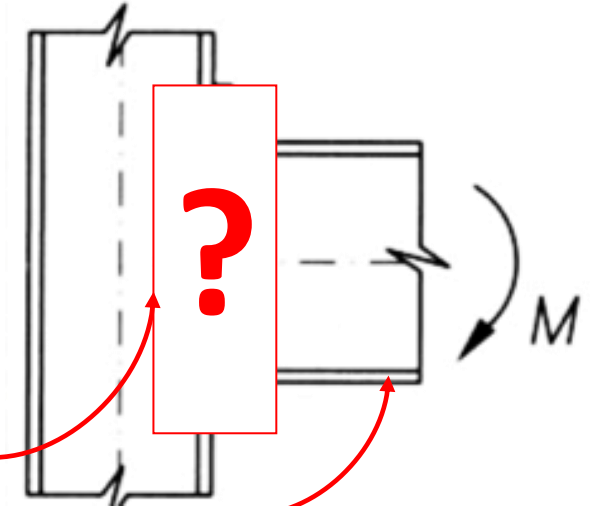
- A cerniera
- A completo ripristino
- A parziale ripristino



➔ se $M_{j,Rd} < 0.25 M_{b,pl,Rd}$

➔ se $M_{j,Rd} > M_{b,pl,Rd}$

➔ se $0.25 M_{b,pl,Rd} \leq M_{j,Rd} \leq M_{b,pl,Rd}$

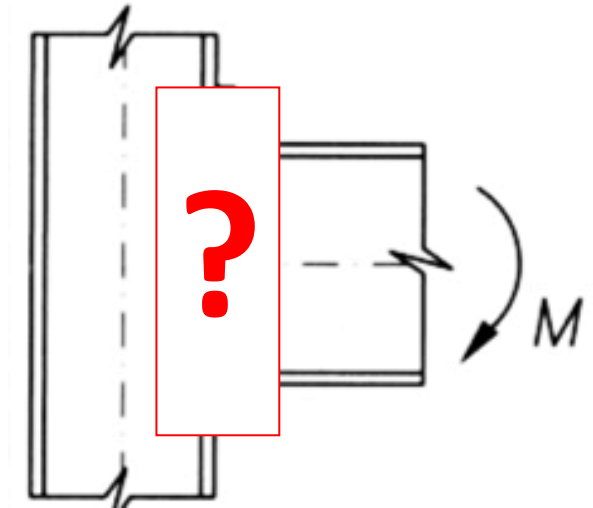


- Da controllare la capacità rotazionale
- Se $M_{j,Rd} > 1.2 M_{b,pl,Rd}$ è garantito che la cerniera plastica si formerà nella trave (controllo non necessario)

$$\bar{m} = \frac{M_{j,Rd}}{M_{b,pl,Rd}} \begin{cases} > 1 & \rightarrow \text{a completo ripristino} \\ 0.25-1 & \rightarrow \text{a parziale ripristino} \\ < 0.25 & \rightarrow \text{cerniera} \end{cases}$$

Giunti trave-colonna

		RESISTENZA		
		COMPLETO RIPRISTINO	PARZIALE RIPRISTINO	CERNIERA
RIGIDEZZA	RIGIDO	Continuo	Semi-continuo	-
	SEMI-RIGIDO	Semi-continuo	Semi-continuo	-
	CERNIERA	-	-	Semplice



- La classificazione dipende dalle caratteristiche del giunto ma anche dalle caratteristiche delle membrature collegate (in particolare le travi)
- In zona sismica: a completo ripristino (con sovraresistenza)

Metodo per componenti (Appendice J)

Compressione:

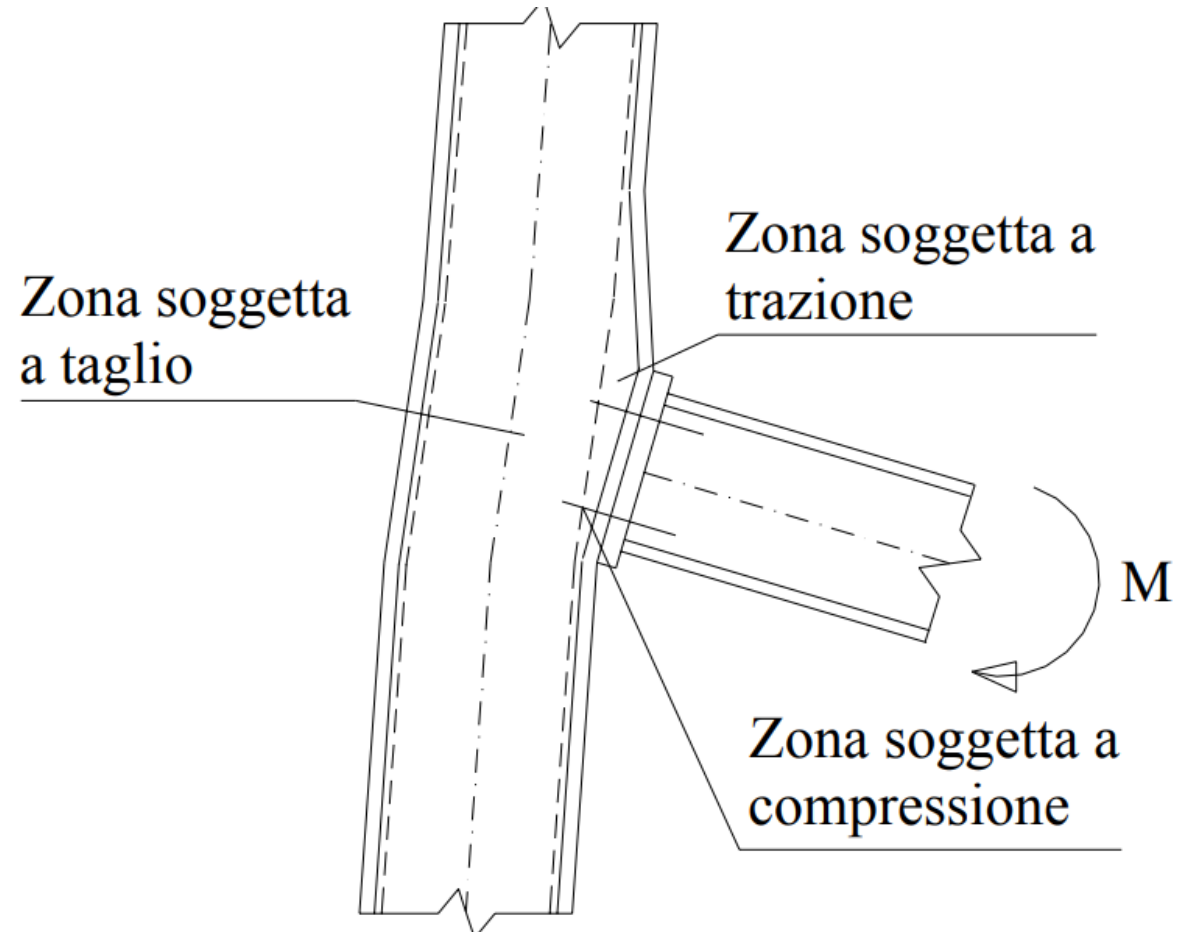
- Ala della trave a compressione
- Anima della colonna a compressione

Trazione:

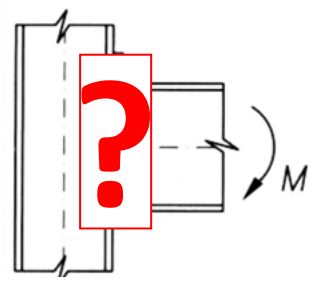
- Bulloni a trazione
- Anima della colonna a trazione
- Anima della trave a trazione
- Ala della colonna a flessione
- Piatto flangiato d'estremità a flessione

Taglio:

- Pannello d'anima della colonna a taglio



Metodo per componenti (Appendice J)

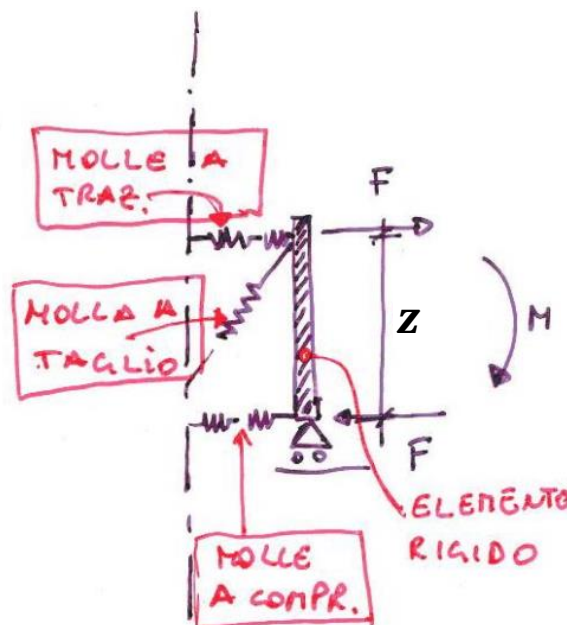
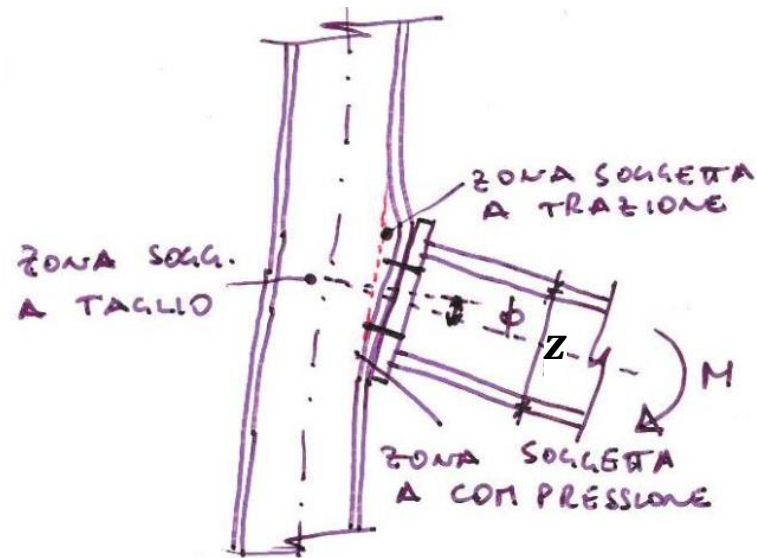


STEP 1:

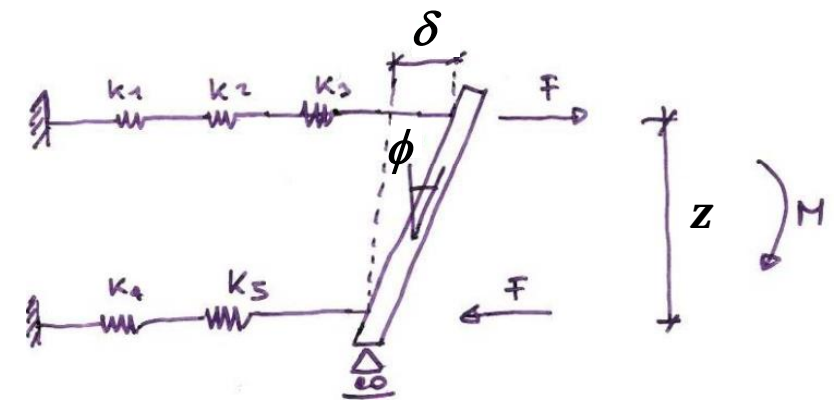
- Si individuano le componenti attive del giunto

STEP 2:

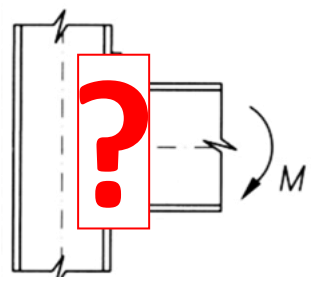
- Si caratterizza ciascuna componente tramite un legame bilineare allungamento ($F-\delta$) → **Molle assiali in serie**



$$F = \frac{M}{Z}$$



Metodo per componenti (Appendice J)

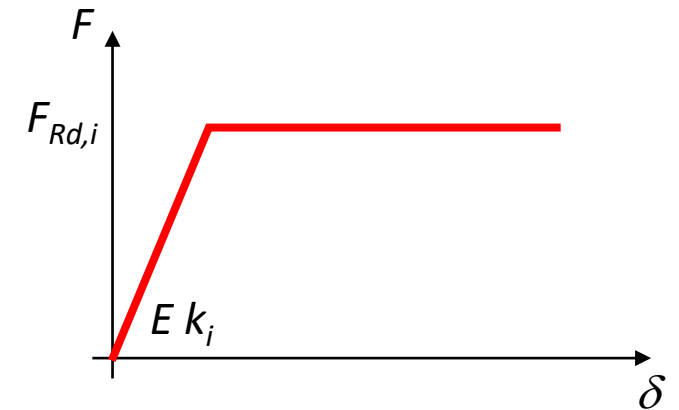


STEP 2:

- È in particolare necessario determinare la resistenza $F_{Rd,i}$ e la rigidezza k_i in campo elastico di ciascuna componente

STEP 3:

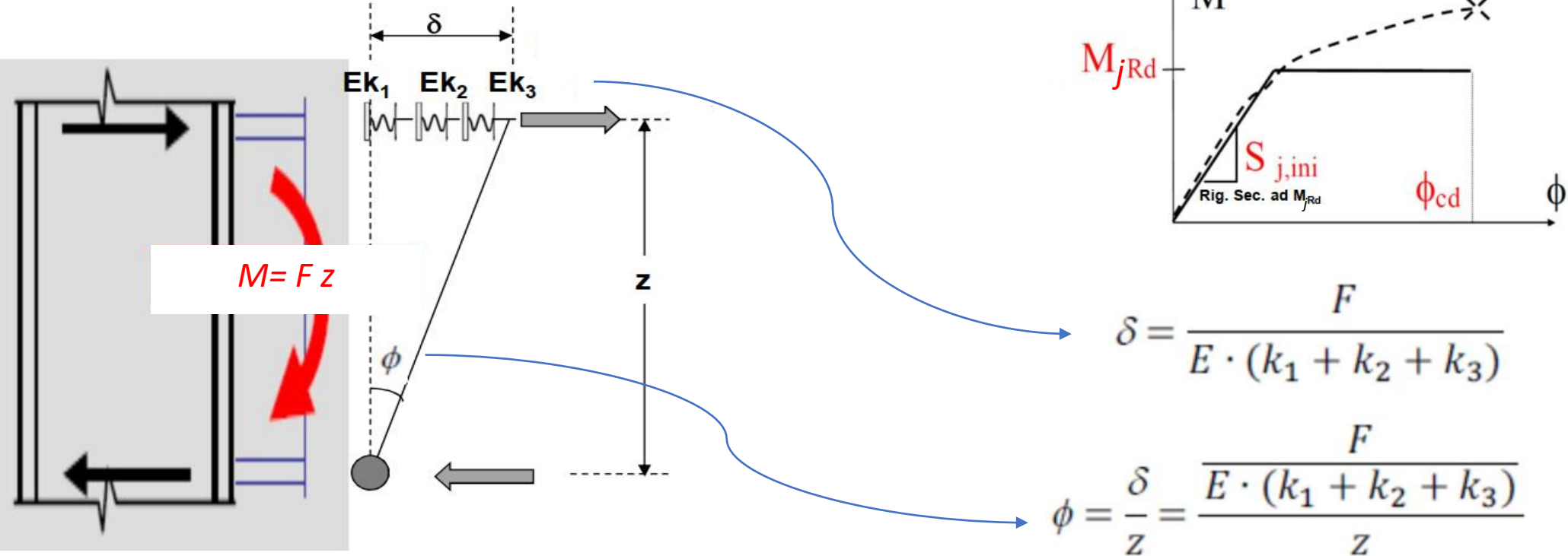
- Si assemblano le componenti dal #2 e si valutano le prestazioni del giunto in termini di legame momento-rotazione:



$$M_{j,Rd} = \min(F_{Rd,i}) \cdot z$$

$$S_{j,ini} = \frac{E z^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}}$$

Metodo per componenti (Appendice J)



$$\delta = \frac{F}{E \cdot (k_1 + k_2 + k_3)}$$

$$\phi = \frac{\delta}{z} = \frac{F}{E \cdot (k_1 + k_2 + k_3) \cdot z}$$

$$S_{j,ini} = \frac{M}{\phi} = \frac{F \cdot z}{\phi} = \frac{F \cdot z}{\frac{F}{\frac{E \cdot (k_1 + k_2 + k_3)}{z}}}} = \frac{E \cdot z^2}{\sum \frac{1}{k_i}} \Rightarrow S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{\sum \left[\frac{1}{k_i} \right]}$$

Metodo per componenti (Appendice J)

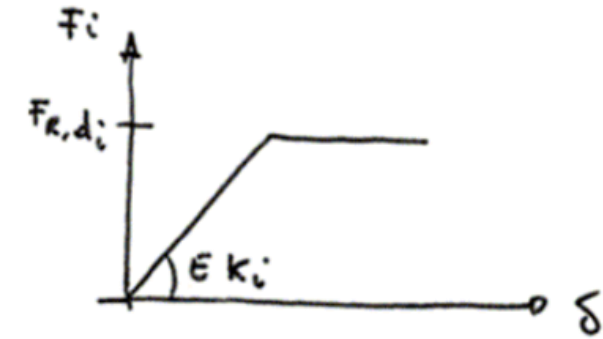
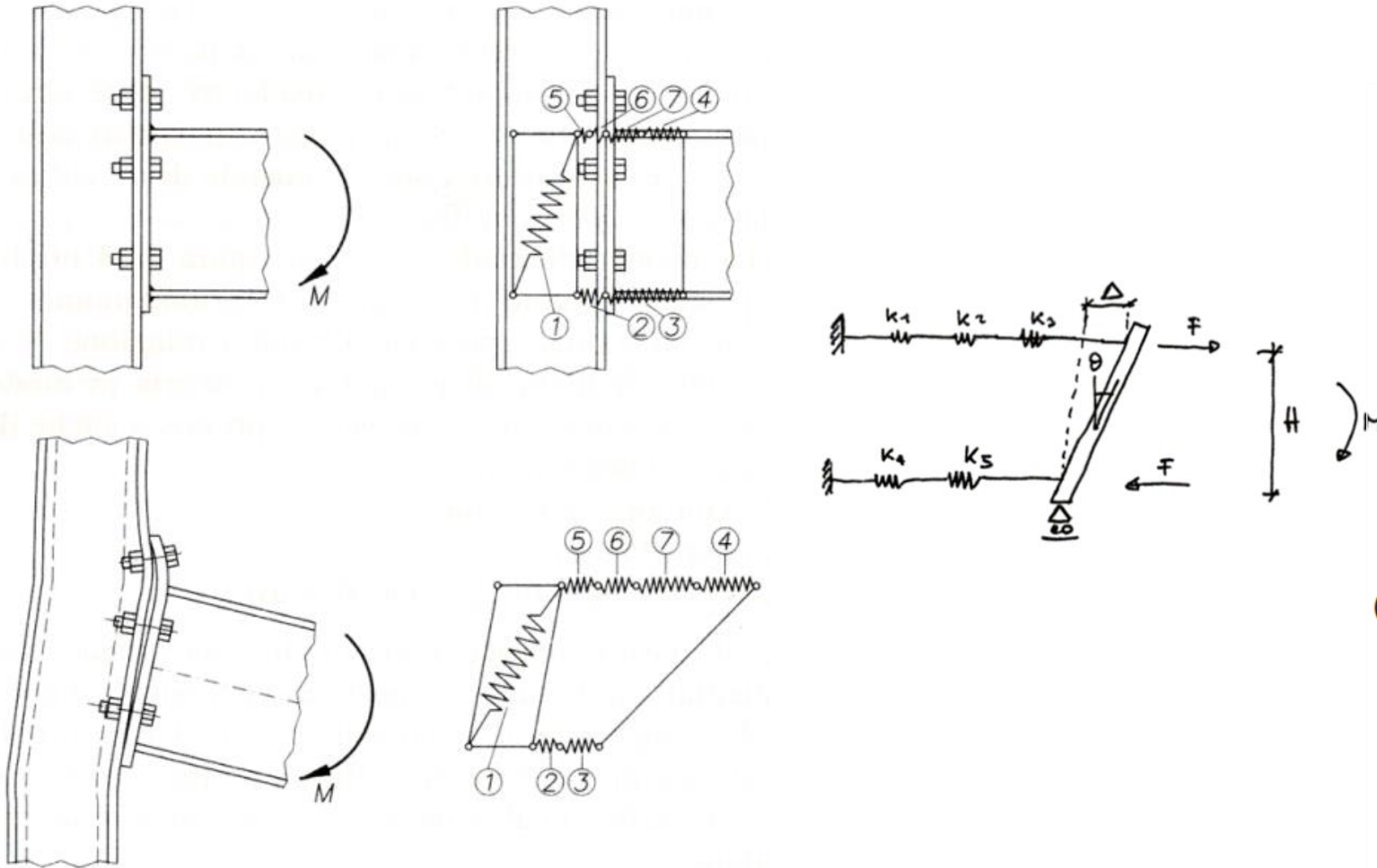


Figura 10.11: Legge componente

Seguirà quindi che la rotazione θ sarà data da (ricordando che in una molla $F = k \cdot x$):

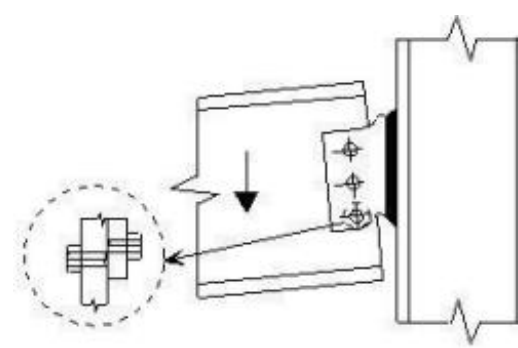
$$\theta = \frac{\Delta}{H} = \frac{1}{H} \left(\frac{F}{E \cdot k_1} + \frac{F}{E \cdot k_2} + \frac{F}{E \cdot k_3} + \frac{F}{E \cdot k_4} + \frac{F}{E \cdot k_5} \right) = \frac{F}{EH} \sum_{i=1}^5 \frac{1}{k_i}$$

Capacità ultima

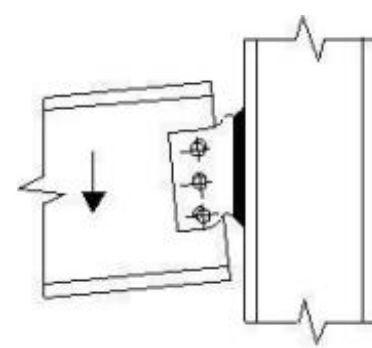
I dettagli costruttivi saranno progettati per garantire:

- **Adeguata capacità rotazionale**
- **Collasso duttile**

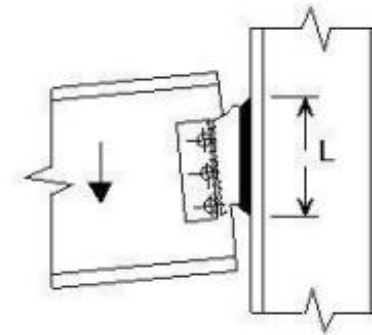
La rotazione ultima di un giunto è governata dalla **componente più debole**



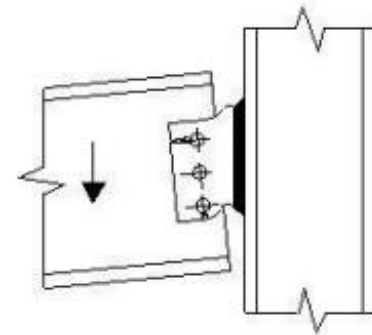
(a) Bolt fracture



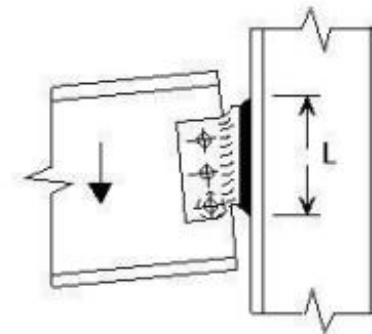
(b) Bearing yielding



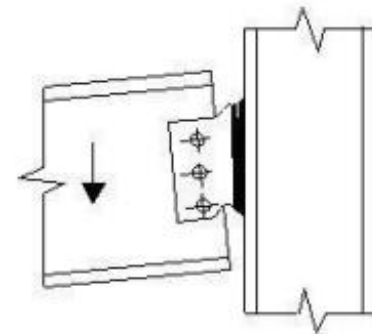
(c) Net-section fracture



(d) Edge distance fracture



(e) Plate yielding



(f) Weld fracture

Legame costitutivo di progetto

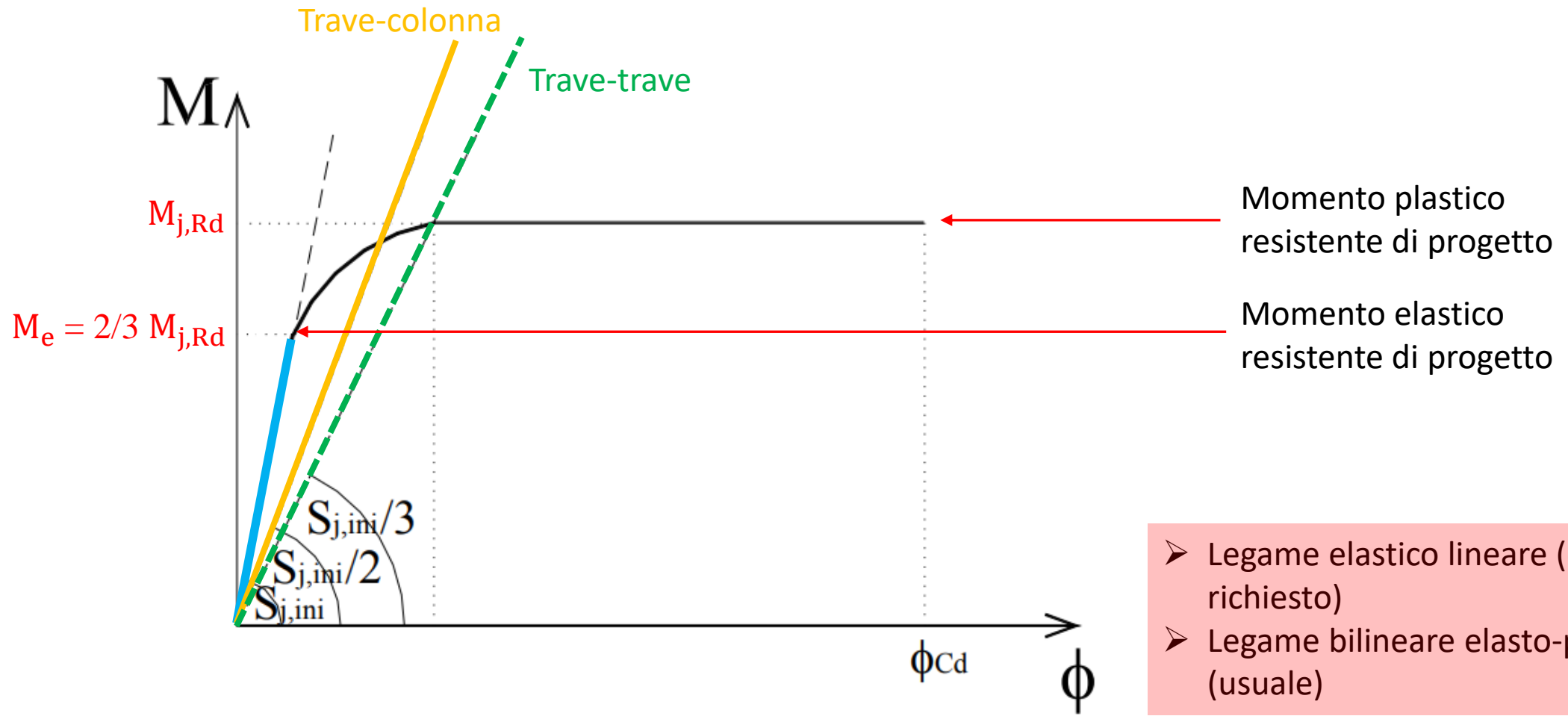
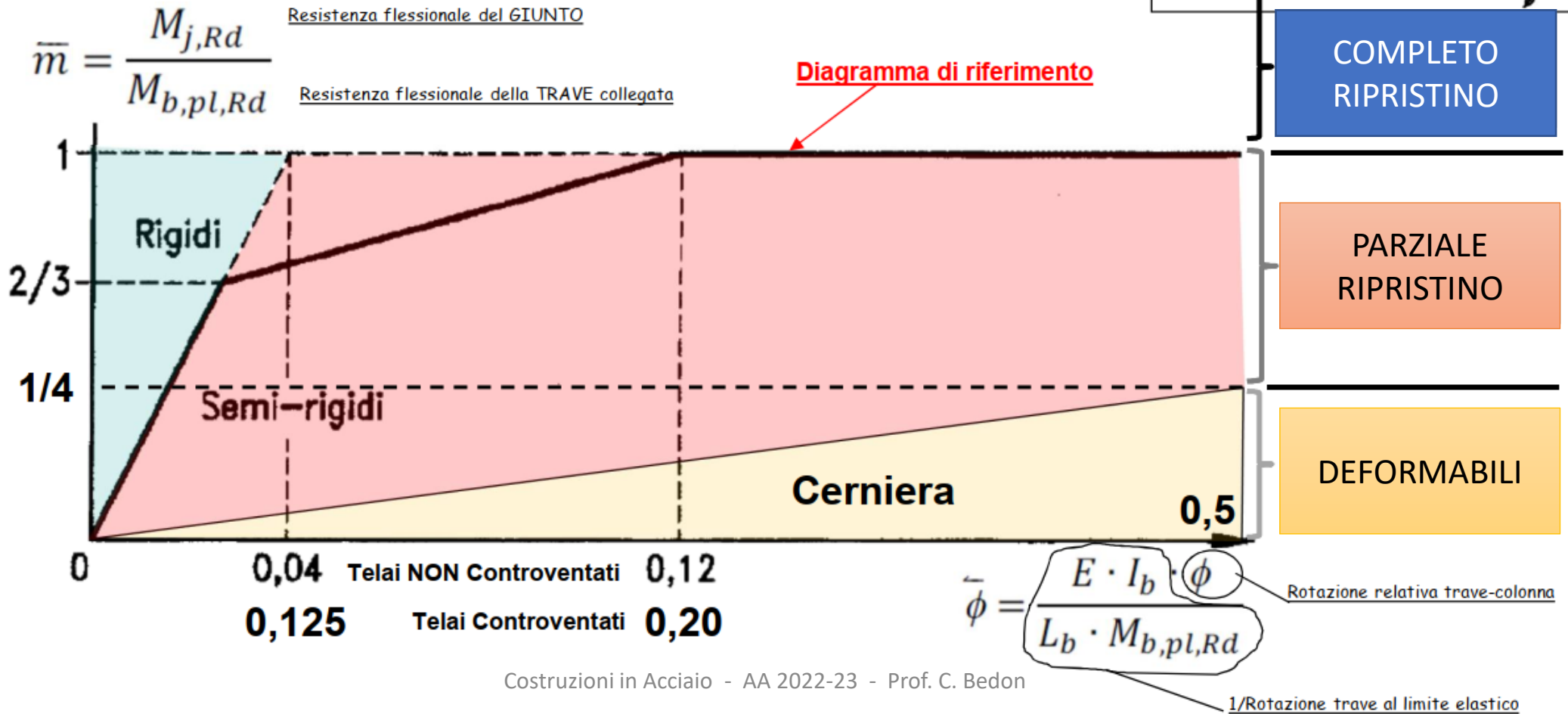
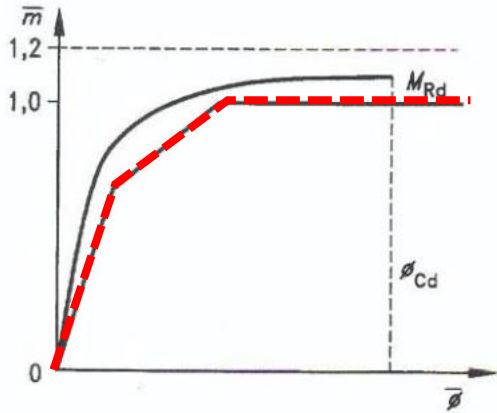


Diagramma momento-rotazione idealizzato

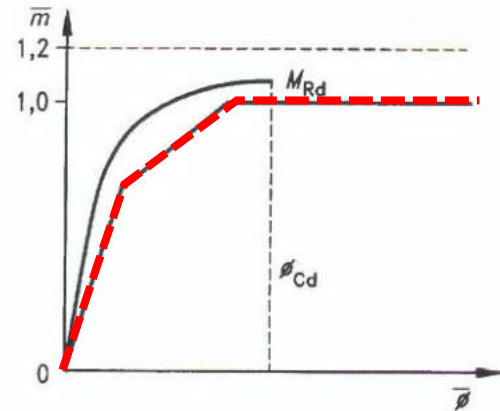
Domini di separazione



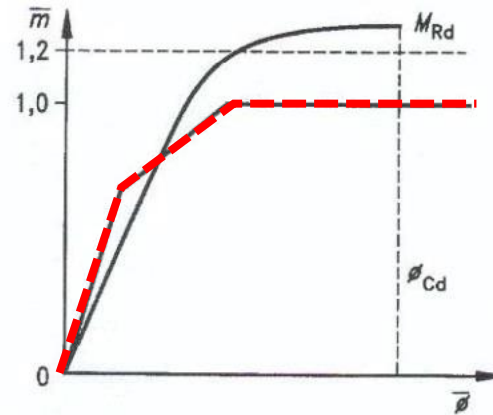
Domini di separazione - Esempi



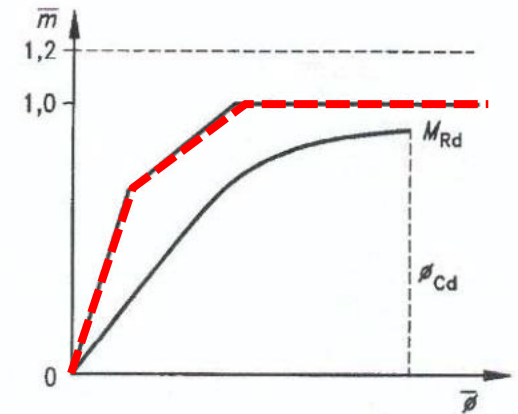
Rigido - Completo ripristino di resistenza
 ($M_{Rd} < 1,2M_{pl,Rd}$ verificare quindi se è sufficiente la capacità di rotazione ϕ_{Cd})



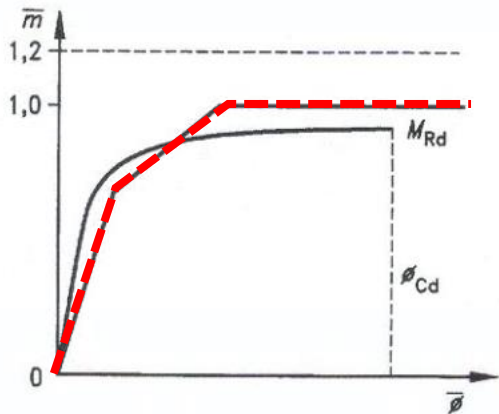
Rigido - Completo ripristino di resistenza
 ($M_{Rd} < 1,2M_{pl,Rd}$ verificare quindi se è sufficiente la capacità di rotazione ϕ_{Cd})



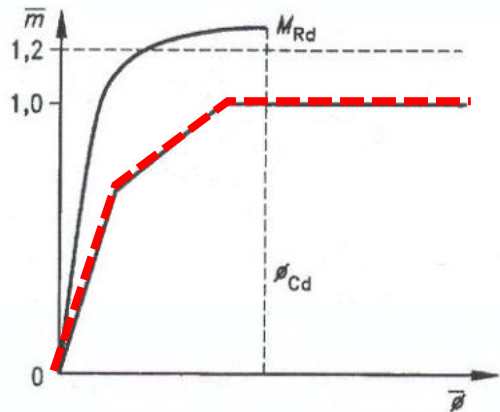
Semi-rigido - Completo ripristino di resistenza
 ($M_{Rd} > 1,2M_{pl,Rd}$)



Semi-rigido - Parziale ripristino di resistenza
 ($M_{Rd} < M_{pl,Rd}$)



Rigido - Parziale ripristino di resistenza
 ($M_{Rd} < M_{pl,Rd}$)



Rigido - Completo ripristino di resistenza
 ($M_{Rd} > 1,2M_{pl,Rd}$)

Fig. 6.9.9 - Esempi di classificazione di relazioni momento-rotazione per collegamenti trave-colonna

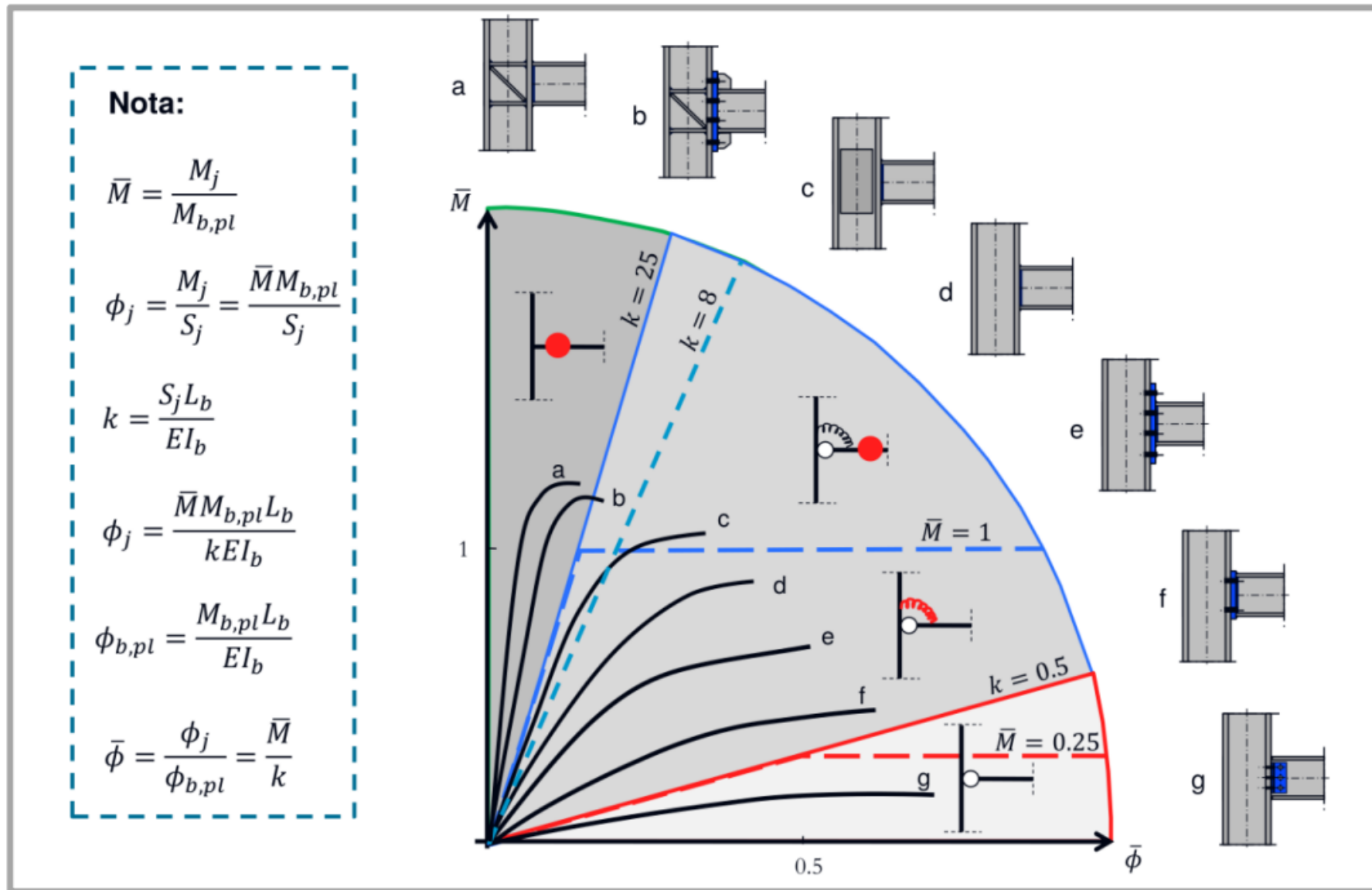
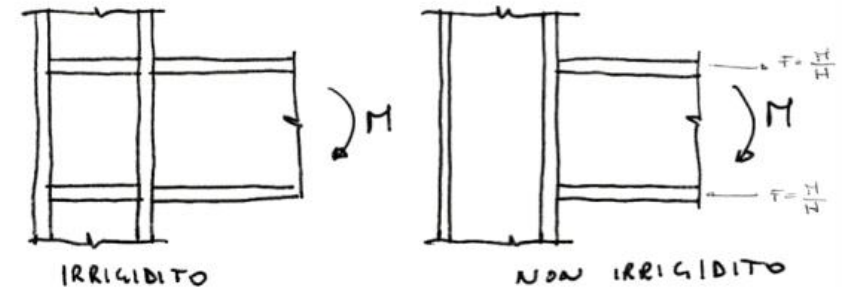


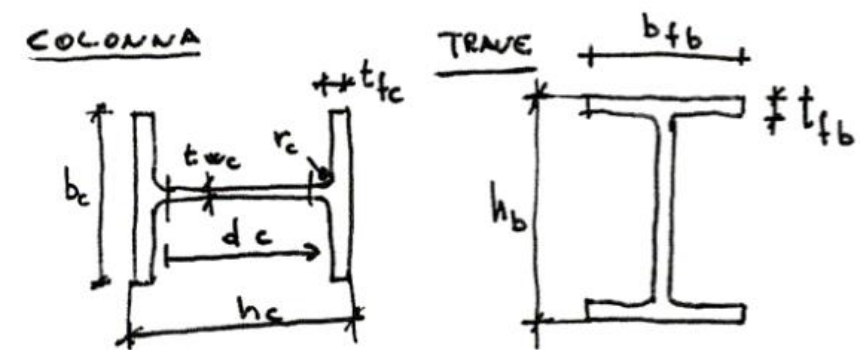
Fig.9 – Legame Momento-Rotazione per tipici esempi di nodi trave-colonna in acciaio

Giunto trave-colonna saldato

- Il metodo per componenti da buoni risultati per elementi non irrigiditi
- Per applicarlo è innanzitutto necessario definire la geometria della sezione (profili tipo IPE o HE)
- Secondo EC3 - Appendice J, è necessario calcolare le resistenze e rigidzze delle componenti, in particolare:
 - **(1) Zona tesa**
 - (a1) Resistenza ala colonna non irrigidita in zona tesa
 - (b1) Resistenza anima colonna non irrigidita in zona tesa
 - (c1) Resistenza colonna irrigidita in zona tesa
 - **(2) Zona compressa (con collasso per schacciamento o instabilità)**
 - (b2) Resistenza anima colonna non irrigidita in zona compressa
 - (c2) Resistenza anima colonna irrigidita in zona compressa
 - **(3) Zona a taglio**
 - (a3) Pannello d'anima di colonna non irrigidita



Collegamento irrigidito e non irrigidito



Geometria di profili standard

Giunto trave-colonna saldato – Zona tesa

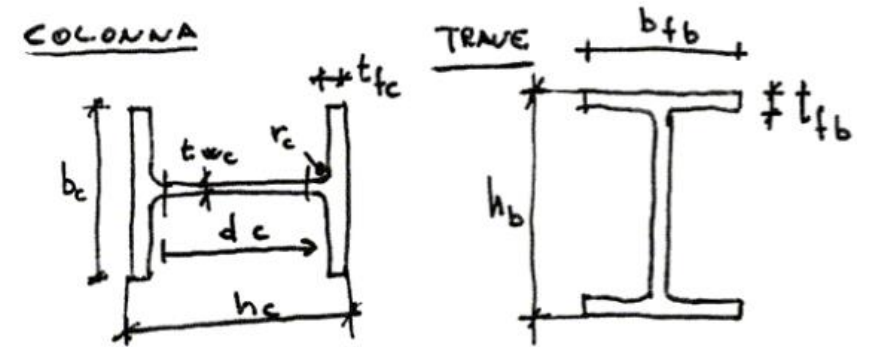
- (a1) Resistenza ala colonna non irrigidita in zona tesa

La resistenza viene definita attraverso la determinazione di una base efficace:

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{m0}} \cdot t_{fb} [t_{wc} + 2r_c + 7t_{fc}]$$

Se $F_{t,Rd} < 0.7 \cdot f_{yb} / \gamma_{m0} \cdot t_{fb} \cdot b_{fb}$ il giunto deve essere irrigidito. Le saldature che collegano l'ala della trave alla colonna devono poter assorbire lo sforzo di plasticizzazione

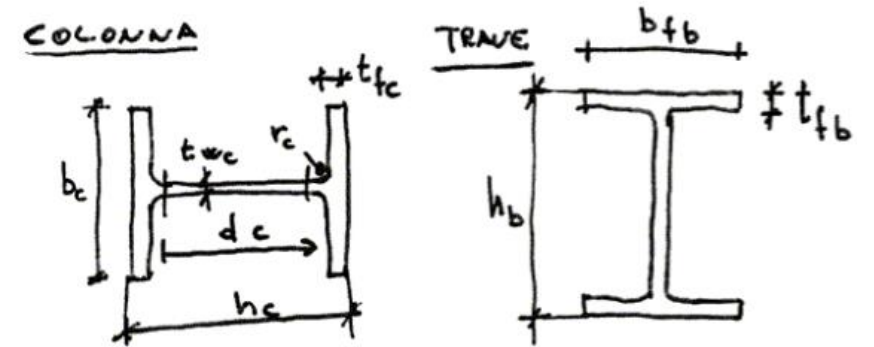
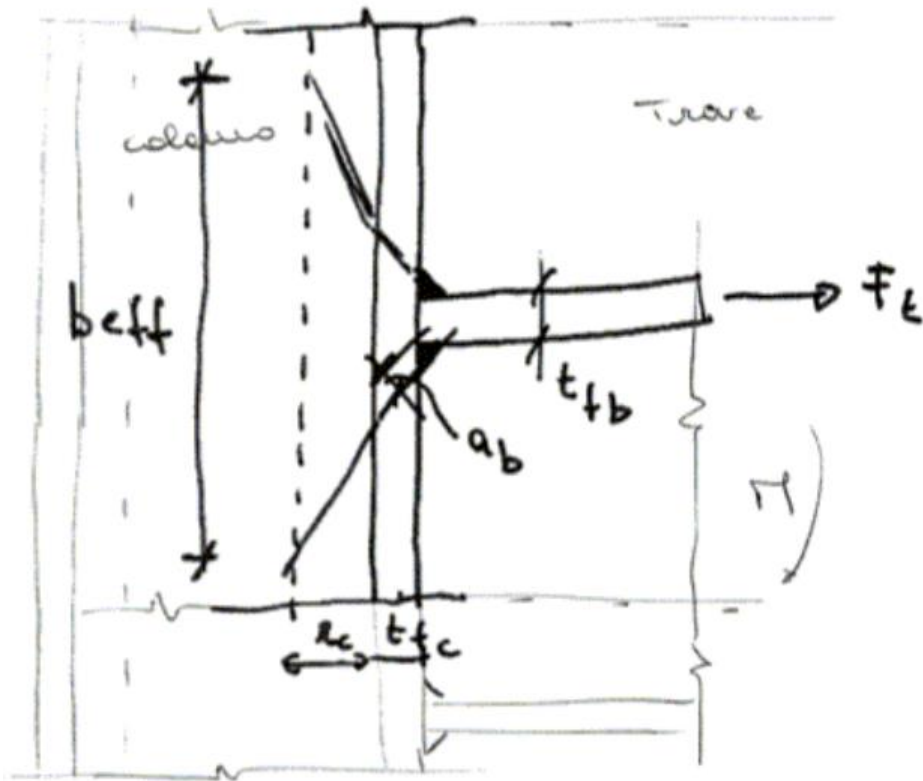
$$\frac{f_{yb} \cdot t_{fb} \cdot b_{fb}}{\gamma_{m0}}$$



Geometria di profili standard

Giunto trave-colonna saldato – Zona tesa

- (b1) Resistenza anima colonna non irrigidita in zona tesa



Geometria di profili standard

$$b_{eff} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + r_c)$$

$5(t_{fc} + e_c)$ corrisponde ad una diffusione degli sforzi di circa 60°

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yc}}{\gamma_{m0}} \cdot t_{wc} \cdot b_{eff}$$

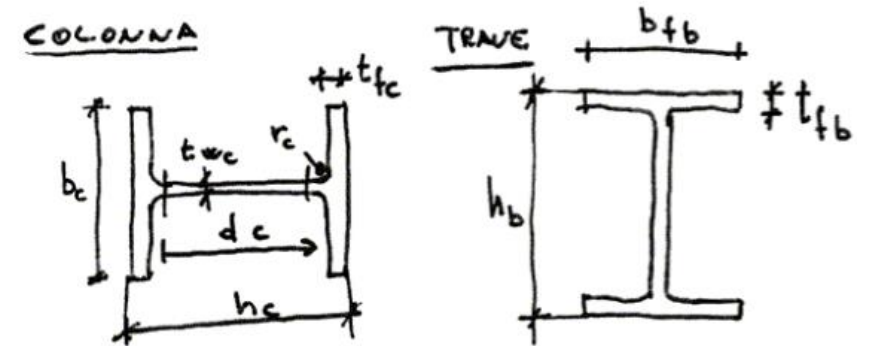
Giunto trave-colonna saldato – Zona tesa

- (c1) Resistenza colonna irrigidita in zona tesa

Se la colonna è irrigidita mediante un irrigidimento di spessore non minore all'ala della trave, la resistenza a trazione è pari alla resistenza dell'ala della trave:

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{m0}} \cdot t_{fb} \cdot b_{fb}$$

Una volta calcolato il valore minimo di $F_{t,Rd}$ conosciamo la resistenza in zona tesa.



Geometria di profili standard

Giunto trave-colonna saldato – Zona compressa

- (b2) Resistenza anima colonna non irrigidita in zona compressa

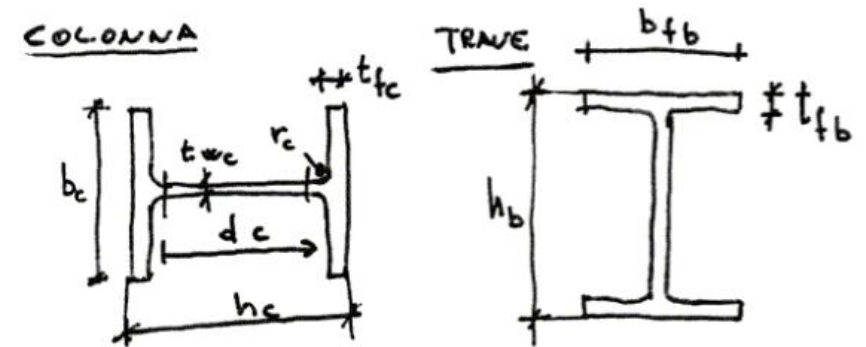
$$b_{eff} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + r_c)$$

come per la zona tesa.

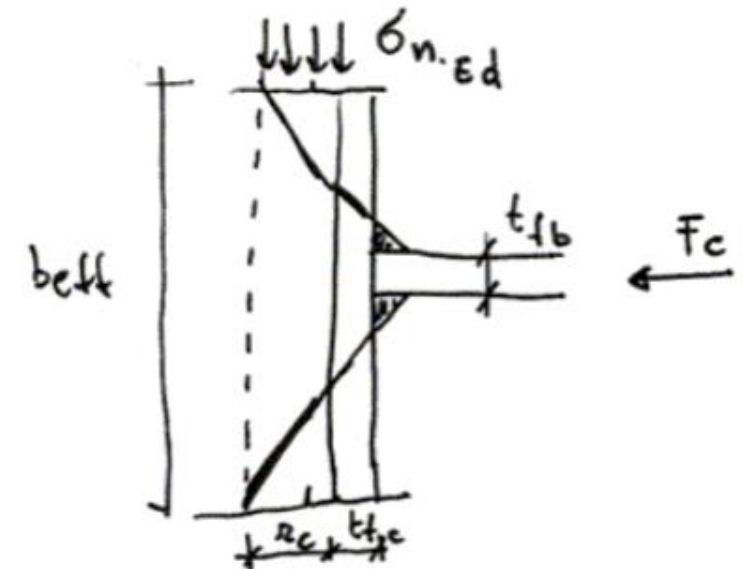
La resistenza allo schiacciamento è assunta pari a:

$$F_{c,Rd} = f_{y,c} \cdot t_{wc} \cdot \left[1.25 - 0.5\gamma_{m0} \cdot \frac{\sigma_{n,Ed}}{f_{yc}} \right] \cdot \frac{b_{eff}}{\gamma_{m0}}$$

con $F_{c,Rd} \leq f_{y,c} \cdot t_{wc} \cdot \frac{b_{eff}}{\gamma_{m0}}$ nel caso $\sigma_{n,Ed} = 0$, con $\sigma_{n,Ed} = 0$ pari alla tensione normale massima di compressione nell'anima della colonna, dovuta a sforzo normale e momento flettente di progetto. Il termine entro le parentesi quadre tiene conto dell'iterazione con lo sforzo normale: ho uno stato di sforzo di compressione bi-assiale, quindi plasticizza prima.



Geometria di profili standard

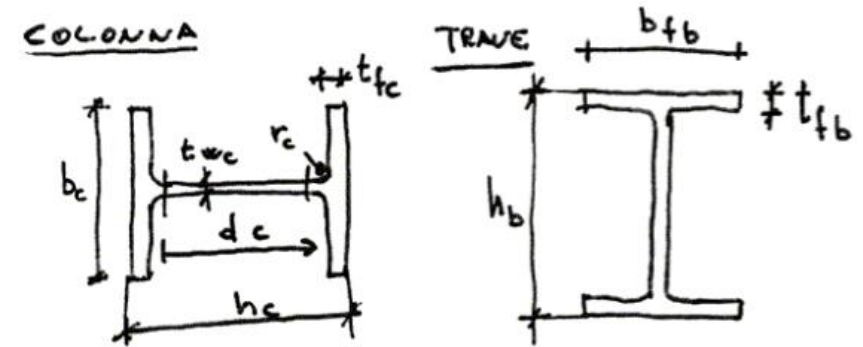


Giunto trave-colonna saldato – Zona compressa

- (c2) Resistenza anima colonna irrigidita in zona compressa

Come per la zona tesa, la resistenza a compressione è pari alla resistenza di progetto dell'ala della trave, purché lo spessori dell'irrigidimento sia almeno pari a t_{fb} .

N.B.: Deve essere verificato che l'anima della colonna non instabilizzi.



Geometria di profili standard



$$b_{eff} = H$$

(diffusione a 45°)

$$R_{b,Rd} = \frac{f_{yc} \cdot b_{eff} \cdot t_{wc}}{\gamma_{m1}}$$

Giunto trave-colonna saldato – Zona a taglio

- (a3) Pannello d'anima di colonna non irrigidita

La resistenza plastica di progetto del pannello d'anima risulta

$$V_{pl,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{yc} \cdot A_v}{\gamma_{m0} \sqrt{3}}$$

con

$$A_v = A_c - 2 \cdot b_c \cdot t_{fc} + (t_{wc} + 2 \cdot r_c) \cdot t_{fc}$$

area resistente a taglio.

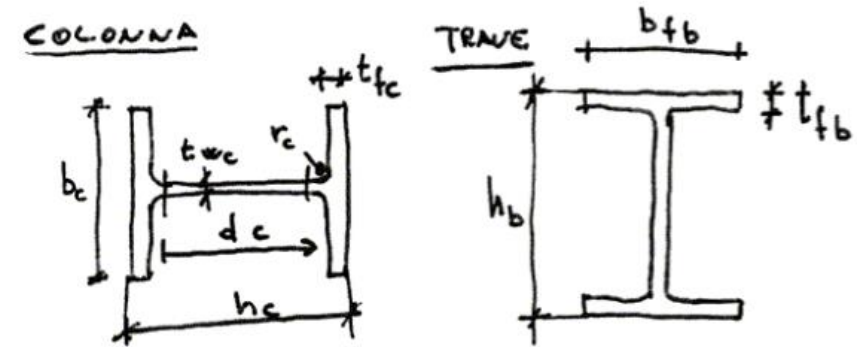
N.B.: per aumentare la resistenza a taglio del pannello d'anima può essere saldato un piatto su un lato dell'anima. In questo caso lo spessore totale dell'anima sarà pari allo spessore dell'anima più metà spessore del piatto di irrigidimento.

Quando vengono usati irrigidimenti diagonali per aumentare la resistenza a taglio, questi devono essere progettati per resistere alle forze di trazione e compressione trasmesse alla colonna dalle ali della trave.

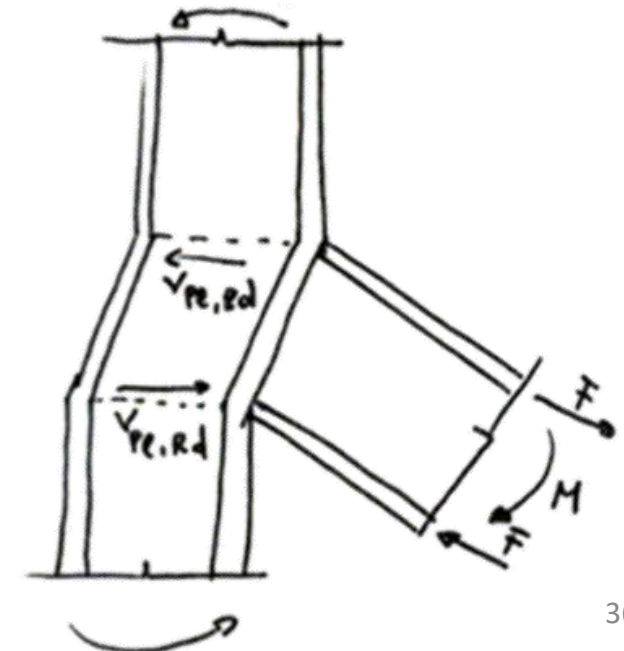
Le saldature fra irrigidimenti e ali colonna devono essere progettate in modo da resistere alle forze negli irrigidimenti.

Posto $H = h_b - t_{fb}$, definito braccio della coppia interna, si ha che:

$$M_{Rd} = \min(F_{Rt}; F_{Rc}; V_{pl,Rd}) \cdot H$$



Geometria di profili standard



Giunto trave-colonna saldato

Rigidezza rotazionale

Per questo tipo di giunto l'EC3 propone una formulazione semplificata per il calcolo della rigidezza secante S_J del giunto:

$$S_J = \frac{E \cdot H^2 \cdot t_{wc}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{k_i} \left[\frac{F_i}{F_{i,Rd}} \right]^2}$$

con

F_i Forza nel componente i del collegamento dovuto ad M , ma non minore di $F_{i,Rd}/1.5$;

$F_{i,Rd}$ Resistenza di progetto del componente i del collegamento;

k_i 0.24 per anima colonna soggetta a taglio;
0.8 anima colonna zona tesa;
0.8 anima colonna con a compressa;

N.B.: se il generico componente è irrigidito, si può porre $k_i = \infty$; non si considera la deformabilità dell'ala della colonna in zona tesa, ma solo la sua resistenza; un collegamento saldato, irrigidito sia in zona tesa che in zona compressa può essere considerato come rigido.

Capacità rotazionale

Si può assumere che un collegamento trave-colonna saldato non irrigidito, abbia una capacità di rotazione $\phi_{CD} = 0.015 \text{ rad}$ (in realtà può ruotare anche fino a 0.030 rad).

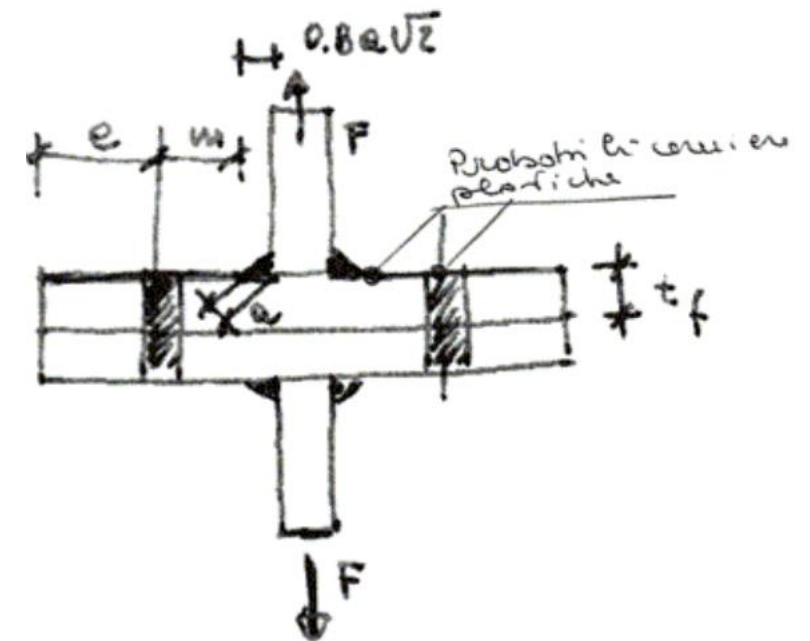
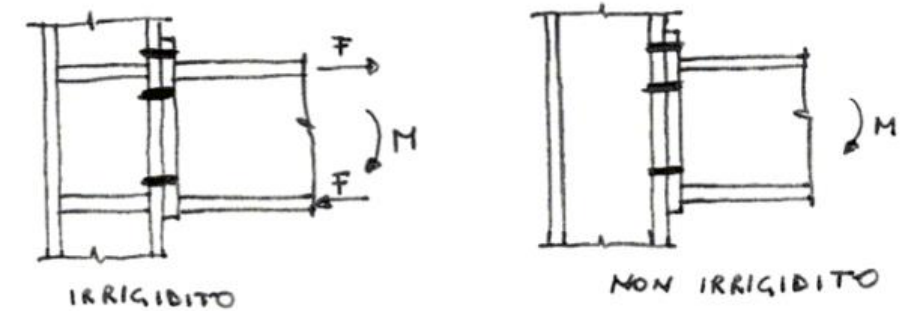
Si può assumere che un collegamento trave-colonna saldato a completo ripristino abbia una adeguata capacità di rotazione per l'analisi plastica; questa capacità rotazionale è assicurata se lo stesso giunto è governato dalla resistenza della zona di taglio.

Inoltre:

- se la colonna è irrigidita in zona tesa e in zona compressa, allora ha una capacità di rotazione per l'analisi plastica anche se non è a completo ripristino;
- se la colonna è irrigidita in zona tesa e non in zona compressa, allora ha una capacità di rotazione per l'analisi plastica;
- se la colonna è irrigidita in zona compressa e non in zona tesa, quando la resistenza non è governata dalla zona a taglio, $\phi_{CD} = 0.025 h_c/h_b$ con h_c altezza della colonna e h_b altezza della trave;

Giunto trave-colonna bullonato

- Le ipotesi che si assumono per questo calcolo sono di avere due bulloni per fila e che la flangia non sia irrigidita
- Nello studio di questo tipo di giunto un ruolo importante viene svolto dagli elementi a t equivalenti (t -stub)
- Il comportamento di questo elemento è governato da:
 - resistenza-rigidezza ala
 - resistenza dei bulloni
 - resistenza anima
 - resistenza saldatura anima-ala
- Sono tre i possibili meccanismi di collasso di un elemento t -stub:
 - Modo 1** : Meccanismo plastico completo ala (cerniera plastica) **FLANGIA (FLESSIONE)**
 - Modo 2** : Rottura bulloni con snervamento ala **COMBINATO**
 - Modo 3** : Rottura bulloni **BULLONI (TRAZIONE)**



Giunto trave-colonna bullonato

Per modellare il comportamento in termini di legame momento flettente-rotazione dei nodi trave-colonna considerati semi-rigidi si può ricorrere al metodo delle componenti attraverso l'introduzione di un cosiddetto "T-stub" equivalente. L'equivalenza è stabilita mediante la definizione di una lunghezza "efficace" o lunghezza "effettiva" l_{eff} .

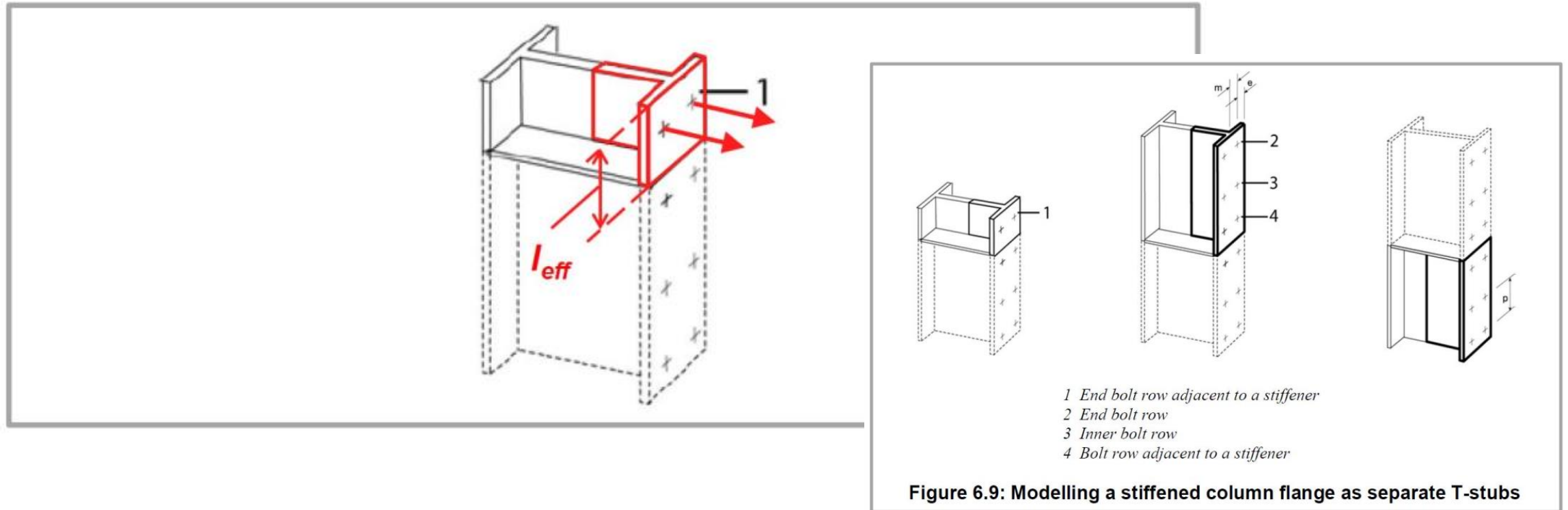


Fig.15 – Modellazione dell'ala di una colonna rinforzata come T-stub separati

Giunto trave-colonna bullonato

Indicato con:

$$M_{pl,Rd} = \frac{t_f^2 \cdot \sigma_y}{4 \cdot \gamma_{m0}} \cdot I_{eff}$$

il momento plastico dell'ala; $B_{t,Rd}$ resistenza a rottura del bullone e I_{eff} la larghezza efficace del t-stub (di difficile valutazione), avremo:

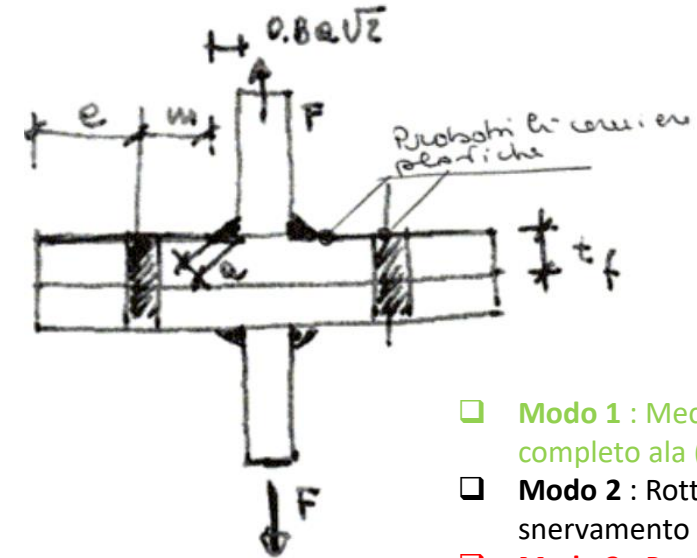
$$\text{Modo 1} : F_{t,Rd} = \frac{4M_{pl,Rd}}{m}$$

$$\text{Modo 2} : F_{t,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd} + e \cdot \sum B_{t,Rd}}{e + m}$$

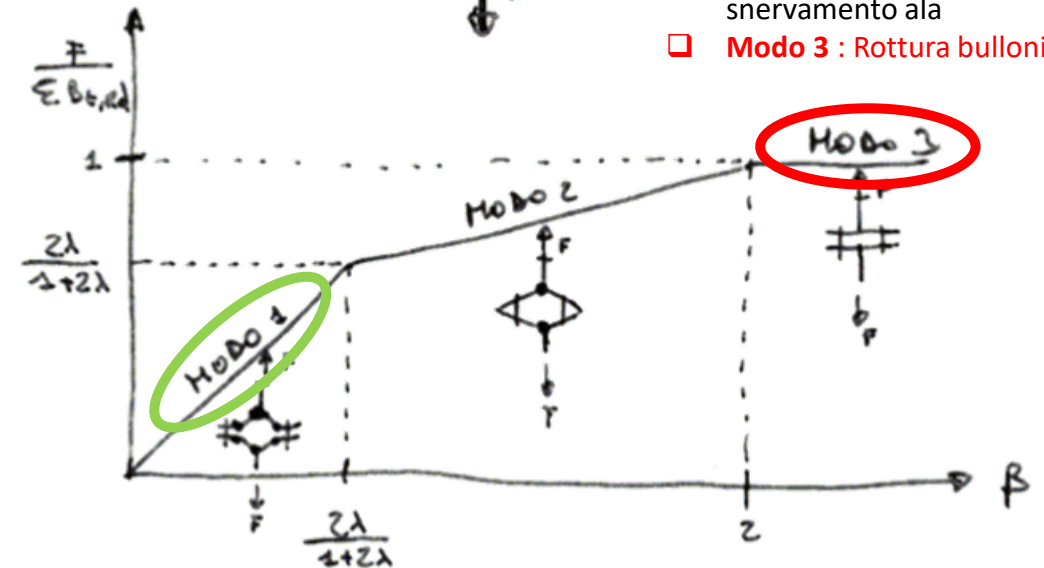
$$\text{Modo 3} : F_{t,Rd} = \sum B_{t,Rd}$$

con la sommatoria estesa a tutti i bulloni del t-stub. Ponendo

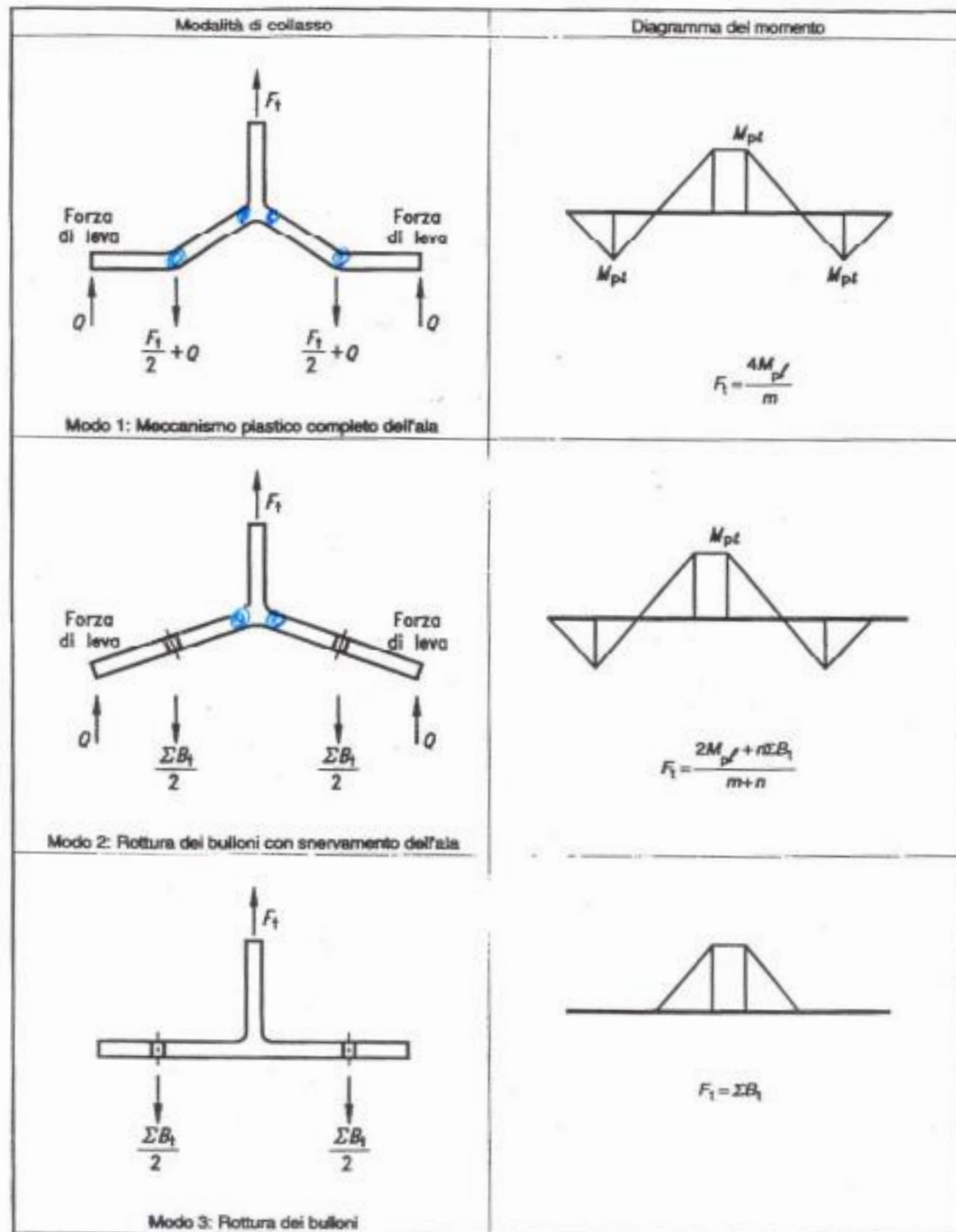
$$\beta = \frac{4M_{pl,Rd}}{e \cdot \sum B_{t,Rd}} \quad e \quad \lambda = \frac{e}{m}$$



- Modo 1** : Meccanismo plastico completo ala (cerniera plastica)
- Modo 2** : Rottura bulloni con snervamento ala
- Modo 3** : Rottura bulloni



T-stub



UNI ENV 1993-1-1 pag.283

Fig. J 3.2 – Modalità di collasso di un elemento a T

- 1) Flessione delle ali
- 2) Combinato
- 3) Trazione nei bulloni

T-stub

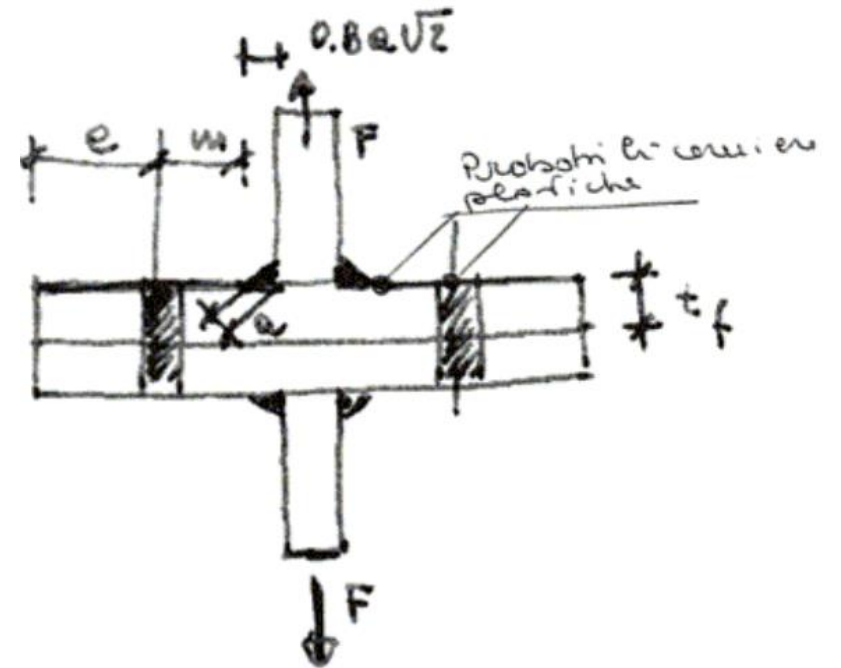
Resistenza zona di trazione

I meccanismi di tipo *t-stub* riguardano le seguenti zone in trazione:

- ala colonna;
- flangia.

L'ala della colonna (non irrigidita) può avere tre diversi tipi di meccanismi di collasso:

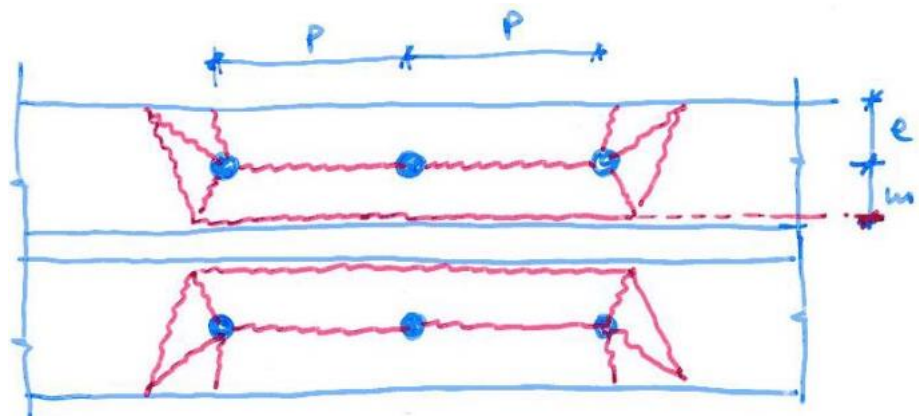
- a1) Meccanismo globale per il gruppo di bulloni
- a2) Meccanismi separati per ogni bullone
- a3) Meccanismi per imbutimento



T-stub

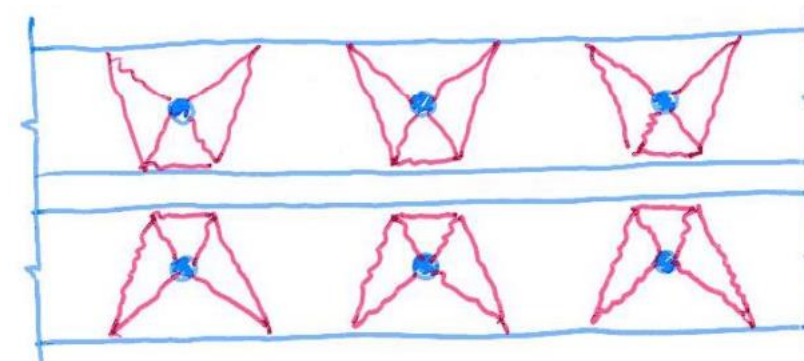
- a1) Meccanismo globale per il gruppo di bulloni

Meccanismo «effetto gruppo»



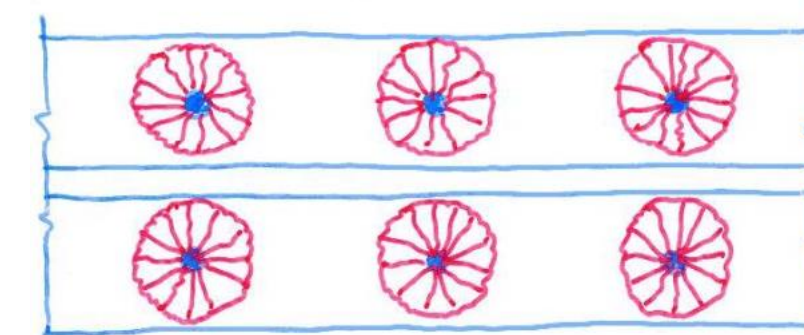
- a2) Meccanismi separati per ogni bullone

Meccanismo «non-circolare»



- a3) Meccanismi per imbutimento

Meccanismo «circolare»



T-stub

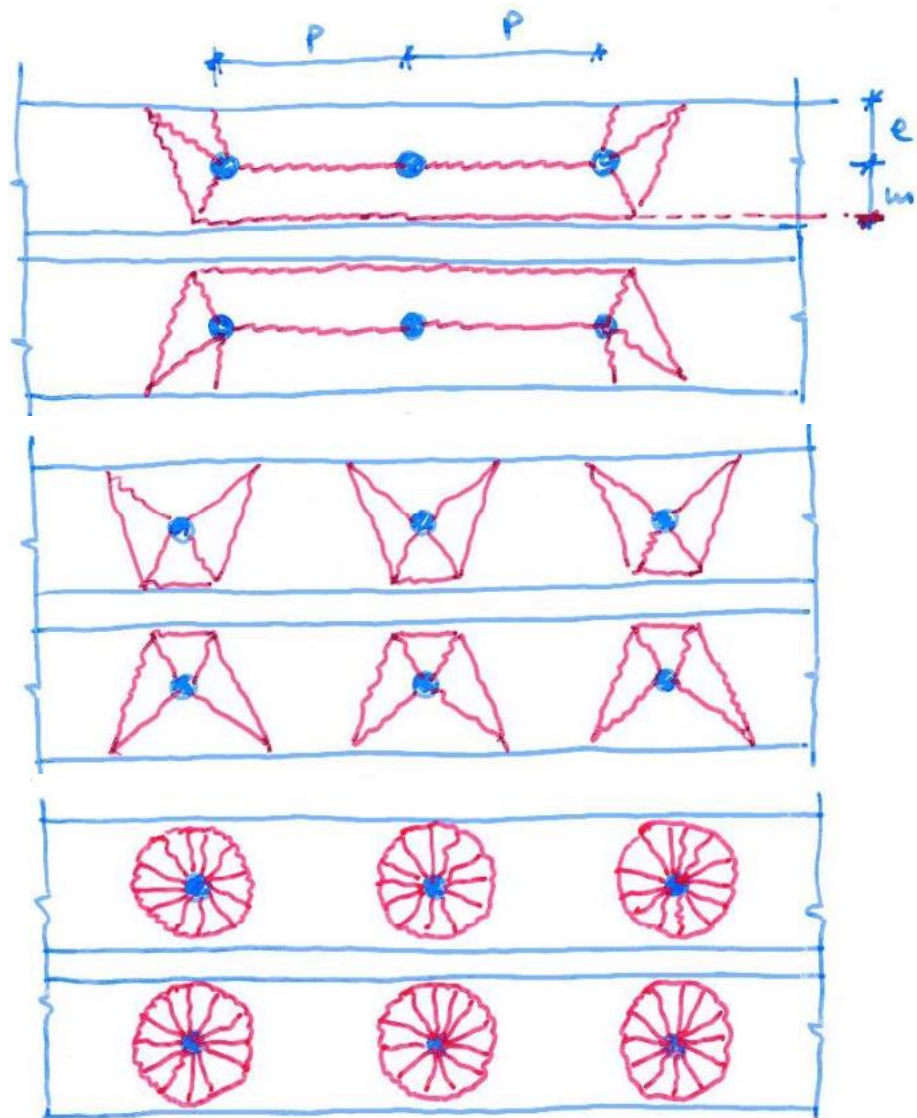
L'ala della colonna a trazione si deve considerare come una serie di t-stub con una lunghezza totale uguale alla lunghezza totale efficace Σl_{eff} . Per ogni riga di bulloni la l_{eff} deve essere la minore tra i tre meccanismi visti in precedenza.

Bulloni intermedi:

- $l_{eff} = p$ per il meccanismo **a1**;
- $l_{eff} = 4m + 1.25e$ per il meccanismo **a2**;
- $l_{eff} = 2\pi m$ per il meccanismo **a3**;

Bulloni di estremità:

- $l_{eff} = 0.5p + 2m + 0.625e$ per il meccanismo **a1**;
- $l_{eff} = 4m + 1.25e$ per il meccanismo **a2**;
- $l_{eff} = 2\pi m$ per il meccanismo **a3**;

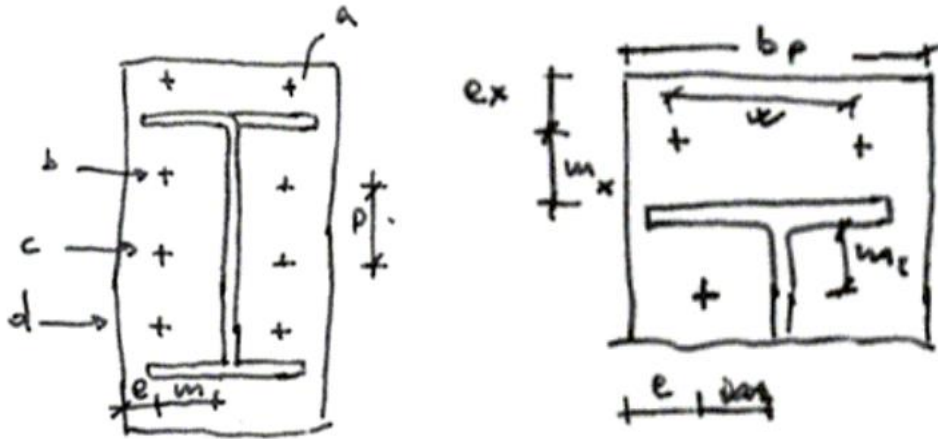


Nota: il meccanismo di collasso e la resistenza massima di progetto devono essere determinate considerando tutte le file di bulloni nella zona di trazione come un unico gruppo che agisca tutto insieme in un singolo elemento *t-stub* equivalente

T-stub – Calcolo contributo della flangia

Zona di trazione

- Il contributo della **flangia** si considera schematizzando la stessa in una serie di *t-stub* equivalenti
- La lunghezza efficace di questi (diversa di volta in volta) andrà valutata separatamente a seconda della posizione dei bulloni



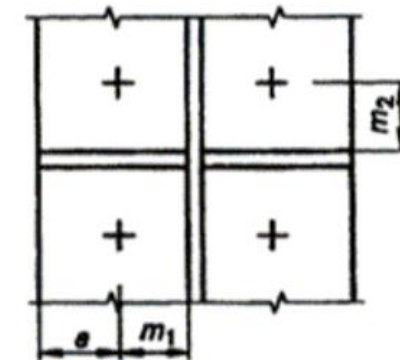
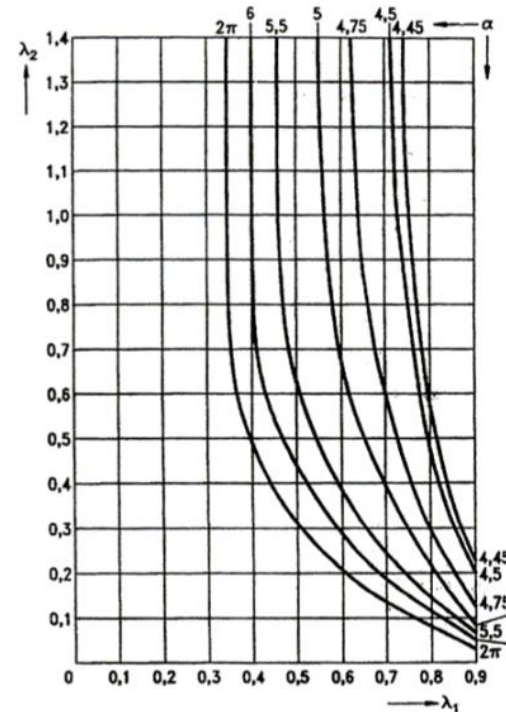
(a) Per i **bulloni esterni all'ala** della trave in trazione:

$$l_{eff,a} = \min \begin{cases} 0.5 \cdot b_p \\ -0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x \end{cases}$$

(b) Per la **prima riga di bulloni interni** all'ala della trave in trazione:

$$l_{eff,b} = \min \begin{cases} \alpha \cdot m \\ 2\pi m \end{cases} \quad \alpha = f(\lambda_1, \lambda_2)$$

$$\text{con } \lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + e} \text{ e } \lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e}$$



Un valore di α pari a 2π corrisponde al meccanismo di imbutimento

T-stub – Calcolo contributo della flangia

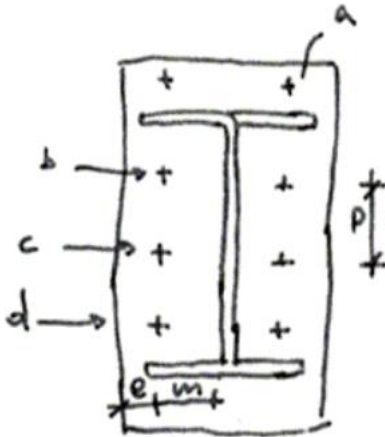
Zona di trazione

(c) Per gli altri bulloni, **se interni alla trave ed intermedi**: Per la **prima riga di bulloni interni** all'ala della trave in trazione:

$$l_{eff,c} = \min \begin{cases} p & (\text{passo bulloni}) \\ 4m + 1.25e \\ 2\pi m \end{cases}$$

(d) I bulloni **interni alla trave, ma di estremità**:

$$l_{eff,d} = \min \begin{cases} 0.5p + 2m + 0.625e \\ 4m + 1.25e \\ 2\pi m \end{cases}$$



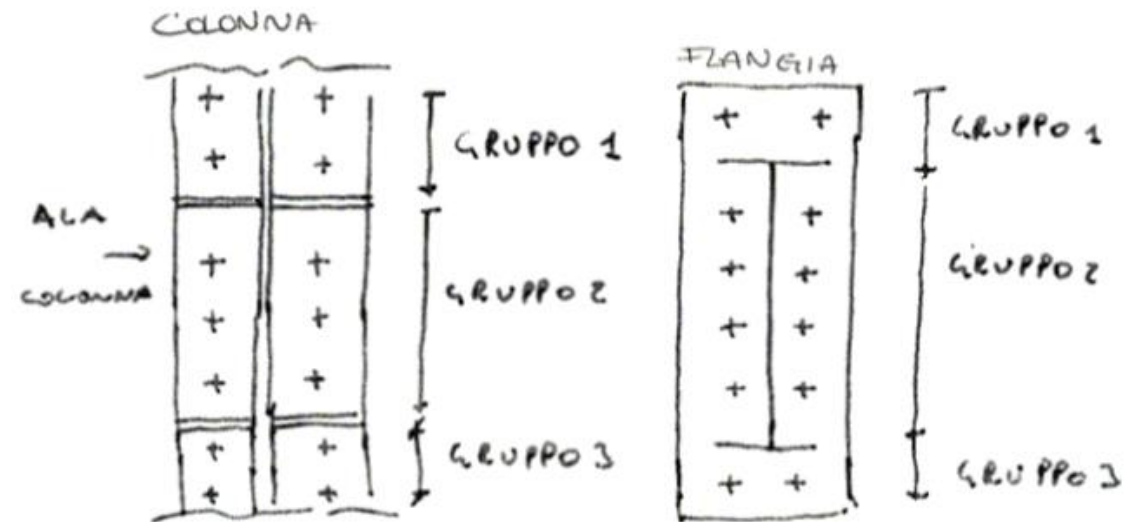
Una volta individuati i t-stub, bisogna valutare la loro efficacia adottando un criterio **plastico** (nel caso di collasso secondo modalità 1 e 2 del grafico di figura 10.14) o **elastico** (proporzionale alla distanza dal centro di rotazione, vedi modo 3 del grafico di figura 10.14). Si preferisce la scelta di un criterio plastico per la determinazione del momento resistente del giunto. Questo criterio si basa sulla scelta di t-stub con comportamento duttile.

- Una volta individuati i *t-stub*, bisogna valutare la loro efficacia adottando un criterio **plastico** (nel caso di collasso secondo modalità 1 e 2) o **elastico** (proporzionale alla distanza dal centro di rotazione)
- Si preferisce la scelta di un criterio plastico per la determinazione del momento resistente del giunto
- Questo criterio si basa sulla scelta di *t-stub* con comportamento duttile

T-stub – Calcolo contributo della flangia

Zona di trazione

- In presenza di un irrigidimento o dell'ala della trave, si devono distinguere i gruppi di bulloni come appartenenti a *t-stub* separati
- Per ogni gruppo ci deve essere equilibrio tra le resistenze di progetto dell'ala della colonna e della flangia
- Ciò implica che non tutti i bulloni di un gruppo partecipano alla resistenza del gruppo stesso ma solo quelli che minimizzano la differenza di resistenza tra i *t-stub* dell'ala della colonna e i *t-stub* della flangia (punto J.3.3)



T-stub – Calcolo contributo della flangia

Procedura operativa – «criterio plastico»

- (a) Si deve calcolare la resistenza efficace di ogni fila di bulloni in base alla resistenza del t-stub dell'ala o della flangia (nel caso di gruppi si deve determinare la resistenza efficace minimizzando la differenza tra resistenza gruppo ala e flangia; ciò implica che per le singole file di bulloni del gruppo si può calcolare la resistenza ridistribuendo al più la resistenza della prima fila di bulloni omessa).
- (b) Se il valore di progetto della resistenza efficace per una qualsiasi fila di bulloni supera $1.8 \cdot B_{t,Rd}$ (con $B_{t,Rd}$ resistenza del bullone) si deve cambiare tipo di collegamento (ad es. usare bulloni più resistenti) in modo che il t-stub sia di tipo duttile.
- Nota la resistenza efficace della singola fila di bulloni $F_{t,i,Rd}$ si calcoli la $\sum_i F_{t,i,Rd}$ su tutte le file di bulloni tesi.

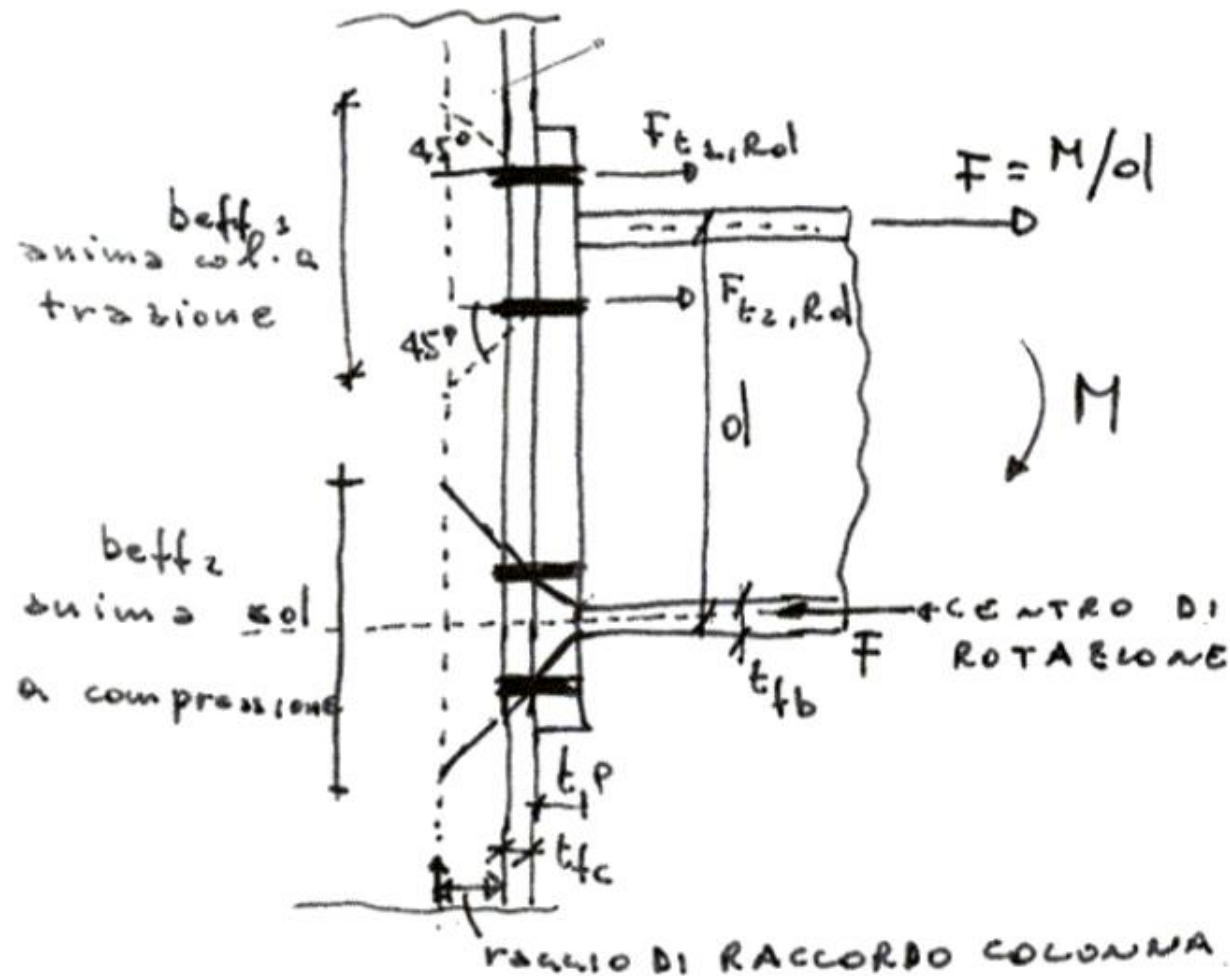
Nota: questo metodo, noto anche come «criterio plastico», non è applicabile per t-stub soggetti a collasso fragile (modo 3)

- si determini R_{min} come valore minimo tra:
 - resistenza dell'anima della colonna nella zona di trazione;
 - resistenza dell'anima della colonna a compressione; **(come giunto saldato)**
 - resistenza dell'anima della colonna a taglio. **(come giunto saldato)**
- Se $\sum_i F_{t,i,Rd} > R_{min}$ (con i numero di t-stub) si devono ridurre le file o righe di bulloni nella zona di trazione in modo da avere $\sum_i F_{t,i,Rd} < R_{min}$ (con R_{min} ricalcolata in base al passo 3).
- una volta determinato il numero di righe che effettivamente collabora si può calcolare il momento resistente

$$M_{Rd} = \sum_i F_{t,i,Rd} \cdot h_i$$

con h_i distanza della riga i -esima di bulloni dal centro di resistenza della zona di compressione.

Esempio



Per quanto riguarda la $b_{eff,1}$ è possibile ipotizzare una diffusione a 45° oppure la somma della larghezza efficace dei due t-stub. Nella zona a compressione

$$b_{eff,2} = t_{fb} + 2t_p + 5(t_{fc} + r_c)$$

Risulta evidente che affinché entrambe le file siano efficaci non si deve avere un prematuro cedimento dell'anima della colonna:

- a trazione;
- a compressione;
- a taglio.

La bullonatura inferiore, oltre che collaborare a taglio, lavora allo stesso modo della bullonatura superiore nel caso di inversione del momento.

Esempio – Rigidezza alla rotazione

L'EC3 propone la seguente relazione per la rigidezza secante:

$$S_J = \frac{E \cdot h_1^2 \cdot t_{wc}}{\sum_i \frac{\mu_i}{k_i} \left[\frac{F_i}{F_{i,Rd}} \right]^2}$$

con h_1 distanza della prima riga di bulloni sotto l'ala tesa della trave dal centro di compressione.

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & \text{per } i = 1, 2, 3 \\ h_1 \frac{F_{1,Rd}}{M_{Rd}} & \text{per } i = 4, 5, 6 \end{cases}$$

con:

F_i forza nel componente i dovuta al momento M con $M \leq M_{Rd}$

$F_{i,Rd}$ resistenza di progetto della componente i del collegamento

k_i coefficiente di rigidezza della componente i

molla 1 anima colonna a taglio $k_1 = 0.24$;

molla 2 anima colonna a trazione $k_2 = 0.8$;

molla 3 anima colonna a compressione $k_3 = 0.8$;

molla 4 ala colonna a trazione $k_4 = \frac{t_{f,c}^3}{4m^2 t_{wc}}$;

molla 5 bulloni a trazione $k_5 = \frac{2A_S}{l_b t_{wc}}$ con

A_S area a trazione bullone;

l_b lunghezza bullone (da metà spessore dado a metà spessore testa);

t_{wc} spessore anima colonna;

molla 6 flangia trave a trazione $k_6 = \frac{t_p^3}{12 \cdot \lambda_2 m^2 t_{wc}}$ con

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e} \text{ valido per flangia non estesa}$$

Nel caso di flangia estesa si deve assumere h_1 con riferimento alla fila di bulloni esterni, inoltre

$$k_6 = \frac{t_e^3}{4 \cdot m_x^2 t_{wc}}$$

Si può assumere che un collegamento bullonato con flangia di estremità sia un collegamento rigido se:

- La colonna ha irrigidimenti d'anima in zona tesa e compressa;
- Il momento resistente è determinato secondo l'approccio elastico (punto J.3.2).

In presenza di irrigidimenti d'anima si può porre:

$$k_2 = k_3 = \infty \quad k_4 = \frac{t_{f,c}^3}{12 \cdot \lambda_2 m^2 t_{wc}}$$

e

$$k_4 > \frac{t_{f,c}^3}{4 \cdot m^2 t_{wc}}$$

Esempio – Capacità rotazionale

Si può assumere che un collegamento trave colonna, nel quale la resistenza al momento sia governata dal pannello d'anima a taglio, abbia adeguata capacità rotazionale per effettuare un'analisi plastica.

Un collegamento bullonato, nel quale la resistenza al momento è governata dalla resistenza della zona tesa a trazione, ha adeguata capacità di rotazione per effettuare un'analisi plastica se per ogni fila di bulloni coinvolta, almeno un componente (ala-colonna, flangia) sia caratterizzato da un t-stub con modo di collasso 1. Ovvero un t-stub per cui sia

$$\beta \leq \frac{2\lambda}{1+2\lambda} \quad ;$$

se la resistenza è associata al modo di collasso 2, ovvero se

$$\frac{2\lambda}{1+2\lambda} < \beta < 2$$

allora

$$\phi_{cd} = \frac{10.6 - 4\beta_{min}}{1.3 \cdot h_1}$$

con $\beta_{min} = \beta$ per la componente con il minimo $\frac{F_{t,Rd}}{\sum B_{t,Rd}}$.

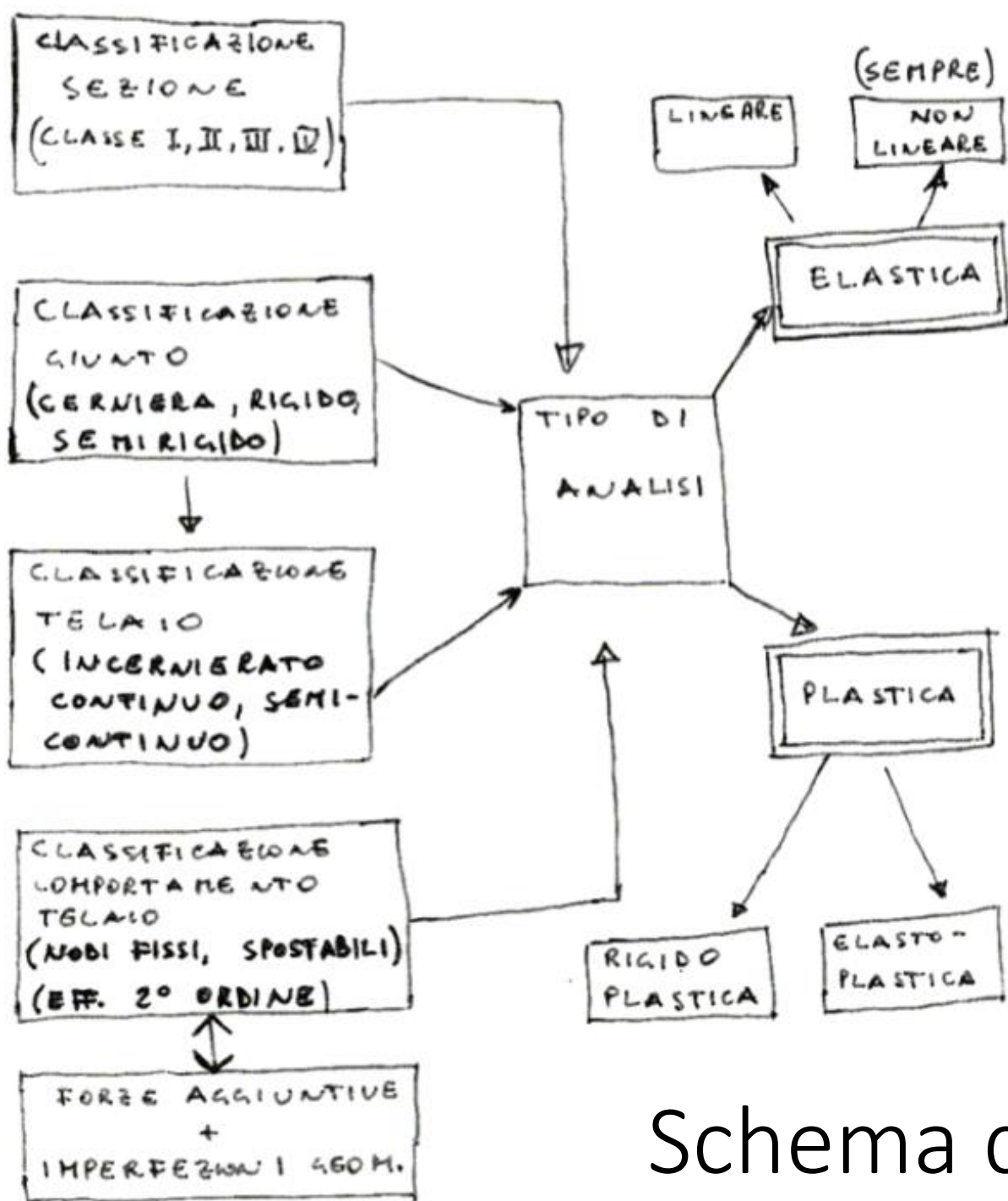
Quanto detto sopra vale anche per la flangia estesa.

Caratteristiche meccaniche		
	Tensioni di snervamento	Tensioni di rottura
Anima della trave	f_{ywb}	-
Ala della trave	f_{yfb}	-
Anima della colonna	f_{ywc}	-
Ala della colonna	f_{yfc}	f_{ultc}
Flangia	f_{yp}	f_{up}
Bulloni	-	f_{ub}
Per profili laminati a caldo : $f_{ywc} = f_{yfc}$ e $f_{ywb} = f_{yfb}$		
Caratteristiche geometriche		
Collegamento		
Colonna		
		$s = r_z$ per un profilo laminato $s = \sqrt{2} a_c$ per un profilo saldato
$A_{vc} = A_c - 2 b_c t_{fc} + (t_{wc} + 2 r_c) t_{fc}$ con A_c = area della sezione della colonna		$A_{vc} = (h_c - 2 t_{fc}) t_{wc}$
Trave		Flangia
Bulloni		
d_w : si veda la figura oppure = d_r se non vi è rondella A_b : area della sezione resistente dei bulloni		

	RIGIDEZZA	RESISTENZA
Pannello d'anima della colonna a taglio	$k_1 = \frac{0,385 A_{wt}}{\beta h}$	$F_{Rd1} = \frac{V_{w,Rd}}{\beta}$ con $V_{w,Rd} = \frac{0,9 A_{wt} f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$
	$\beta = 1$ per configurazioni con collegamento singolo; 0 per configurazioni con collegamenti doppi e caricati simmetricamente; 1 per configurazioni con collegamenti doppi, caricati non simmetricamente e con momenti flettenti equilibrati; 2 per configurazioni con collegamenti doppi, caricati non simmetricamente e con momenti flettenti non equilibrati.	
Per altri valori, si veda il paragrafo 1.2.2.1 al capitolo 1.		
Anima della colonna a compressione	$k_2 = \frac{0,7 b_{eff,w,c} t_{wc}}{d_c}$	$F_{Rd2} = k_{wc} \rho_c b_{eff,w,c} t_{wc} f_{yw} / \gamma_{M0}$ se $\bar{\lambda}_{wc} \leq 0,67$ $F_{Rd2} = k_{wc} \rho_c b_{eff,w,c} t_{wc} f_{yw} \left[\frac{1}{\bar{\lambda}_{wc}} \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_{wc}} \right) \right] / \gamma_{M0}$ se $\bar{\lambda}_{wc} > 0,67$ con $\bar{\lambda}_{wc} = 0,93 \sqrt{\frac{b_{eff,w,c} d_c f_{yw}}{E t_{wc}^2}}$ $k_{wc} = \min [1,0 ; 1,25 ; 0,5 \frac{\sigma_{R,w,c}}{f_{yw}}] (*)$ $\rho_c = 1$ se $\beta = 0$ $= \rho_{c1}$ se $\beta = 1$ $= \rho_{c2}$ se $\beta = 2$ dove $\rho_{c1} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 (b_{eff,w,c} t_{wc} / A_{vc})^2}}$ $\rho_{c2} = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2 (b_{eff,w,c} t_{wc} / A_{vc})^2}}$ $\sigma_{R,w,c}$: tensioni normali nell'anima della colonna alla radice del raggio di saldatura o della saldatura
$b_{eff,w,c} = t_p + a_f \sqrt{2} + t_p + \min(u ; a_f \sqrt{2} + t_p) + 5(t_p + s)$ (*) si veda il paragrafo 1.2.2.2 al capitolo 1.		
Ala della trave a compressione	$k_3 = \infty$	$F_{Rd3} = M_{c,Rd} / (h_b - t_p)$ $M_{c,Rd}$: momento resistente di progetto della trave

Bulloni a trazione	$k_a = 3,2 \frac{A_1}{L_b}$	$F_{RdA} = 4 B_{1,Rd} \text{ con } B_{1,Rd} = F_{1,Rd}$ $F_{1,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_1}{\gamma_{M0}}$
Anima della colonna a trazione	$k_5 = \frac{0,7 b_{eff,wc,i} t_{wc}}{d_c}$	$F_{Rd5} = \rho_1 b_{eff,wc,i} t_{wc} f_{yc} / \gamma_{M0}$ con $\rho_1 = 1$ se $\beta = 0$ $\rho_1 = \rho_{11}$ se $\beta = 1$ $\rho_1 = \rho_{12}$ se $\beta = 2$ dove $\rho_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 (b_{eff,wc,i} t_{wc} / A_{vc})^2}}$ $\rho_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2 (b_{eff,wc,i} t_{wc} / A_{vc})^2}}$ $b_{eff,wc,i} = \min [4\pi m ; 8m + 2,5e ; p + 4m + 1,25e]$
Ala della colonna a flessione	$k_6 = \frac{0,85 l_{eff,fc,i} t_{fc}^3}{m^3}$	$F_{Rd6} = \min [F_{fc,Rd1} ; F_{fc,Rd2}]$ $F_{fc,Rd1} = \frac{(8n - 2e_w) l_{eff,fc,i} m_{pl,fc} k_{fc}}{2mn - e_w(m+n)}$ <i>Rec 1</i> $F_{fc,Rd2} = \frac{2 l_{eff,fc,i} m_{pl,fc} k_{fc} + 4 B_{1,Rd} n}{m \cdot n}$ <i>Rec 2</i> $k_{fc} = 1$ se $\sigma_{n,fc} \leq 180 \text{ N/mm}^2$ (**) $= (2f_{yc} - 180 - \sigma_{n,fc}) / (2f_{yc} - 360) \leq 1$ se $\sigma_{n,fc} > 180 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{n,fc}$: tensioni normali nel baricentro dell'ala della colonna $n = \min [e ; 1,25m ; (b_p - w)/2]$ $e_w = d_w / 4$ $m_{pl,fc} = 0,25 t_{fc}^2 f_{yc} / \gamma_{M0}$ $l_{eff,fc,i} = b_{eff,wc,i}$ (***) si veda il paragrafo 1.2.2.3 al capitolo 1

Flangia a flessione	$k_7 = \frac{0,85 l_{eff,p,i} t_p^3}{m_p^3}$	$F_{Rd7} = \min [F_{ep,Rd1} ; F_{ep,Rd2}]$ $F_{ep,Rd1} = \frac{(8n_p - 2e_w) l_{eff,p,i} m_{pl,p}}{2m_p n_p - e_w(m_p + n_p)}$ <i>Rec 1</i> $F_{ep,Rd2} = \frac{2 l_{eff,p,i} m_{pl,p} + 4 B_{1,Rd} n_p}{m_p + n_p}$ <i>Rec 2</i> $n_p = \min [e_p ; 1,25m_p]$ $m_{pl,p} = 0,25 t_p^2 f_{yp} / \gamma_{M0}$ $l_{eff,p,i} = \min [4\pi m_p ; 8m_p + 2,5e_p ; w + 4m_p + 1,25e_p ; b_p]$
COLLEGAMENTO	Rigidezza iniziale : $S_{j,ini} = E h^2 / \sum_{i=1}^7 1/k_i$ Rigidezza nominale : $S_j = S_{j,ini} / 2$	$F_{Rd} = \min [F_{Rd,i}]$ Momento resistente plastico di progetto : $M_{Rd} = F_{Rd} h$ Momento resistente al limite elastico : $\frac{2}{3} M_{Rd}$

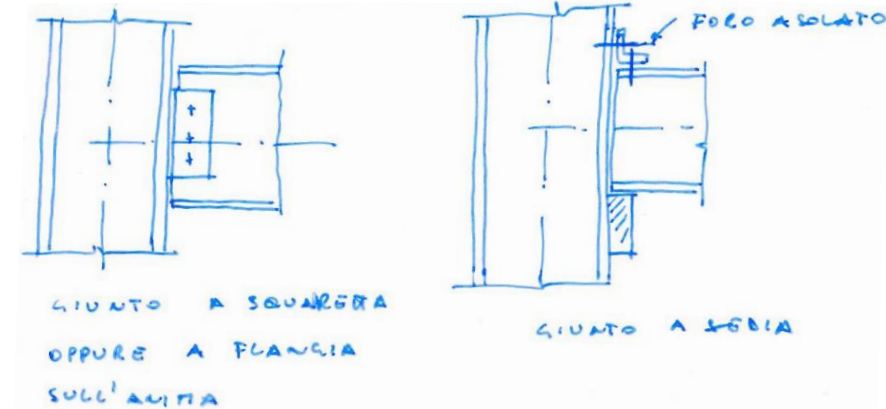
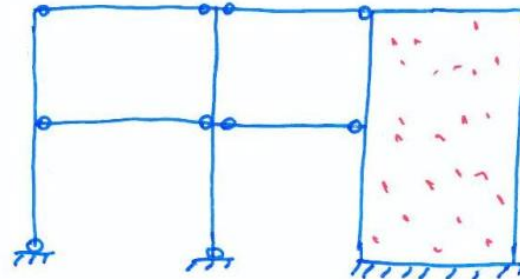
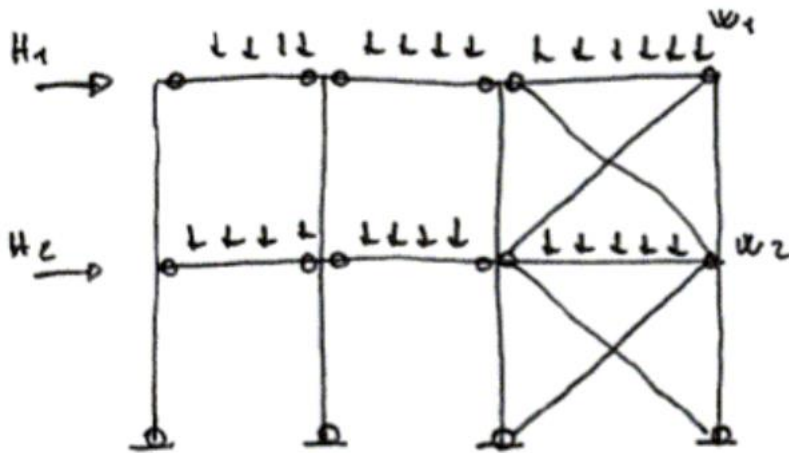


Schema di calcolo secondo EC3

Esempi di calcolo secondo EC3

Telaio controventato incernierato

- Nel condurre l'**analisi elastica** per questo tipo di struttura è necessario tenere conto di:
 - ❑ **classificazione sezioni** : non è un problema a meno che non si usino profili sottili di classe IV; sono consono i profili di classe I, II, III
 - ❑ **classificazione giunto** : non necessaria qualora si realizzino giunti cerniera

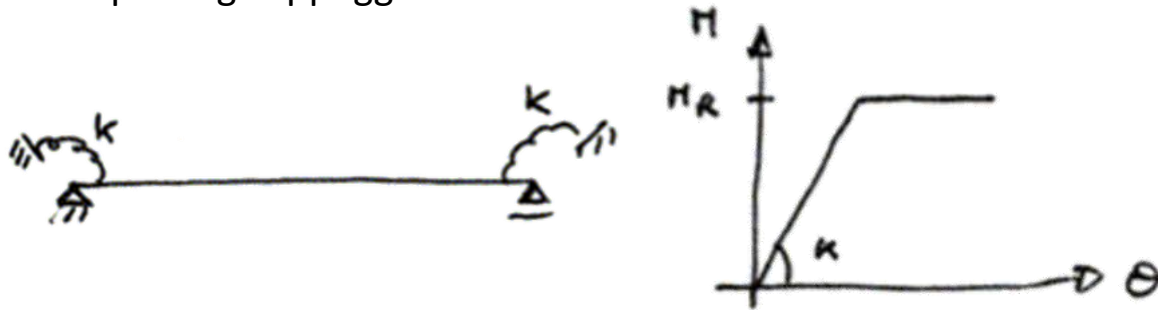


- L'effetto delle imperfezioni geometriche viene scaricato sul controvento
- L'analisi viene condotta, per quanto riguarda il calcolo delle caratteristiche della sollecitazione, come da CNR (elasticamente)
- Le verifiche e le combinazioni di carico vengono eseguite secondo EC3 (SLU)
- Le verifiche si eseguono in ipotesi elastiche, quindi se i profili che compongono il telaio sono di classe I, II, o III, questi sono trattati come classe III (campo elastico, W_{el})
- Nulla vieta che il telaio in acciaio sia incernierato ad un controvento in c.a.; anche in questo caso il telaio in acciaio può essere considerato controventato e privo di imperfezioni

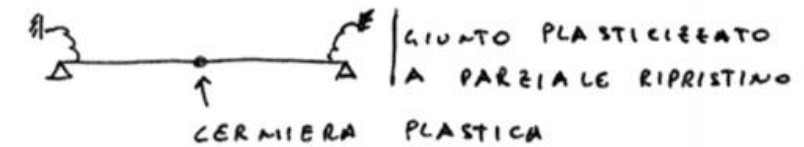
Esempi di calcolo secondo EC3

Telaio controventato a nodi semi-rigidi

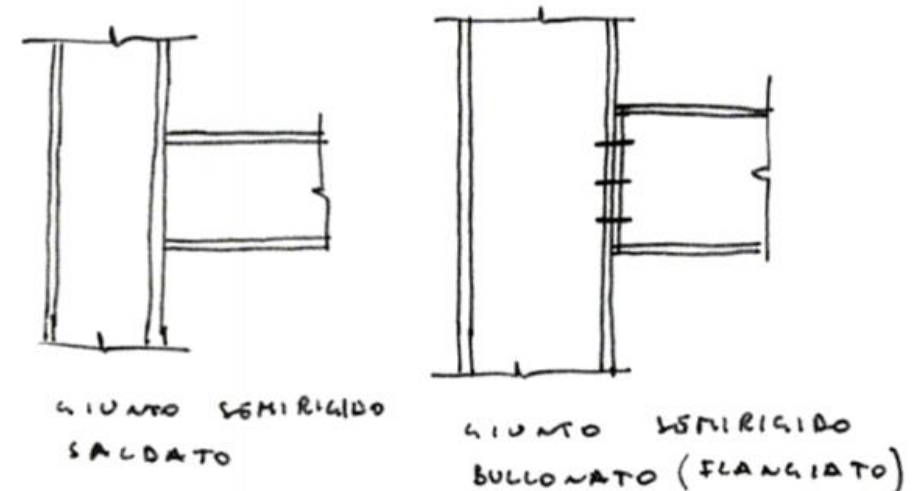
- Al fine di incrementare la capacità portante delle travi e migliorare il loro comportamento in esercizio è possibile introdurre la giunzione semirigida
- Ciò consente di trasferire parte del momento positivo della campata agli appoggi



- Ci sono tre possibilità:
 - trave in campo elastico e giunto in campo elastico
 - trave in campo elastico con giunto plasticizzato (occorre verificare che il giunto sia in grado di sopportare le rotazioni senza collassare prematuramente)
 - formazione di un meccanismo in condizioni ultime (quindi con giunto plasticizzato e trave plasticizzata)

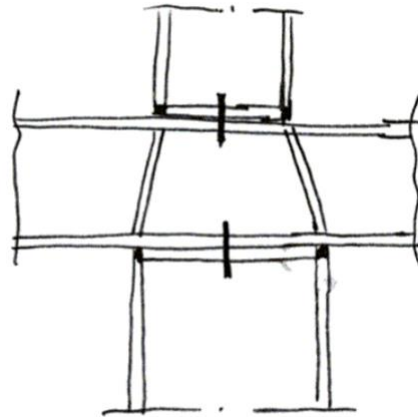
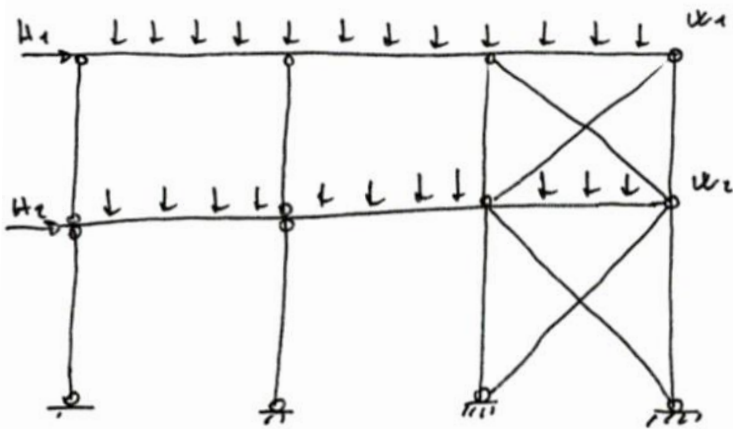


- È necessario fare in modo che la capacità rotazionale del giunto sia sufficiente a consentire la formazione della cerniera plastica in campata senza che si abbiano premature perdite di stabilità
- Vanno usati profili di classe I o II ed è necessario caratterizzare la risposta $M - \vartheta$ del giunto secondo l'allegato J dell'EC3



Esempi di calcolo secondo EC3

Telaio controventato con trave continua



- Vale quanto detto per l'esempio precedente
- I profili componenti le aste devono essere di classe I, II o III
- La classificazione del giunto non è necessaria in quanto non ho giunti sulla trave essendo essa continua
- Anche per quanto riguarda la classificazione del telaio e la valutazione della relativa imperfezione geometrica si rimanda a quanto esposto nell'esempio precedente

- **Calcolo della trave**

Si può utilizzare la teoria elastica se i profili delle aste componenti il telaio sono di classe I, II, o III

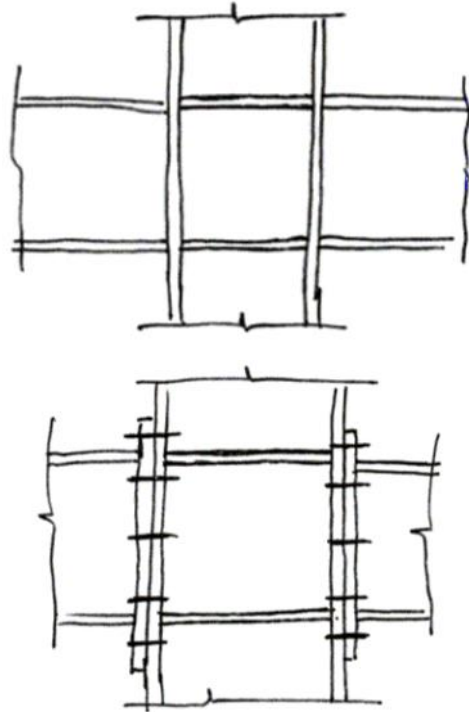
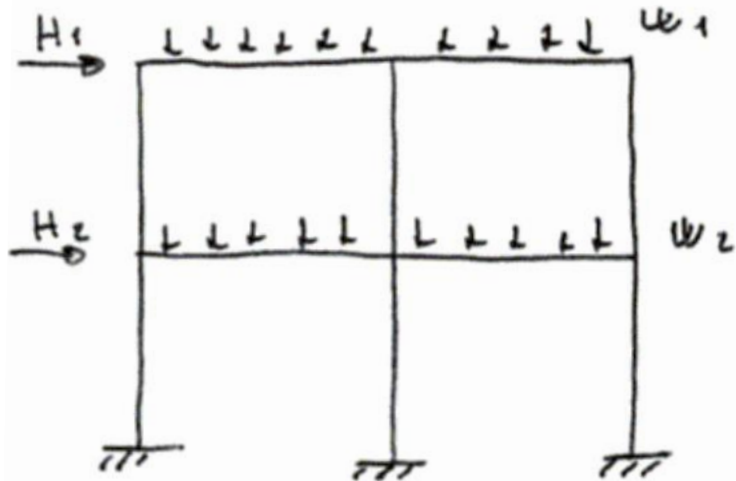
- Nel caso in cui si adotti il modello elasto-plastico esso potrà essere applicato:
 - senza redistribuzione per profili di classe I e II
 - con redistribuzione per profili di classe I

- **Calcolo delle colonne**

Si veda il calcolo ad instabilità secondo EC3

Esempi di calcolo secondo EC3

Telaio continuo

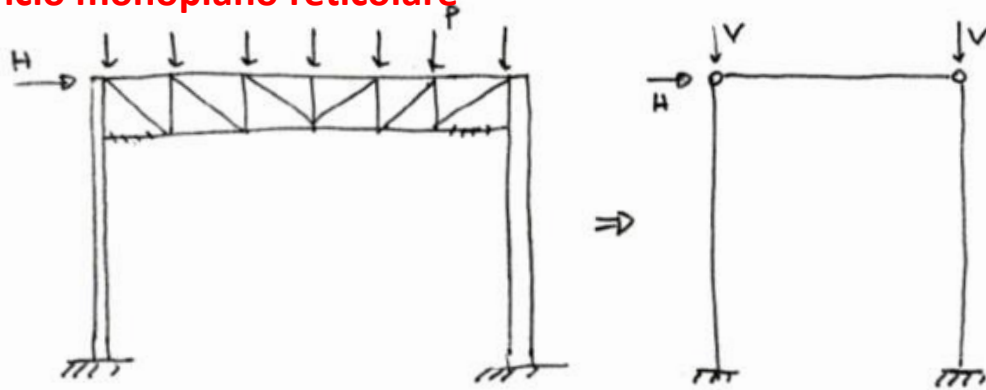


- Le aste componenti il telaio sono di classe I, II, o III. Per quanto riguarda la classificazione del giunto esso deve essere rigido (criterio rigidità) e a completa resistenza (criterio resistenza) → completo ripristino
- La classificazione del telaio comprende:
 - telaio a nodi fissi;
 - telaio a nodi spostabili.

- È possibile utilizzare il metodo semplificato, come indicato sull'EC3, se $V_{Sd} = V_{cr} < 0.25$
- La determinazione delle caratteristiche della sollecitazione è semplice anche nel caso di telaio a nodi spostabili (occorre amplificare i momenti flettenti secondo le indicazioni contenute nell'EC3) oppure possono essere valutati gli effetti del secondo ordine mediante l'impiego di un appropriato codice di calcolo
- Le verifiche di resistenza andranno condotte come indicato nell'EC3, considerando tutte le sezioni come se fossero di classe III
- L'analisi plastica è consentita con sezioni di classe I e giunzioni rigide a completo ripristino. Il calcolo a rottura può condursi in maniera lineare per telai a nodi fissi, considerando gli effetti del secondo ordine per telai a nodi spostabili.
- Per il calcolo elasto-plastico occorre impiegare codici non lineari appropriati

Esempi di calcolo secondo EC3

Edificio monopiano reticolare



- È equivalente a un sistema a pendolo rovescio (con capacità dissipativa limitata)
- La classificazione delle sezioni è immediata (secondo EC3 - solo colonna)
- La classificazione dei nodi non si rende necessaria in quanto vengono utilizzati nodi cerniera per la trave e un incastro alla base della colonna
- superflua anche la classificazione del telaio
- La colonna viene verificata direttamente per carico di punta
- Il giunto di fondazione deve essere a completo ripristino di resistenza

- Le verifiche di resistenza sono da condursi tutte in **campo elastico**, indipendentemente dal profilo utilizzato

