



Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Principali tipologie di strutture a profilati utilizzate nell'industria meccanica

1. Travature reticolari

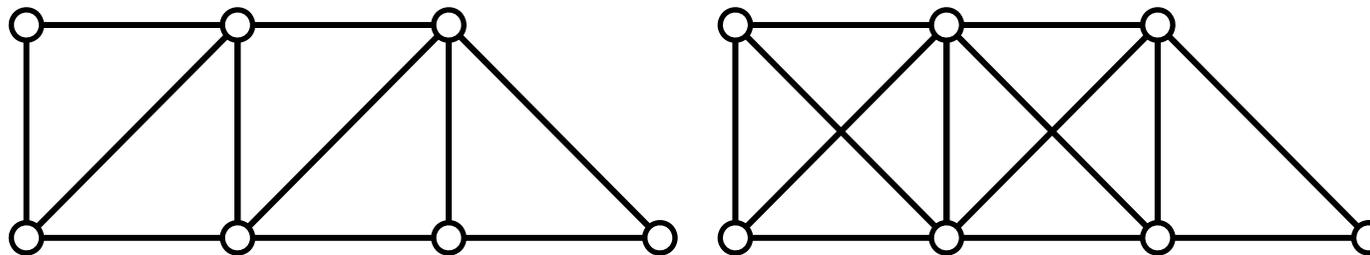


Gru da cantiere



Tralicci per elettrodotti

Le travature reticolari sono composte da triangoli accostati e/o sovrapposti



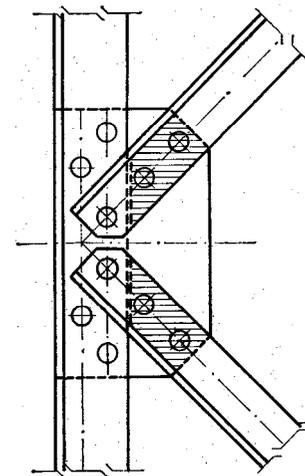
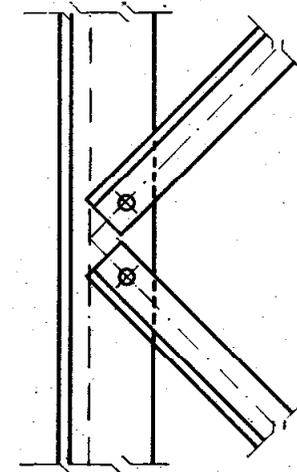


Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Corso di "Costruzione di macchine"
Anno accademico 2013-4



- I nodi sono assimilati a cerniere grazie a:
- giochi nelle giunzioni
 - elevata snellezza delle aste





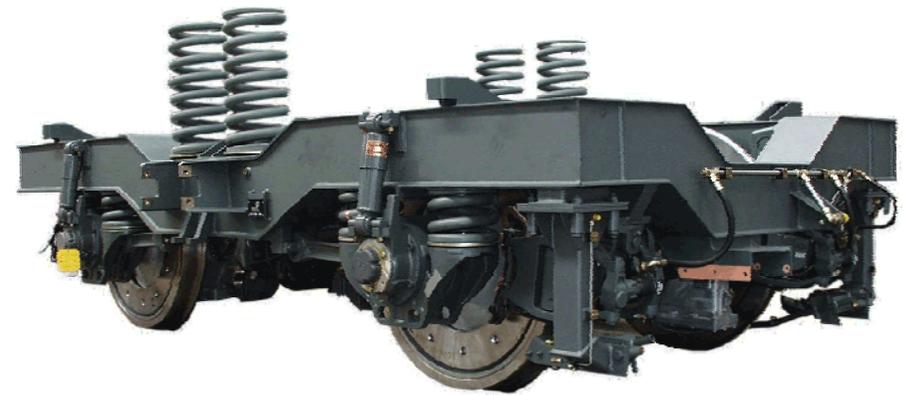
Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Principali tipologie di strutture a profilati utilizzate nell'industria meccanica

2. Telai



Gru a cavalletto



Carrello ferroviario

Le giunzioni devono garantire la trasmissione dei momenti, senza rotazioni reciproche





Elementi strutturali soggetti a trazione

(es. tiranti di una travatura reticolare)

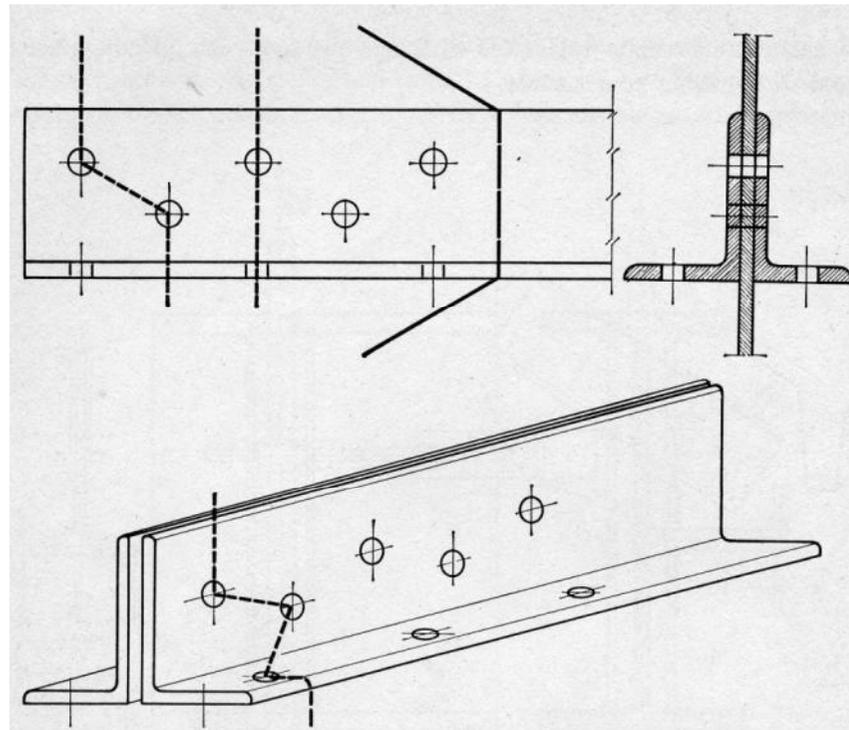
Verifica a resistenza

$$\sigma = \frac{N}{A_{net}} \leq \sigma_{amm}$$

Forza normale agente

Tensione ammissibile

Area resistente "netta"

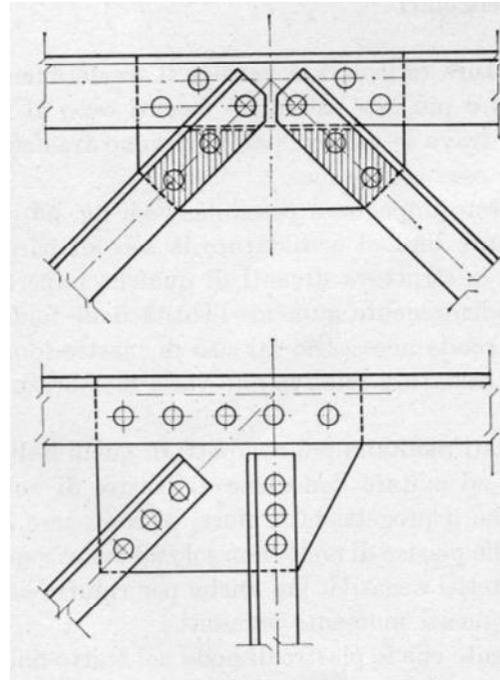
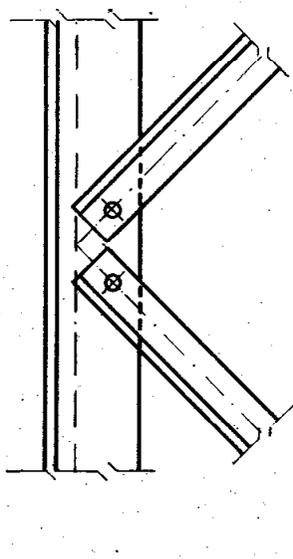




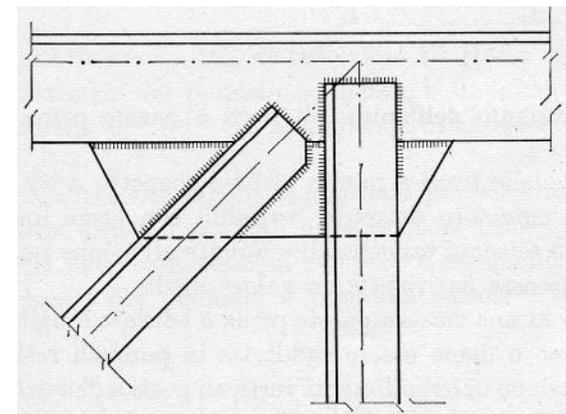
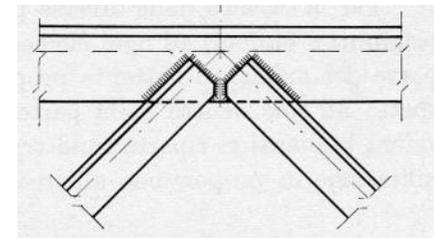
Elementi strutturali soggetti a trazione

Giunzioni

La zona più sollecitata di un'asta tesa è solitamente localizzata in prossimità delle giunzioni, tipicamente saldate o bullonate



Esempi di "nodi" bullonati

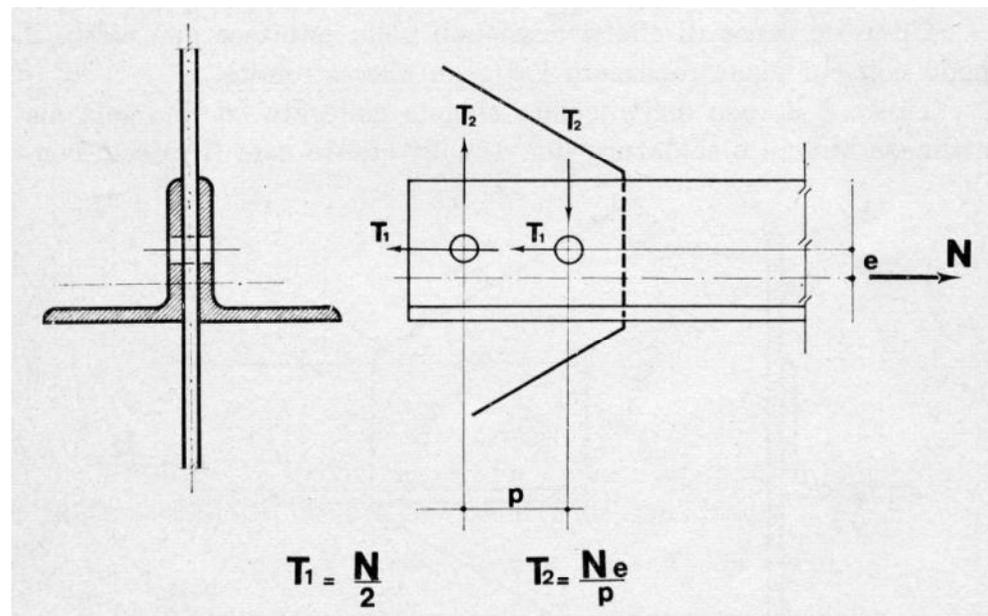


Esempi di "nodi" saldati

Tipici effetti di riduzione della resistenza della giunzione

1 – Eccentricità del collegamento

Spesso è difficile ottenere che la sezione resistente del collegamento abbia il baricentro che giace sulla fibra baricentrica del profilato. Se questo non accade, si crea un momento di cui tenere conto nel dimensionamento dei bulloni. L'effetto sulla resistenza della sezione è invece generalmente trascurabile.

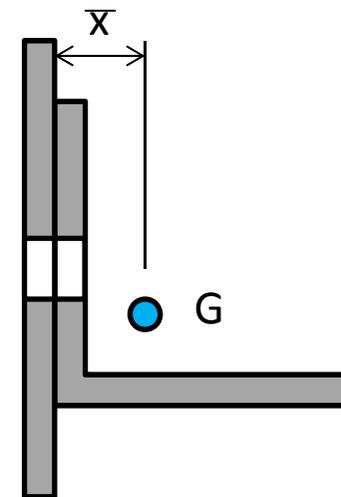
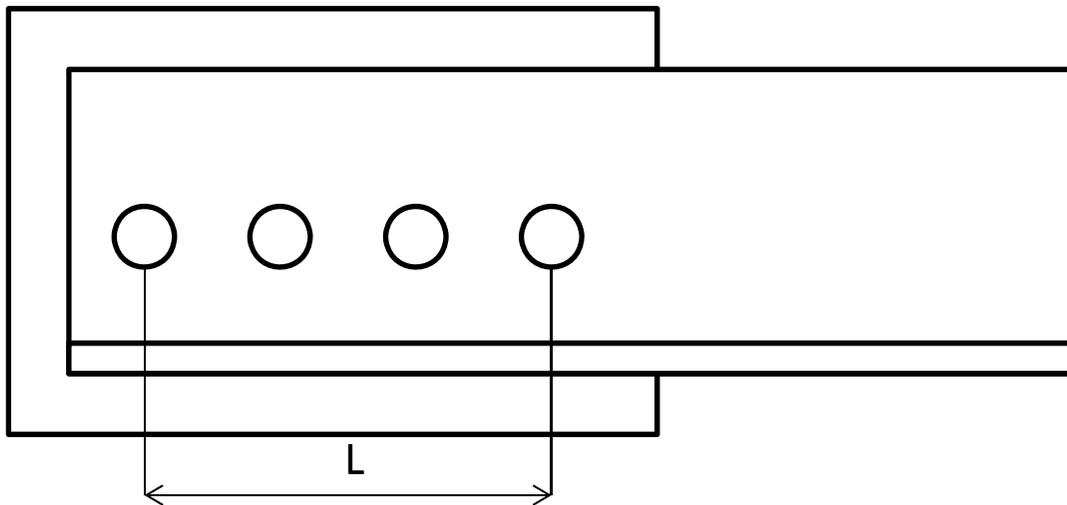


L'effetto si riduce all'aumentare del rapporto p/e .

Tipici effetti di riduzione della resistenza

2 – Effetto di diffusione del carico per taglio ("shear lag effect")

Spesso viene connessa solo una parte della sezione (esempio tipico: una sola ala di un profilato ad L). In questo caso l'intero carico, prima di riuscire ad interessare l'intera sezione, deve essere trasmesso solo da una parte di essa.



Per tener conto di questo si considera una sezione effettiva:

$$A_e = A_{net} \cdot U$$

$$U = \frac{\bar{x}}{L}$$

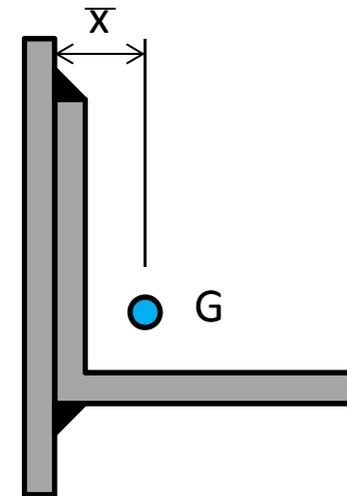


Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Tipici effetti di riduzione della resistenza

2 – Effetto di diffusione del carico per taglio ("shear lag effect")

Caso di giunzione saldata



Elementi strutturali soggetti a compressione

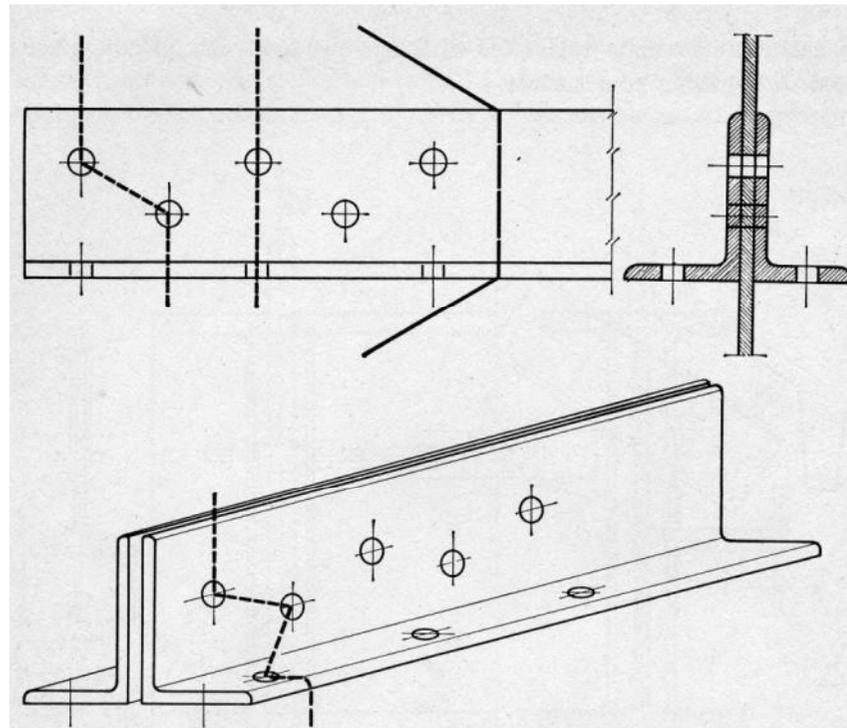
(es. puntoni di una travatura reticolare)

Verifica a resistenza

$$\sigma = \frac{N}{A_{net}} \leq \sigma_{amm}$$

← Forza normale agente ← Tensione ammissibile

Area resistente "netta"





Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Verifica all'instabilità

Viene condotta con la relazione di Eulero

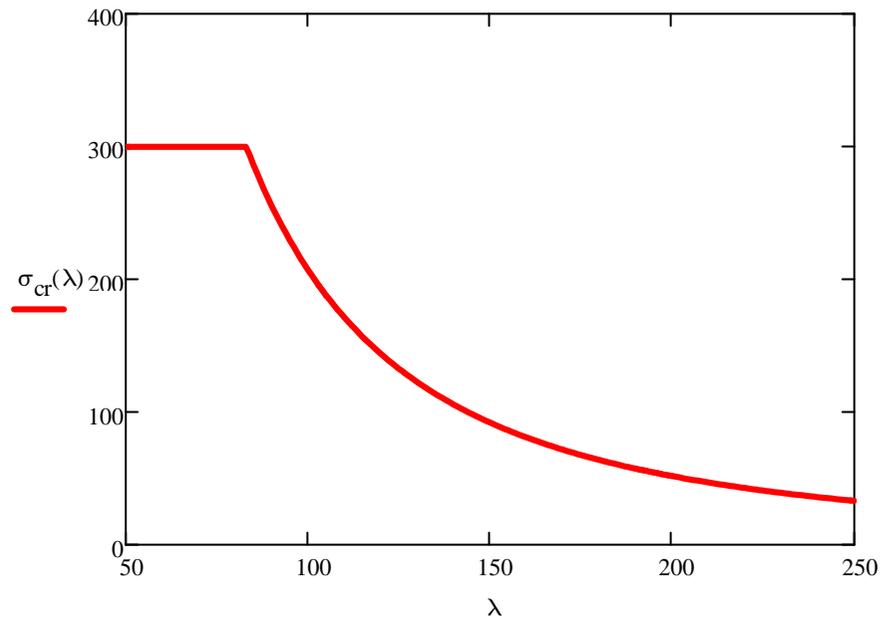
$$\sigma = \left| \frac{N}{A} \right| \leq \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{L_{eff}}{\rho_*}$$

"snellezza" dell'asta

$$\rho_*^2 = \frac{J_*}{A}$$

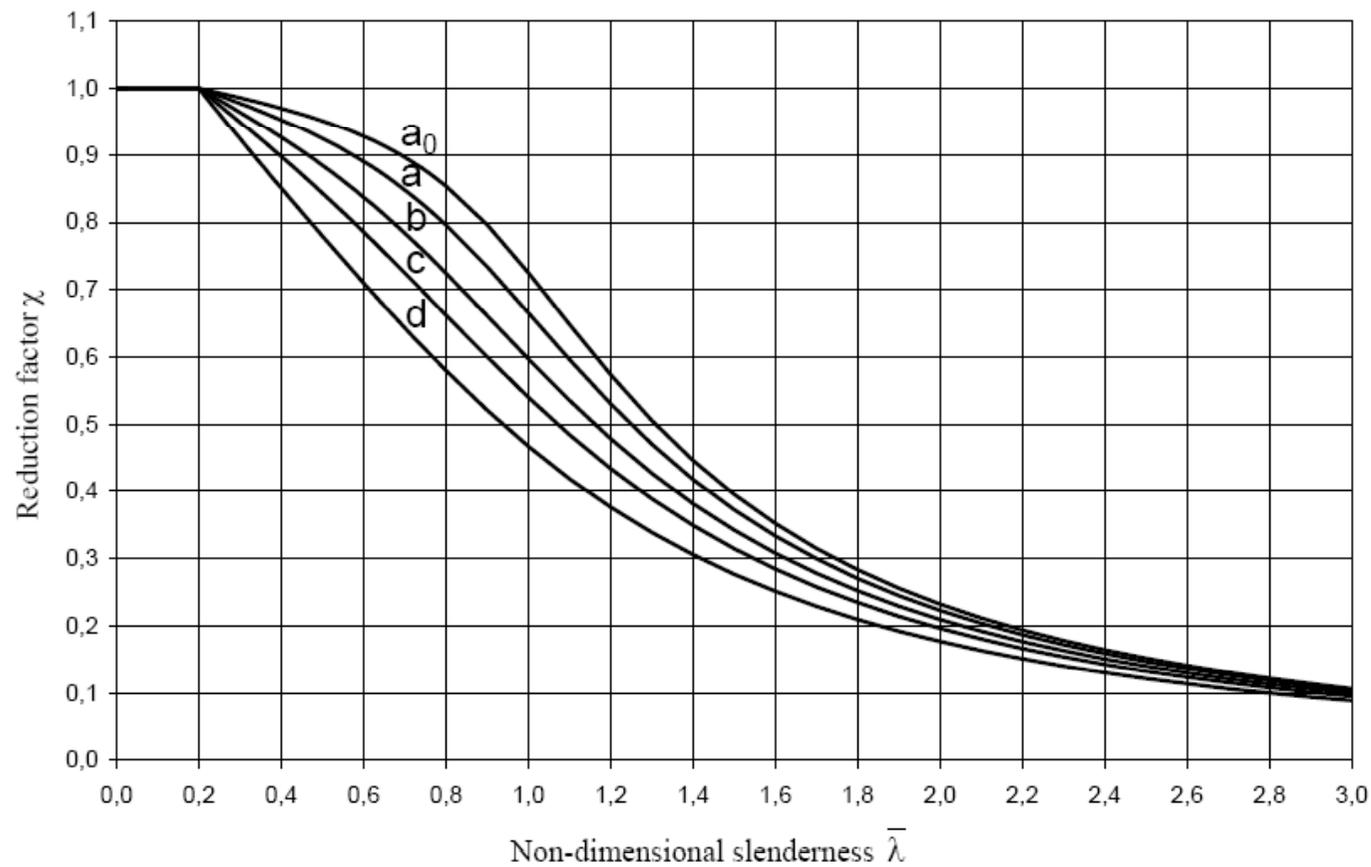
raggio di inerzia (al quadrato) della sezione dell'asta





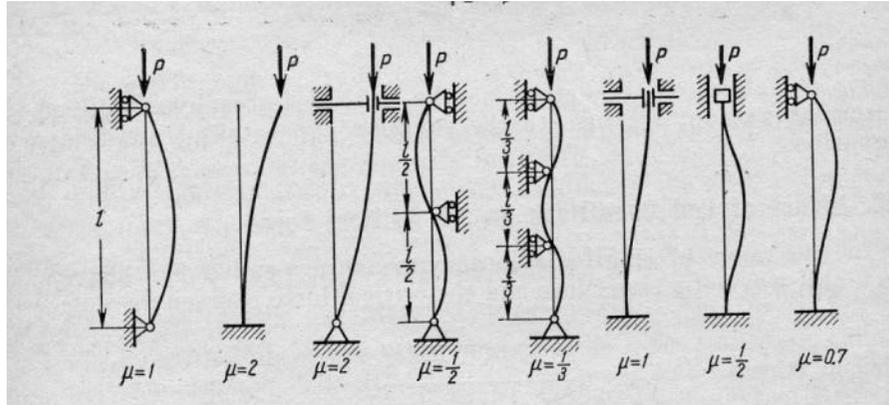
Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

La resistenza effettiva al "buckling" mostra un passaggio graduale tra le due curve limite, con andamento dipendente anche dalla forma della sezione.
Per questo le normative (es. EC 2013) riportano apposite curve raccordate.



$$L_{eff} = \mu \cdot L$$

dipende dalle condizioni di vincolo dell'asta

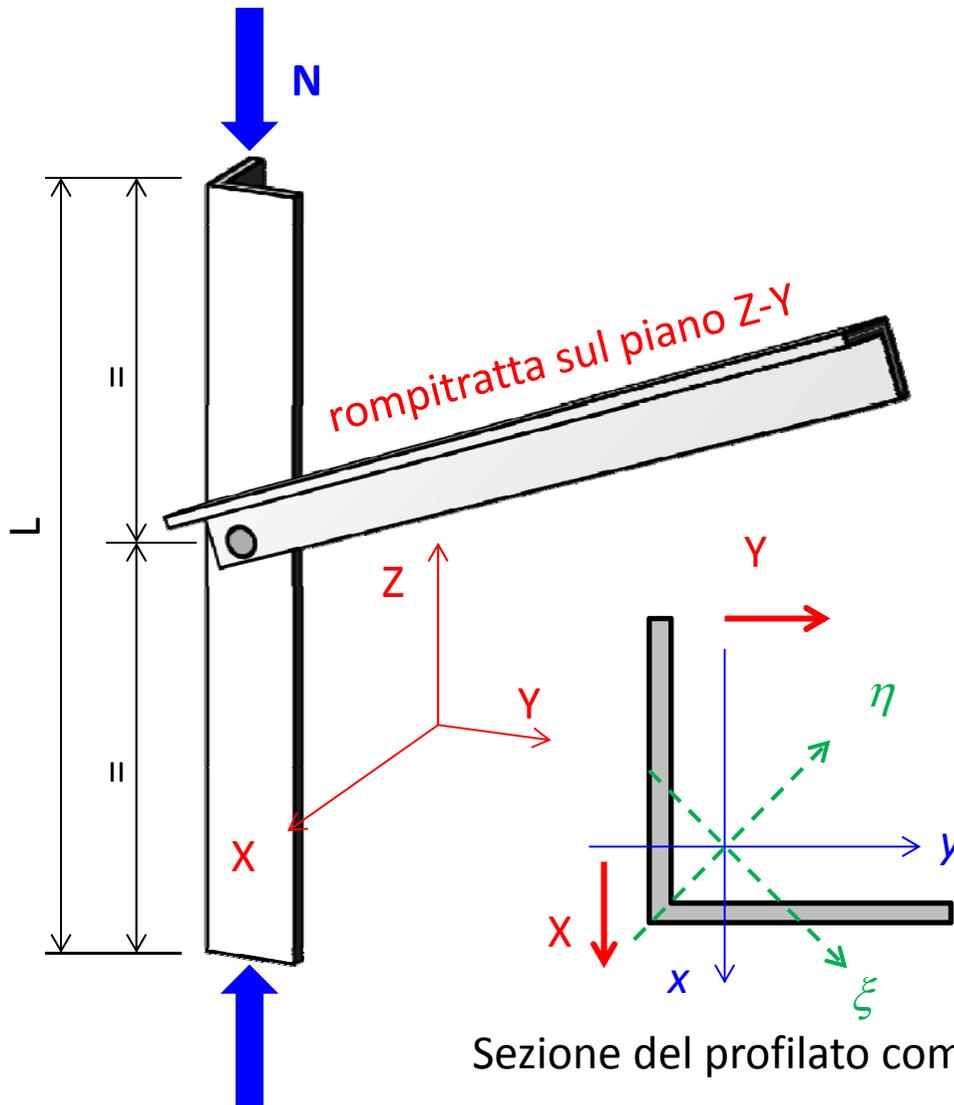


$$J_* = J_{\min}$$

Raggio di inerzia **minimo** della sezione dell'asta

I valori forniti possono subire modifiche in caso di particolari condizioni di vincolo, legate soprattutto alla presenza di "rompitratte".

Rompitratta: elementi non caricati, impiegati per ridurre la lunghezza libera delle aste compresse



L'asta è fissata dal rompitratta in direzione Y, per cui può instabilizzarsi:

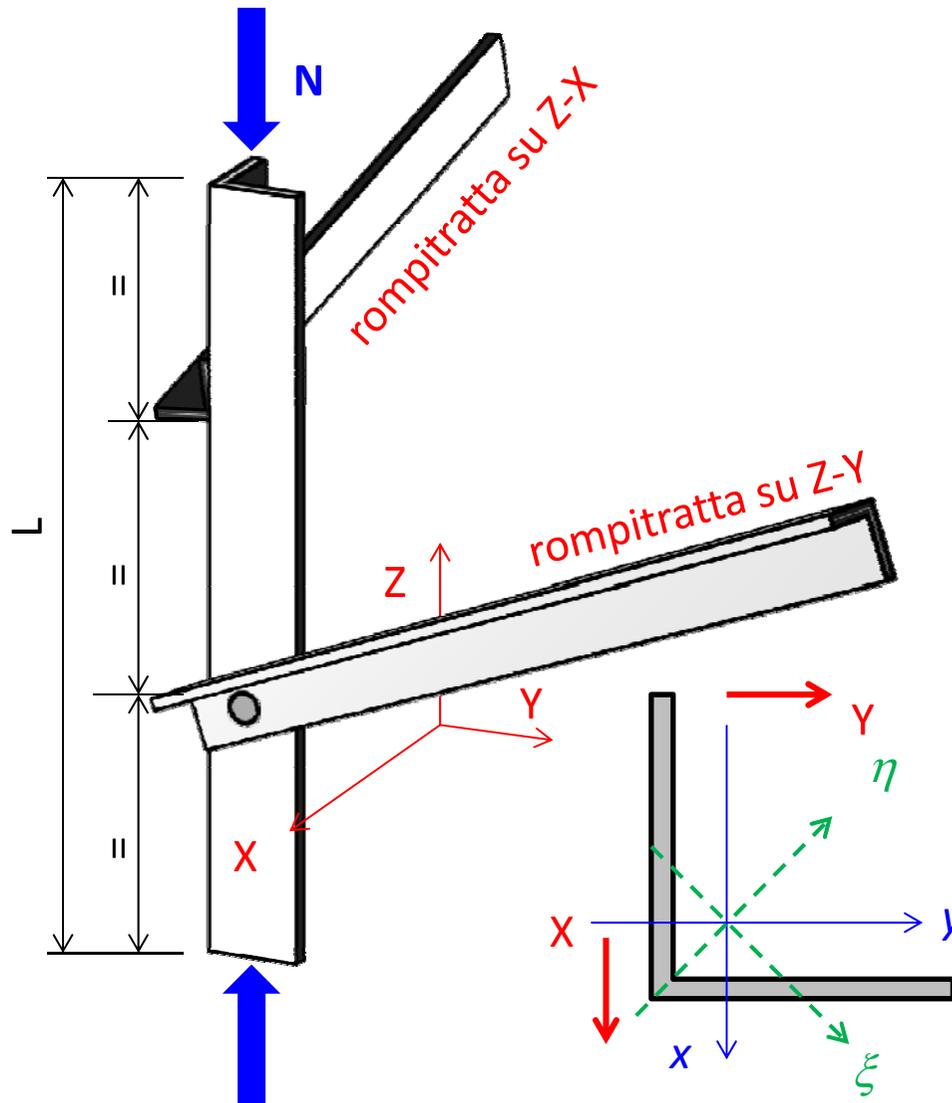
- su metà lunghezza nella direzione di inerzia minima

$$\lambda = \frac{L/2}{\rho_{\min}} \qquad \rho_{\min} = \frac{J_{\min}}{A} = \frac{J_{\xi}}{A}$$

- sull'intera lunghezza nella direzione X

$$\lambda = \frac{L}{\rho_y} \qquad \rho_y = \frac{J_y}{A}$$

Rompitratta: elementi non caricati, impiegati per ridurre la lunghezza libera delle aste compresse



L'asta è fissata da due rompitratta sfalsati, per cui può instabilizzarsi:

- su 1/3 di lunghezza nella direzione di inerzia minima

$$\lambda = \frac{L/3}{\rho_{\min}} \quad \rho_{\min} = \frac{J_{\min}}{A} = \frac{J_{\xi}}{A}$$

- su 2/3 di lunghezza nella direzione X o Y

$$\lambda = \frac{2L/3}{\rho_y} \quad \rho_y = \frac{J_y}{A}$$



Elementi strutturali soggetti a flessione

Verifica a resistenza

$$\sigma = \frac{M_f}{W} \leq \sigma_{amm}$$

Momento flettente agente

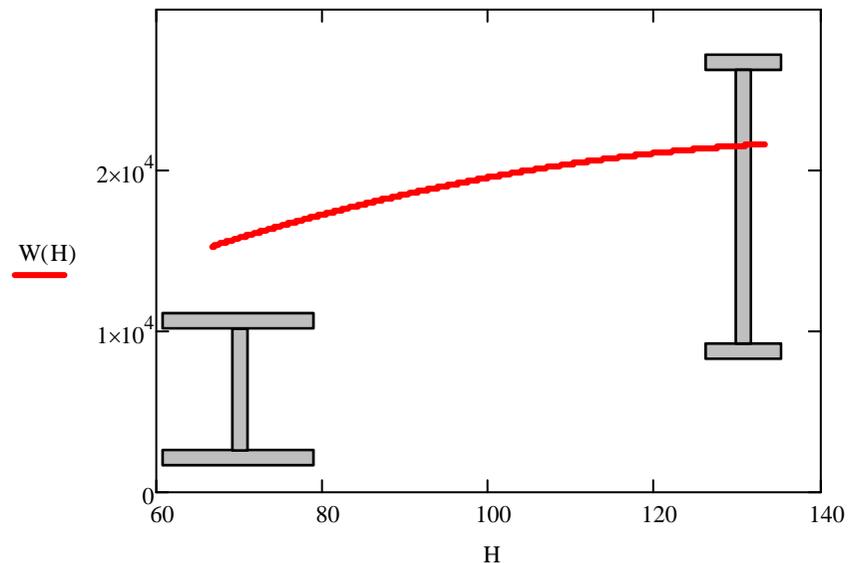
Tensione ammissibile

Modulo di resistenza
della sezione

Elementi strutturali soggetti a flessione

Per aumentare la resistenza a flessione secondo la formula di Navier è opportuno aumentare il W , incrementando l'altezza dell'anima e distanziando le piattabande:

Andamento di W in funzione dell'altezza H dell'anima per una trave a doppio T di area e spessore costanti



Incrementando H , tuttavia, diminuiscono la rigidezza trasversale e torsionale della trave, mentre le diverse parti della sezione aumentano la possibilità di comportarsi localmente in maniera indipendente dalle altre.

Al di sopra di determinati limiti, questi effetti possono innescare fenomeni di instabilità globale e locale, capaci di compromettere l'integrità della trave.



Elementi strutturali soggetti a flessione

Verifica alla stabilità

- flesso-torsionale (globale)
- imbozzamento anima per flessione e taglio (locale)
- imbozzamento anima per carichi concentrati (locale)

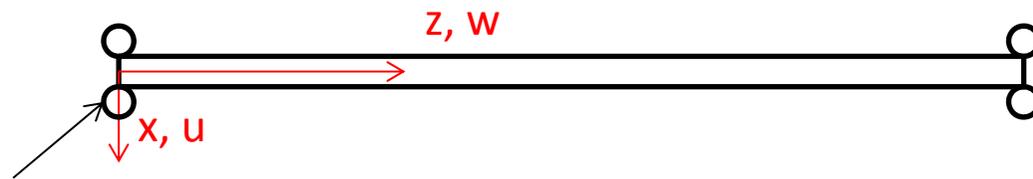
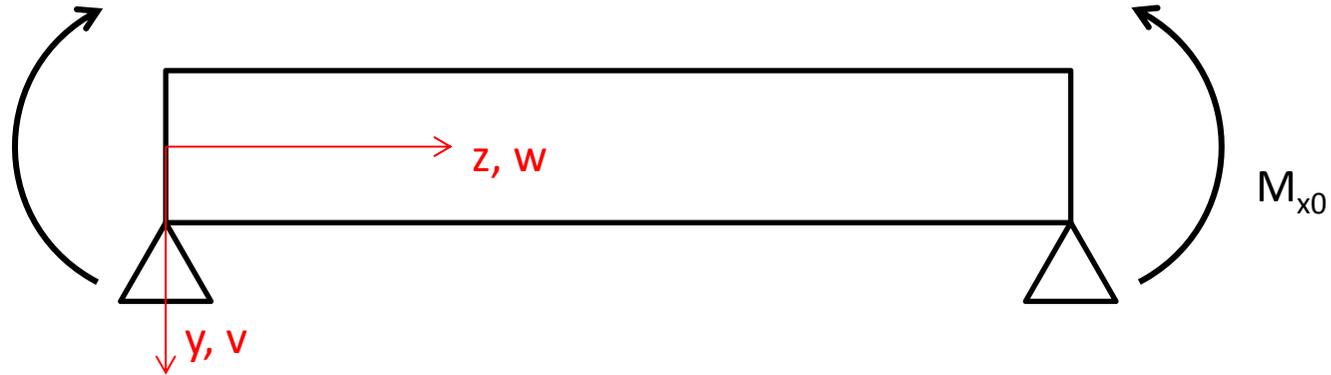
Queste verifiche sono molto complesse e le diverse normative forniscono apposite relazioni approssimate.

Nel seguito si analizzerà il fenomeno della instabilità flesso-torsionale di una trave soggetta a momento flettente costante.



Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Instabilità flessio-torsionale



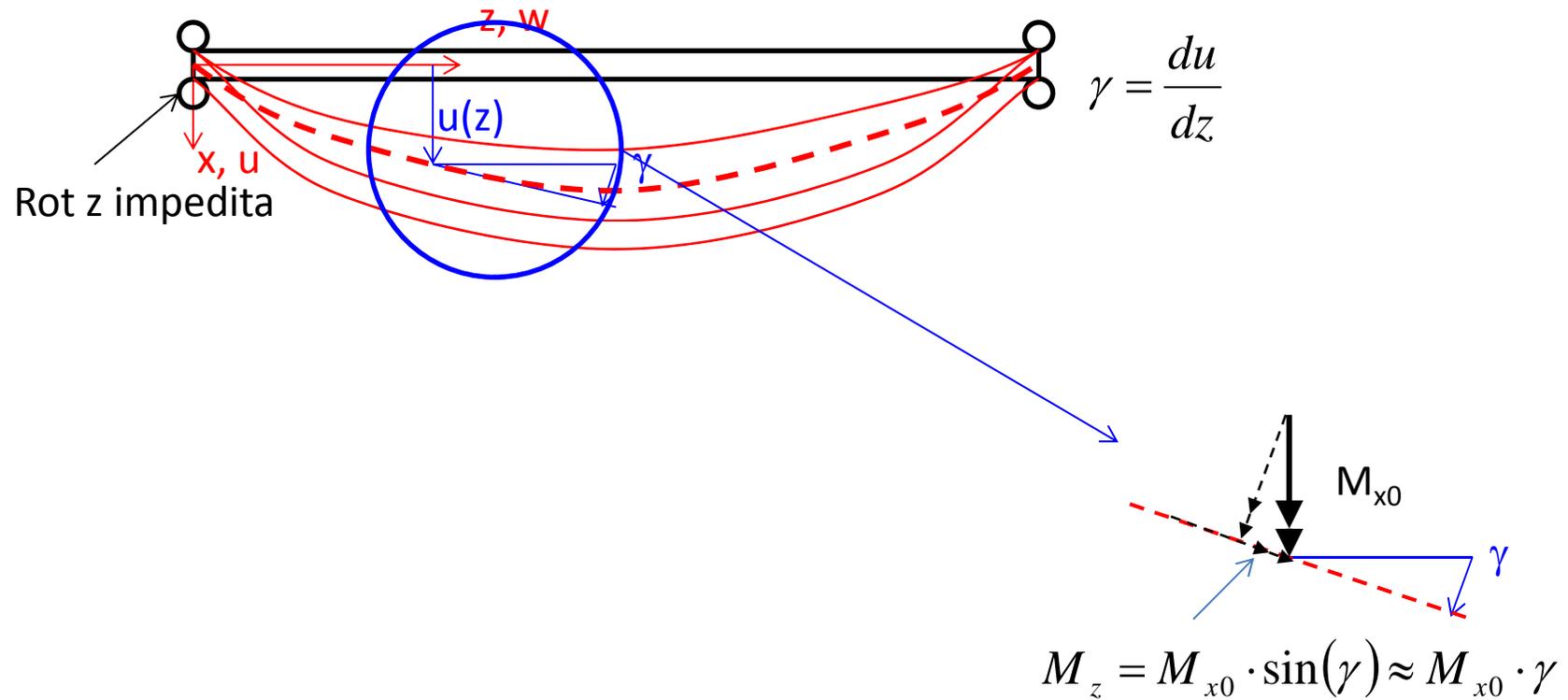
Rot z impedita

$$M_{x0} = -EJ_x \cdot \frac{d^2v}{dz^2}$$



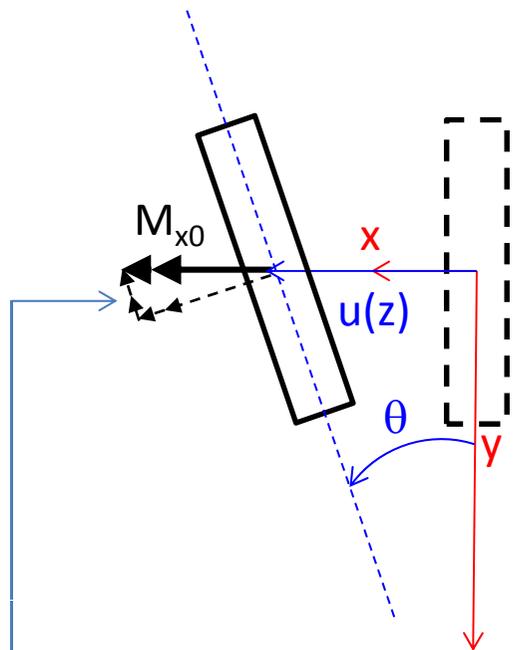
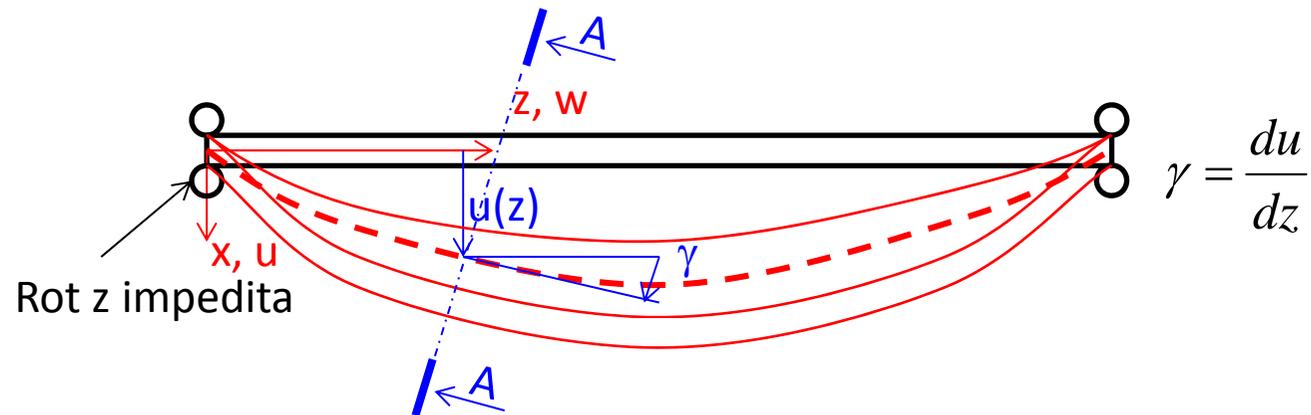
Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Instabilità flessione-torsionale

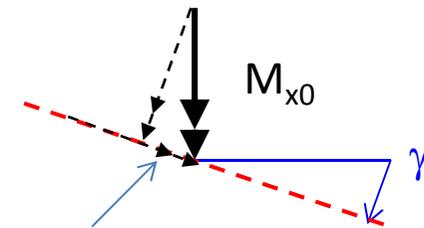




Instabilità flessio-torsionale



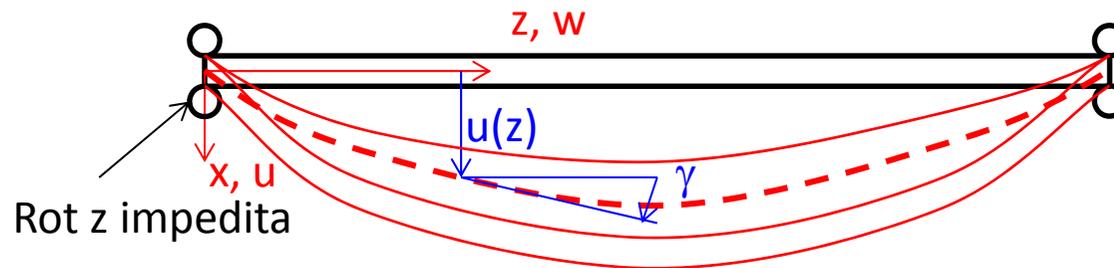
$$M_y = M_{x0} \cdot \sin(\theta) \approx M_{x0} \cdot \theta$$



$$M_z = M_{x0} \cdot \sin(\gamma) \approx M_{x0} \cdot \gamma = M_{x0} \cdot \frac{du}{dz}$$



Instabilità flessione-torsionale



$$M_y \approx M_{x0} \cdot \theta = EJ_y \frac{d^2 u}{dz^2}$$

$$M_z \approx M_{x0} \cdot \frac{du}{dz} = GJ_p \frac{d\theta}{dz}$$

Derivando rispetto a z

$$M_{x0} \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} = GJ_p \frac{d^2 \theta}{dz^2}$$

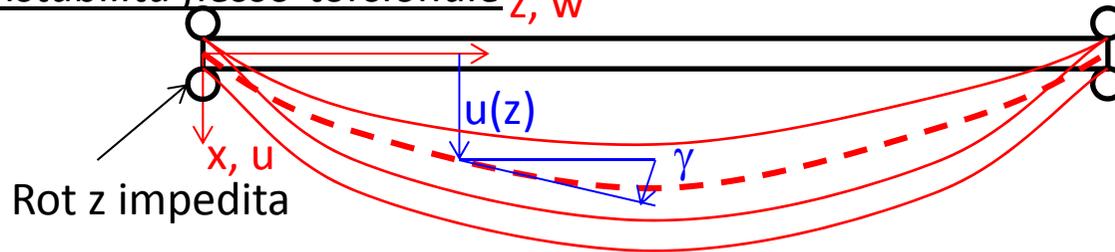
$$M_{x0} \cdot \frac{M_{x0} \cdot \theta}{EJ_y} = GJ_p \frac{d^2 \theta}{dz^2}$$

$$\frac{d^2 \theta}{dz^2} - \frac{M_{x0}^2}{GJ_p EJ_y} \theta = 0$$



Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Instabilità flessione-torsionale z, w



$$\frac{d^2\theta}{dz^2} - \frac{M_{x0}^2}{GJ_p EJ_y} \theta = 0$$

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} - \lambda^2 \cdot \theta = 0$$

$$\lambda^2 = \frac{M_{x0}^2}{GJ_p EJ_y}$$

$$\theta = A \cdot \sin(\lambda z) + B \cdot \cos(\lambda z)$$

$$c.c. \begin{cases} z = 0 & \theta = 0 \\ z = L & \theta = 0 \end{cases}$$

$$c.c. \begin{cases} z = 0 & \theta = 0 \\ z = L & \theta = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} B = 0 \\ A \sin(\lambda L) = 0 \end{cases}$$

$$A \neq 0 \Rightarrow \lambda L = n\pi \quad n \in \mathbb{N}$$

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{GJ_p EJ_y}$$



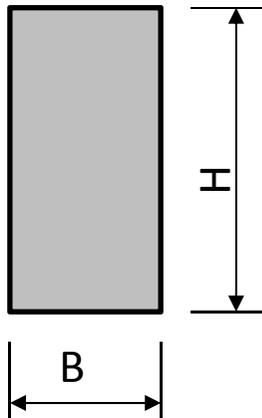
Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Instabilità flessione-torsione

Il valore di M_{cr} dipende fortemente dalla forma della sezione e dalla lunghezza della trave. A titolo di esempio, per una sezione rettangolare si ha:

$$J_x = \frac{BH^3}{12} \quad J_y = \frac{HB^3}{12} \quad J_t = \frac{HB^3}{3}$$

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{GJ_p EJ_y} = \frac{\pi E}{L \sqrt{2(1+\nu)}} \sqrt{\frac{HB^3}{12} \frac{HB^3}{3}} = \frac{\pi E}{L \sqrt{2(1+\nu)}} \frac{HB^3}{6}$$

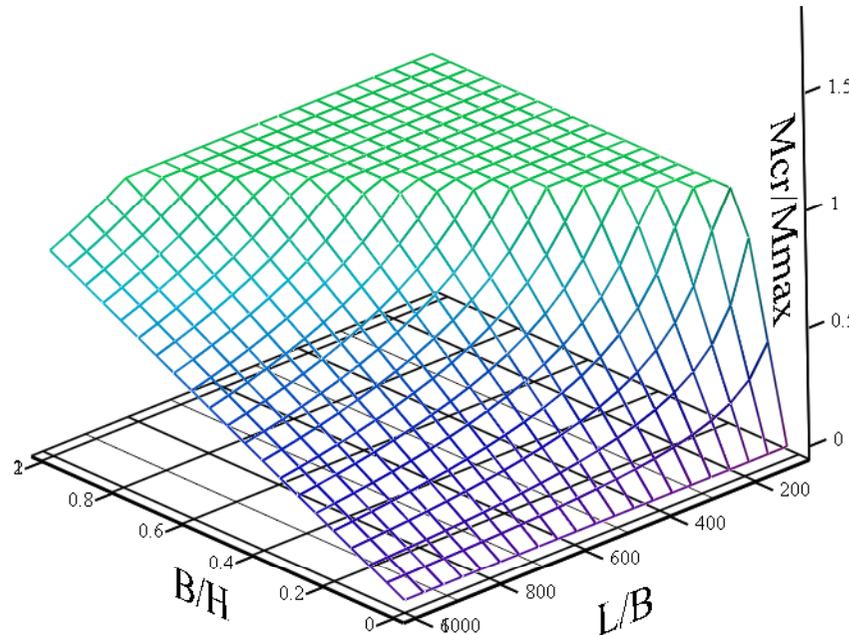


$$M_{\max} = \frac{\sigma_{amm} J_x}{H/2} = \frac{\sigma_{amm} BH^2}{6}$$

$$\frac{M_{cr}}{M_{\max}} = \frac{\pi E}{\sigma_{amm} \sqrt{2(1+\nu)}} \frac{B}{H} \frac{B}{L}$$

Instabilità flessione-torsionale

Nella figura viene riportato il valore $\text{MIN}(M_{cr}/M_{max}, 1)$. Si nota chiaramente l'influenza della forma della sezione e della lunghezza della trave.



$$\frac{M_{cr}}{M_{max}} = \frac{\pi E}{\sigma_{amm} \sqrt{2(1+\nu)}} \frac{B}{H} \frac{B}{L}$$

Il valore di M_{cr} dipende in realtà da numerosi altri parametri, quali:

- distribuzione del momento flettente lungo la trave
- presenza e posizione di carichi concentrati
- forma della sezione (a I, ad H, tubolare, etc.)
- difetti di forma iniziale della trave

Le principali normative (es. EC 2013) riportano specifiche relazioni, spesso semi-empiriche, per il calcolo di M_{cr} tenendo conto di questi ed altri fattori.



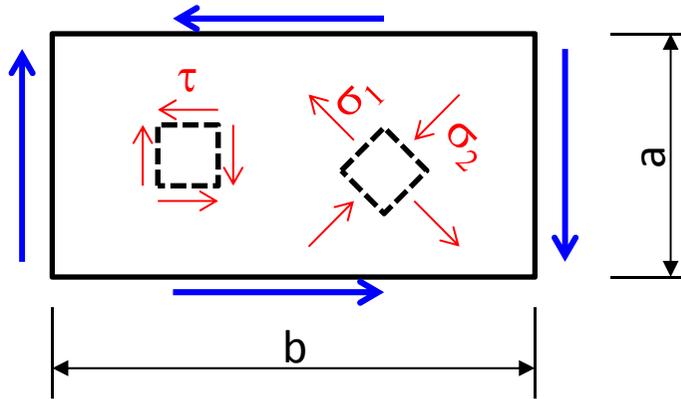
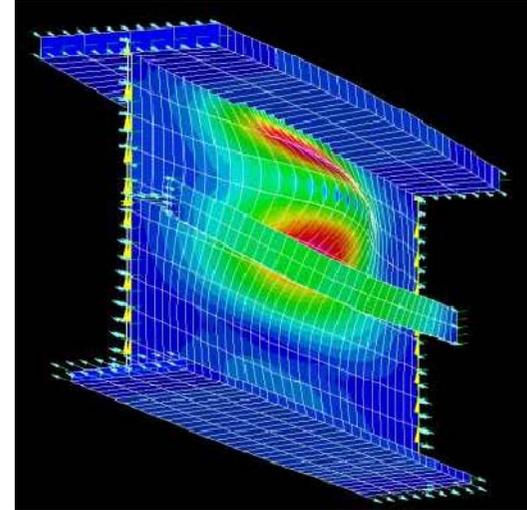
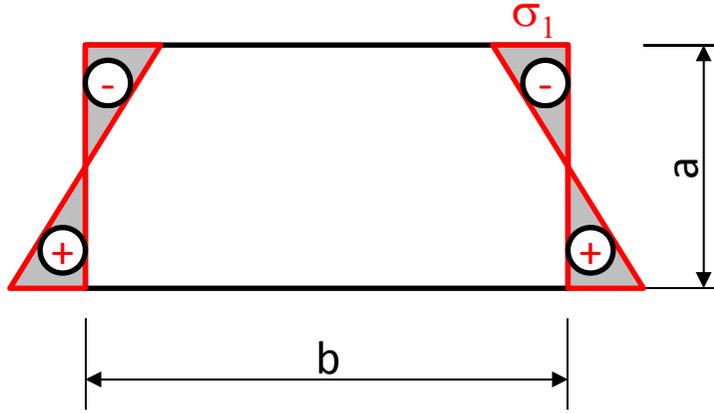
Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Instabilità dell'anima per flessione e taglio

L'anima delle travi inflesse (a doppio T o a cassone) è generalmente suddivisa in "pannelli" contigui da appositi irrigidimenti verticali.

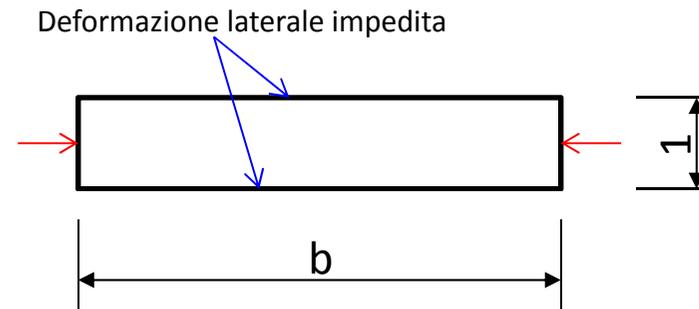


Instabilità dell'anima per flessione e taglio



Instabilità dell'anima per flessione e taglio

Una valutazione **molto** cautelativa si ottiene dalla tensione critica euleriana di un pannello uniformemente compresso di larghezza infinita, di cui si può analizzare una striscia di larghezza unitaria.



$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{L^2 A} \quad J = \frac{1s^3}{12} \quad E = \frac{E}{1-\nu^2} \quad A = 1 * s \quad L = b$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \frac{E}{1-\nu^2} \frac{s^3}{12}}{b^2 s} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{s^2}{b^2}$$

Nelle normative si assume generalmente:

$$\sigma_1^* = k_\sigma \sigma_{cr}$$

$$\tau_1^* = k_\tau \sigma_{cr}$$

tensioni normali e tangenziali critiche dipendenti da:

- rapporto a/b
- effettiva distribuzione delle tensioni
- vicoli agli estremi del pannello

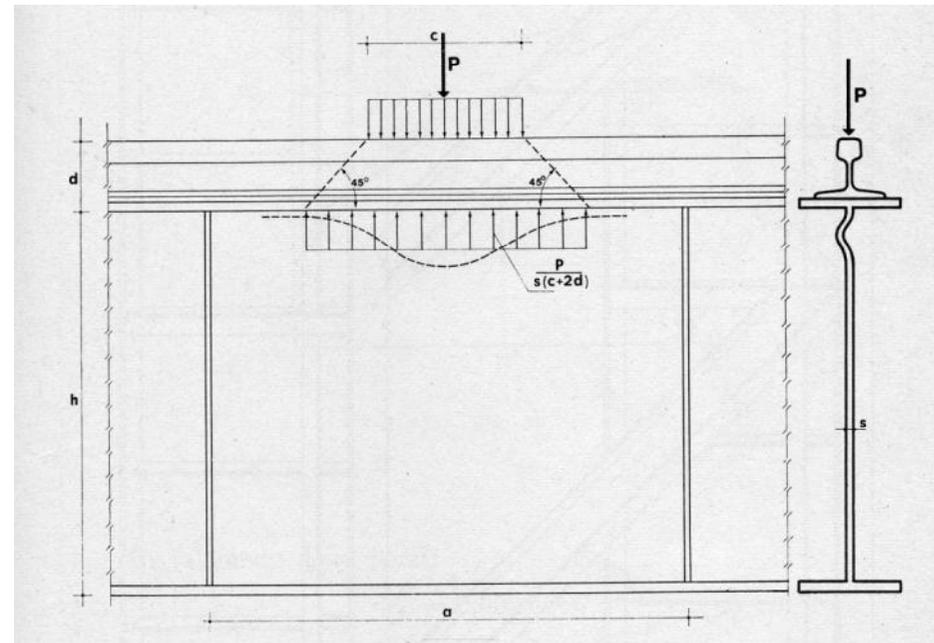
Instabilità dell'anima per carichi concentrati

L'anima può andare incontro ad instabilità locali o eccessive deformazioni plastiche in presenza di carichi concentrati (es. carichi trasmessi alle vie di corsa dalle ruote di una gru).

Si ipotizza che il carico interessi un pannello avente altezza "h" e larghezza λ pari alla minima tra "a" ed "h".

Si calcola quindi una tensione media nel pannello data da:

$$\sigma_p = \frac{P}{\lambda \cdot s} \quad \lambda = \min(a, h)$$



Instabilità dell'anima per carichi concentrati

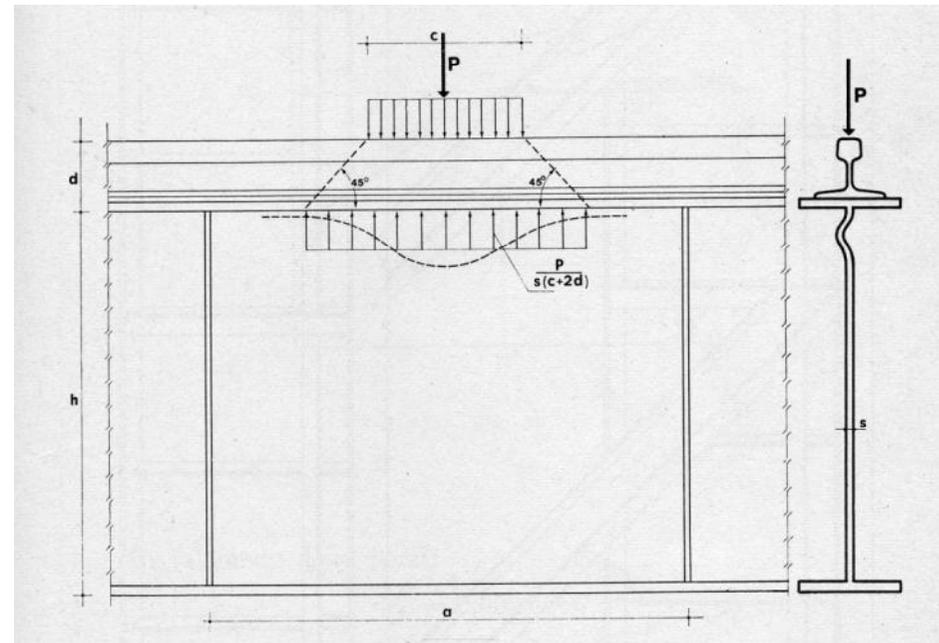
Si calcola inoltre la tensione critica di confronto sul pannello

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{L^2 A} \quad J = \frac{\lambda s^3}{12} \quad A = \lambda s \quad L = h$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E \frac{\lambda s^3}{12}}{h^2 \lambda s} = \frac{\pi^2 E s^2}{12 h^2}$$

Secondo alcune normative, è opportuno un fattore correttivo legato alla forma del pannello:

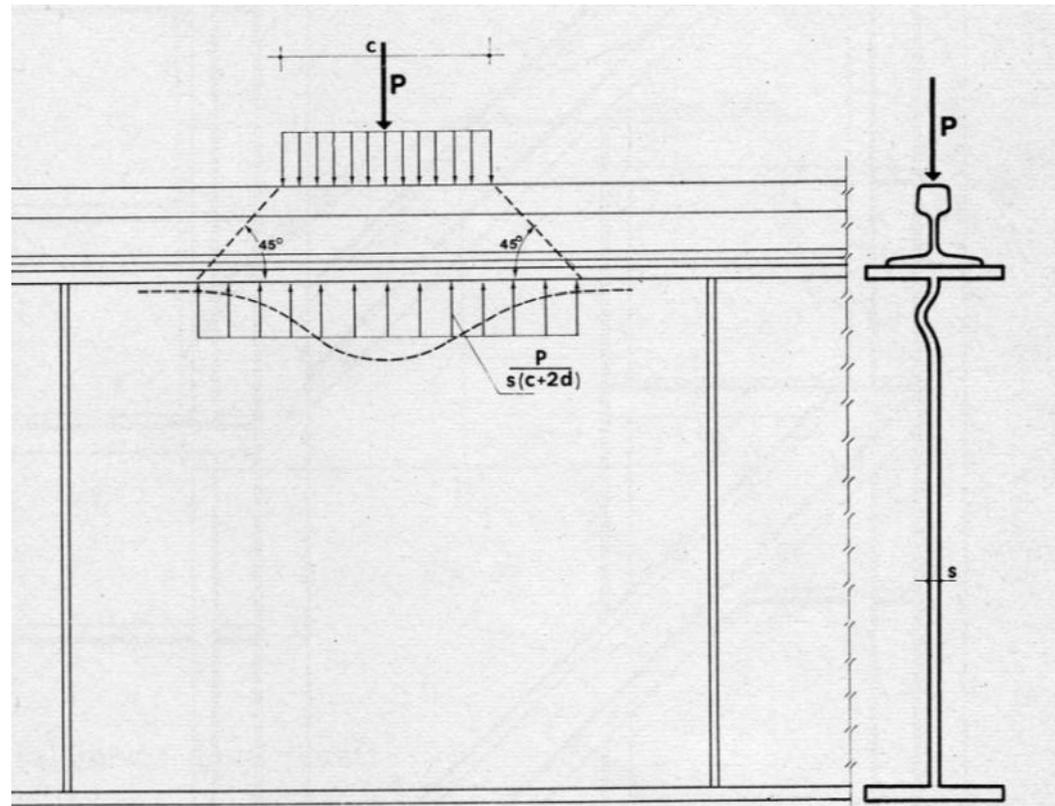
$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(1 + 2 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \frac{s^2}{h^2}$$



Instabilità dell'anima per carichi concentrati

Al fine di evitare eccessive deformazioni plastiche nella zona dell'anima sottostante il carico, si verifica inoltre che risulti:

$$\sigma_{p0} = \frac{P}{s(c+2d)} \leq \sigma_{amm}$$





Giunzioni tra elementi strutturali di telai

Le giunzioni possono essere realizzate tramite:

- saldatura
- bulloni operanti a taglio
- bulloni operanti ad attrito

Esse riguardano principalmente:

- elementi strutturali consecutivi (giunzioni trave-trave)
- elementi strutturali ortogonali (giunzioni trave-colonna)

Dal punto di vista strutturale devono poter trasmettere:

- solo forze normali e di taglio (nodi cerniera)
- forze normali, di taglio e momenti flettenti (noi incastro)

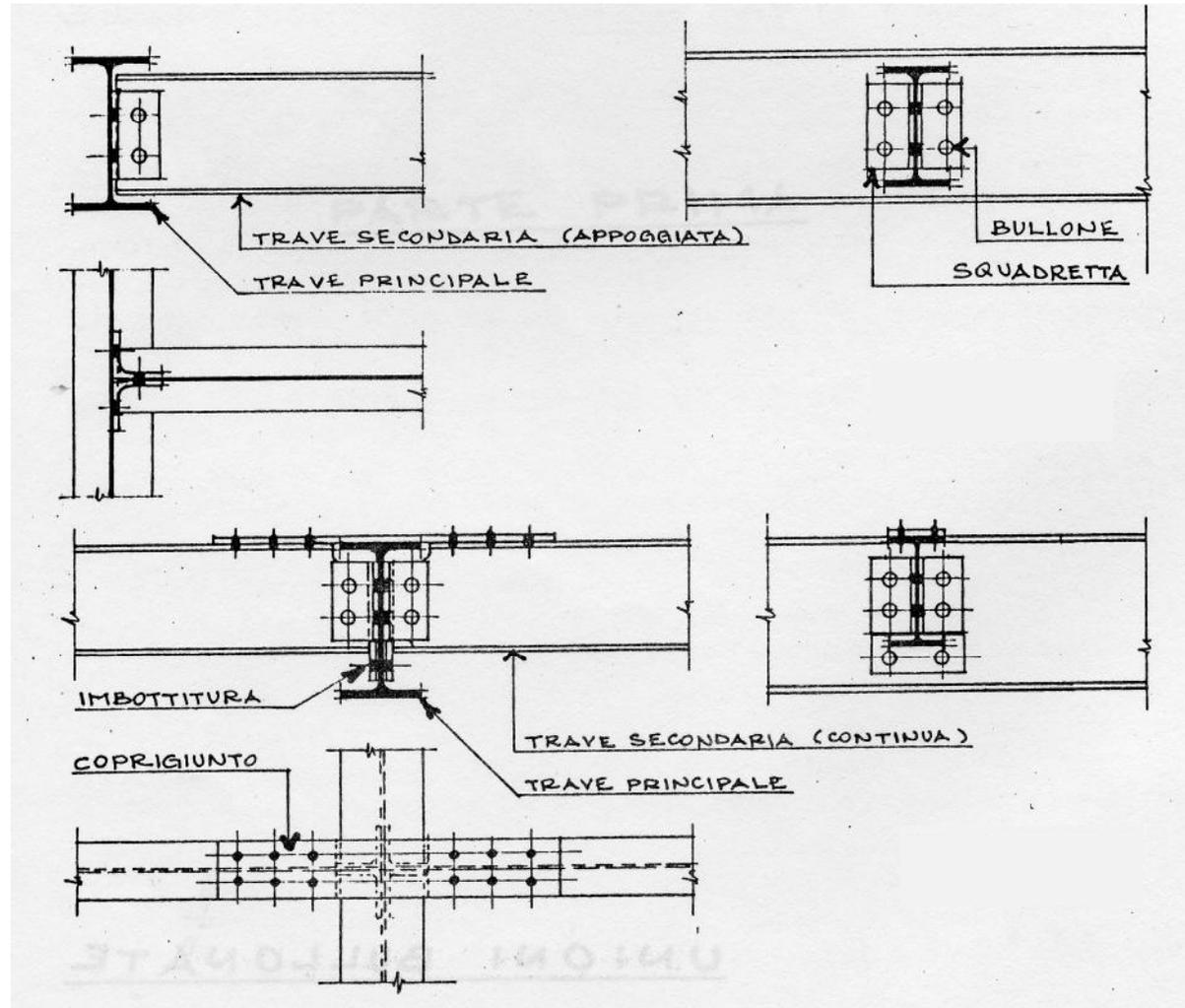


Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Giunzioni trave-trave

Nodo cerniera

I nodi cerniera connettono la sola anima, attraverso la quale passa la maggior parte della sforzo di taglio. Sono solitamente realizzati con bulloni.

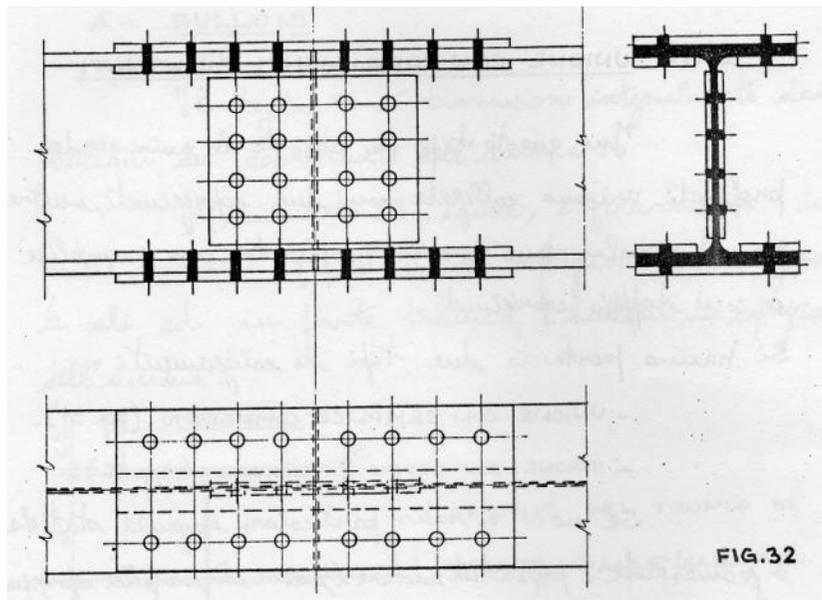


Giunzioni trave-trave

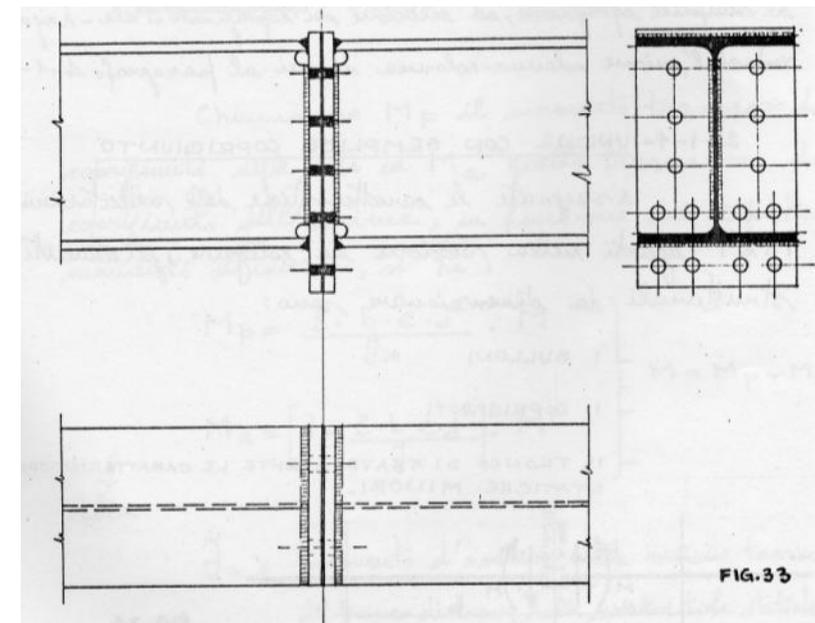
Nodo incastro

I nodi incastro, trasmettendo sia il taglio che il momento, devono connettere solidamente sia l'anima che le piattabande. Sono realizzabili con bulloni o saldature.

Giunzione tra travi a doppio T a doppio coprigiunto



Giunzione tra travi a doppio T a flangia





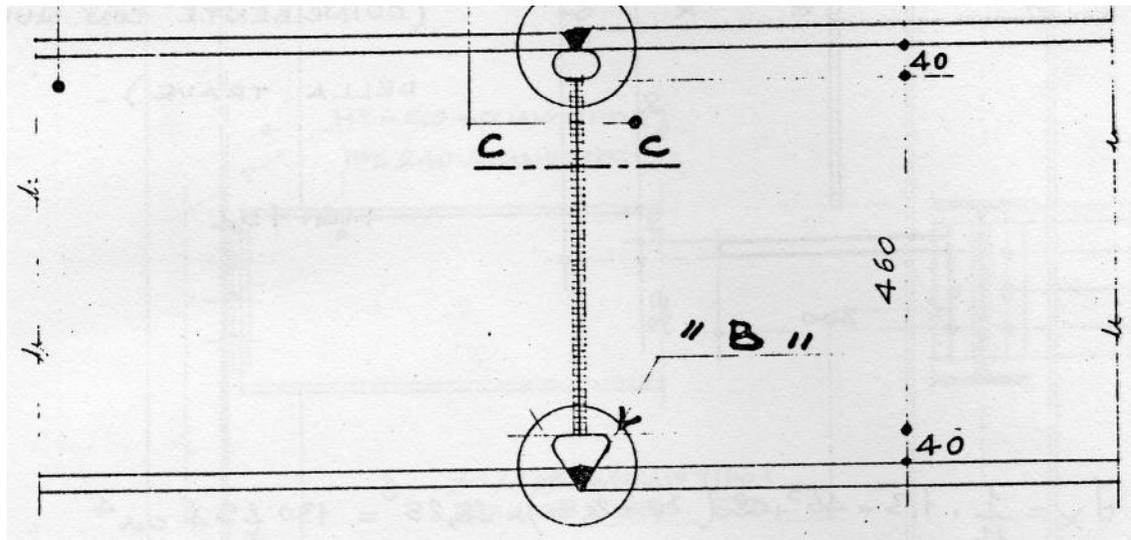
Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

Giunzioni trave-trave

Nodo incastro

I nodi incastro, trasmettendo sia il taglio che il momento, devono connettere solidamente sia l'anima che le piattabande. Sono realizzabili con bulloni o saldature.

Giunzione tra travi a doppio T con saldature di testa



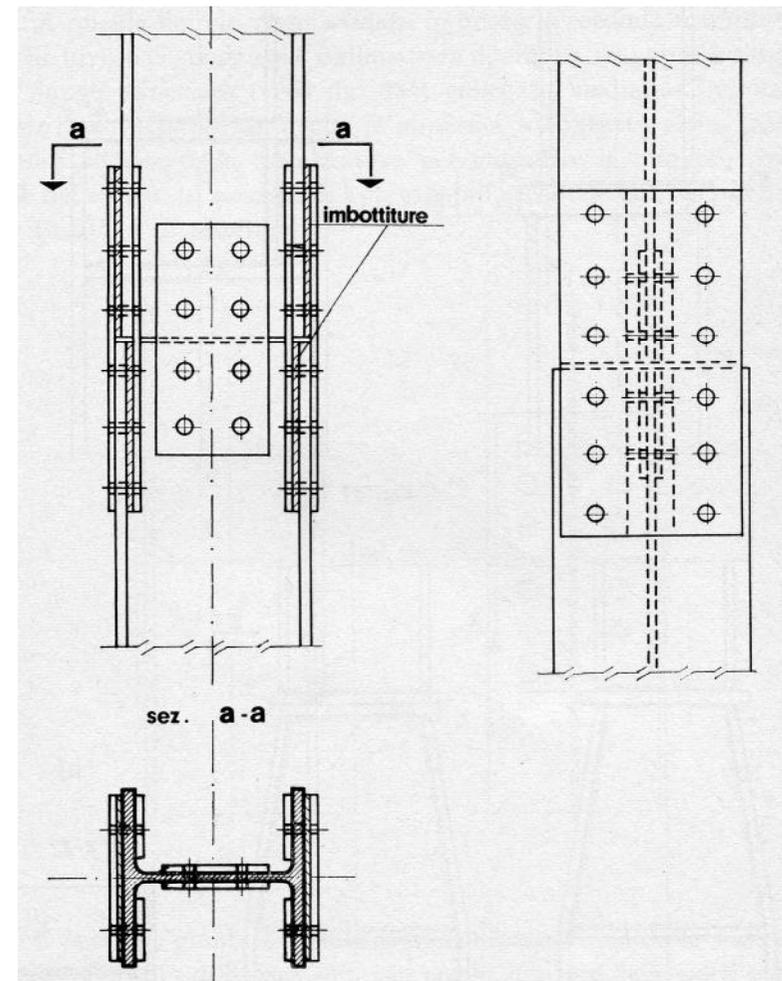


Giunzioni trave-trave

Nodo incastro

Caso di giunzioni tra travi di diversa dimensione.

Giunzione bullonata a doppio coprigiunto ed "imbottiture" tra travi a doppio T di dimensione diversa

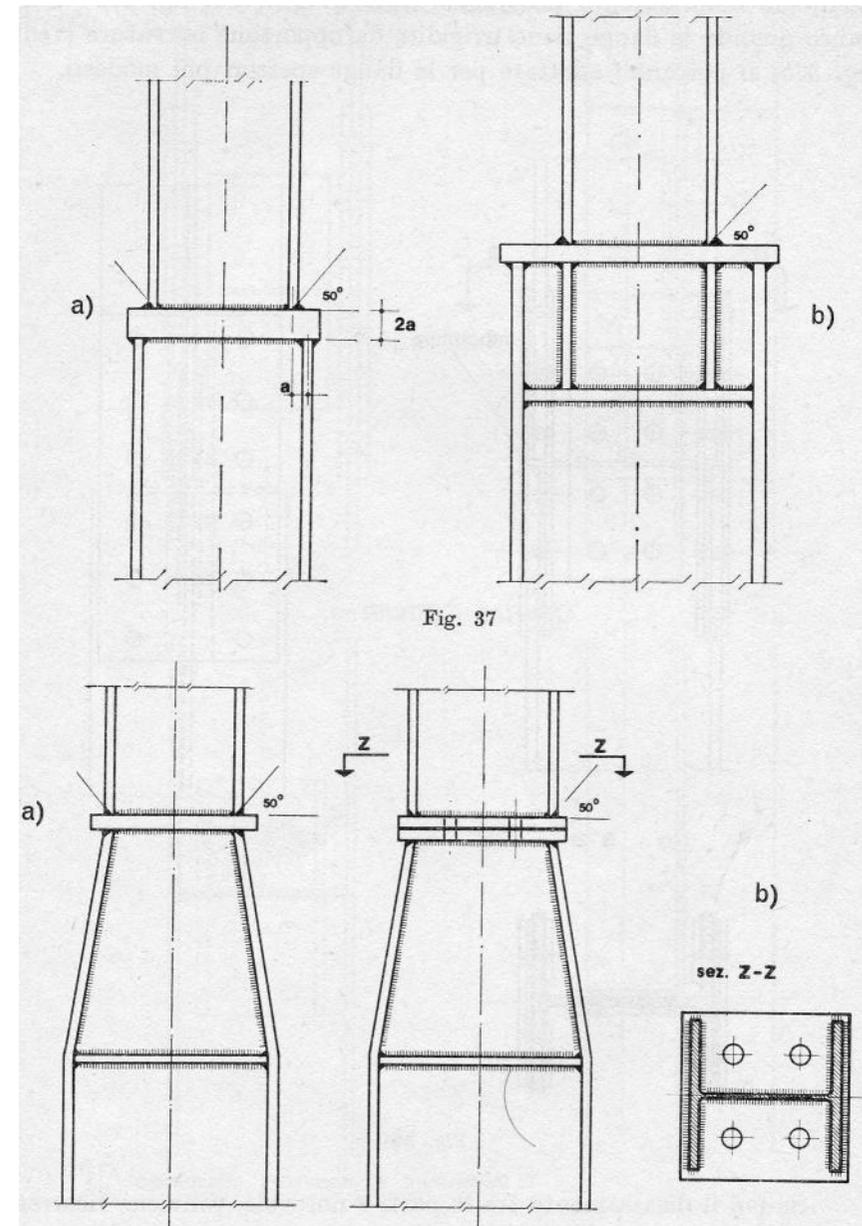


Giunzioni trave-trave

Nodo incastro

Caso di giunzioni tra travi di diversa dimensione.

Giunzioni saldate e flangiate tra travi a doppio T di dimensione diversa





Giunzioni trave-colonna

Nodo cerniera

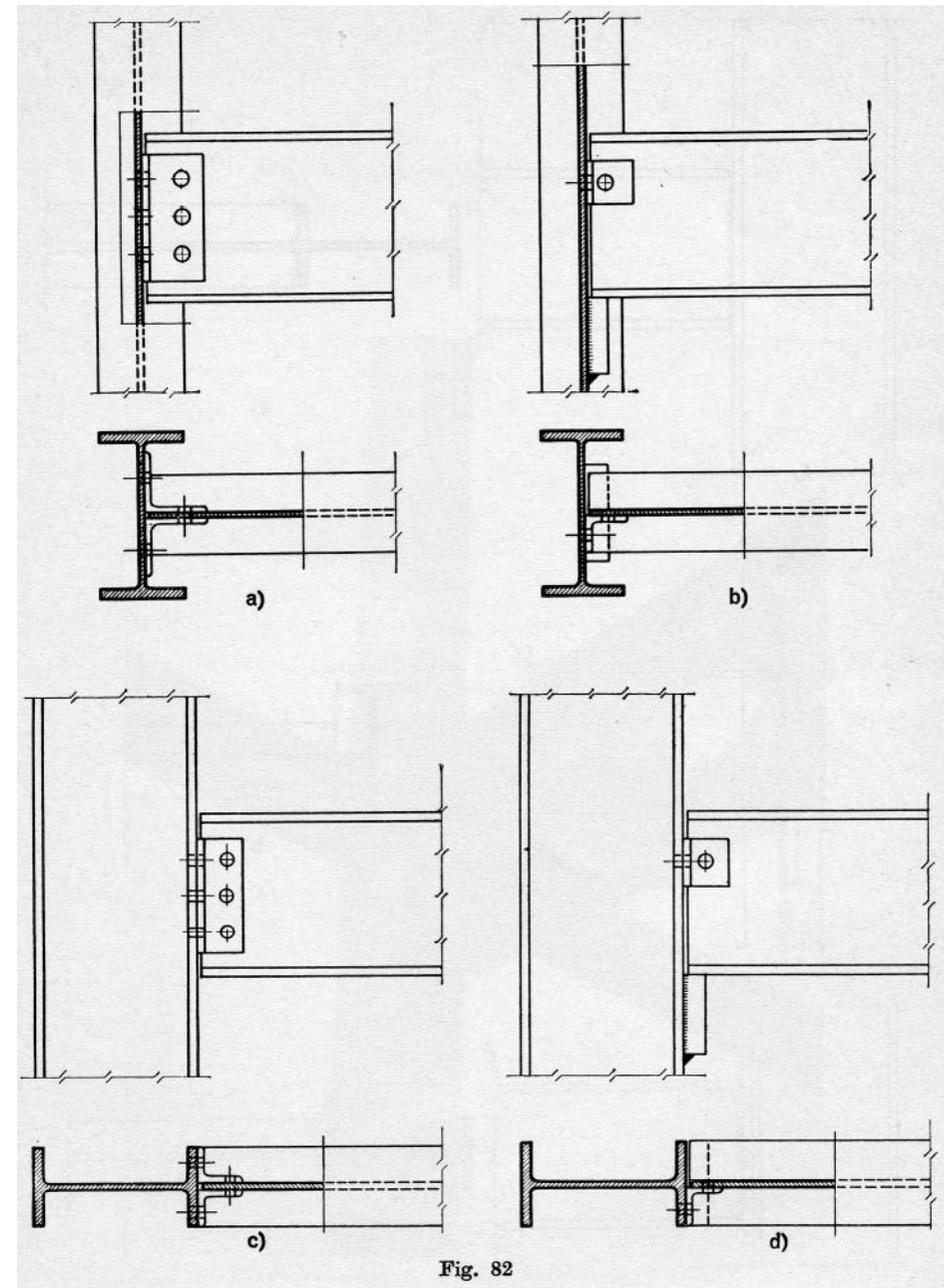


Fig. 82

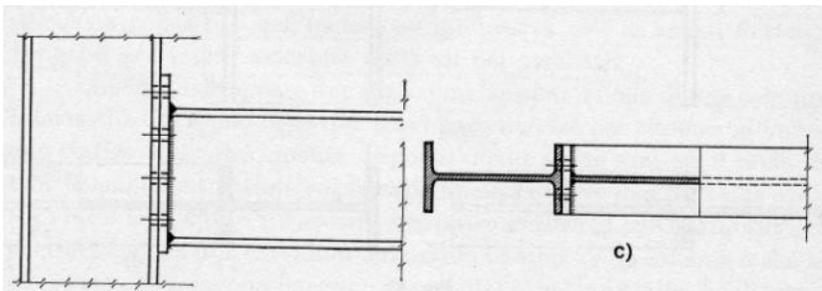


Lezioni su "Costruzione di telai e strutture meccaniche"

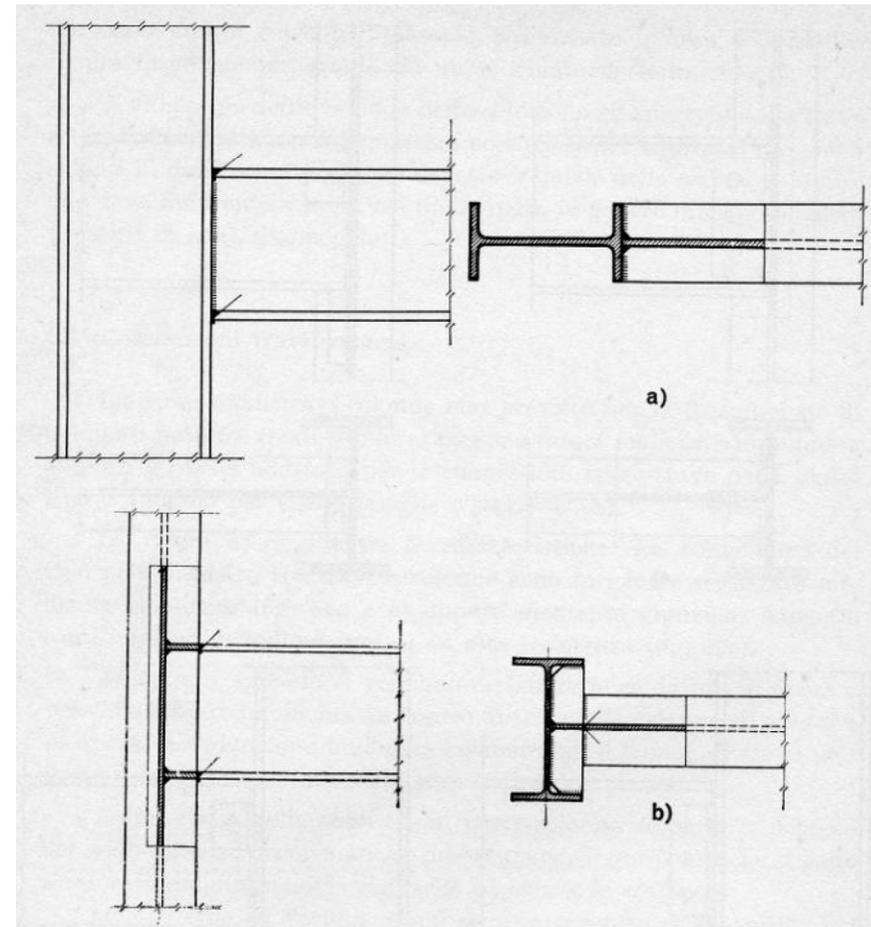
Giunzioni trave-colonna

Nodo incastro

Giunzioni flanquate tra travi a doppio T



Giunzioni saldate tra travi a doppio T



Giunzioni trave-colonna

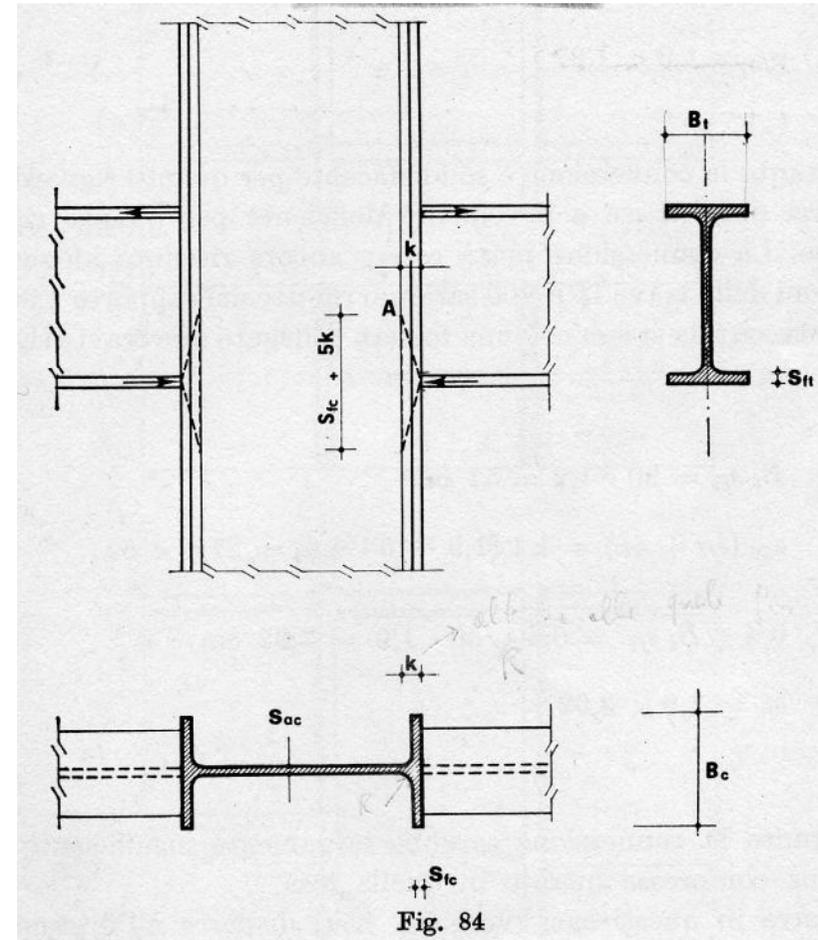
Nodo incastro "a due vie" senza rinforzi

Verifica imbozzamento anima colonna (calcolo a collasso, ripristino della sezione)

$$s_{ac} (s_{ft} + 5k) \geq B_t s_{ft}$$

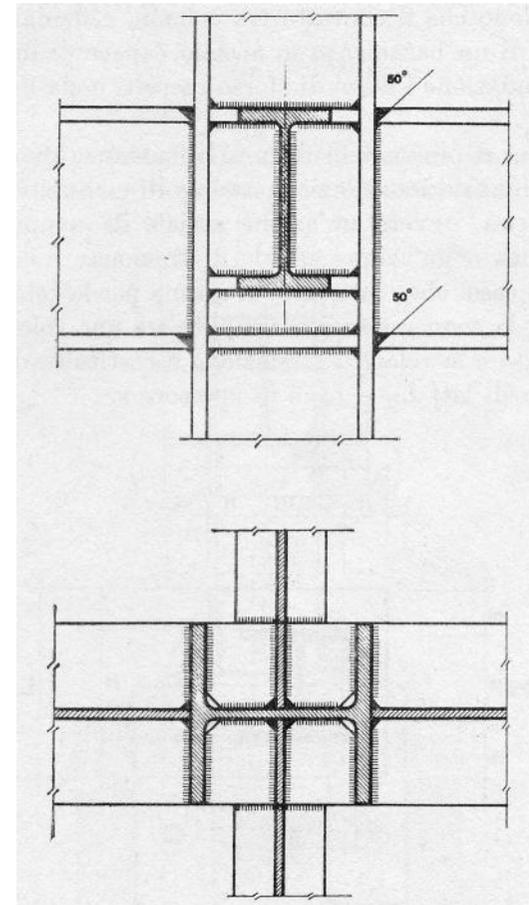
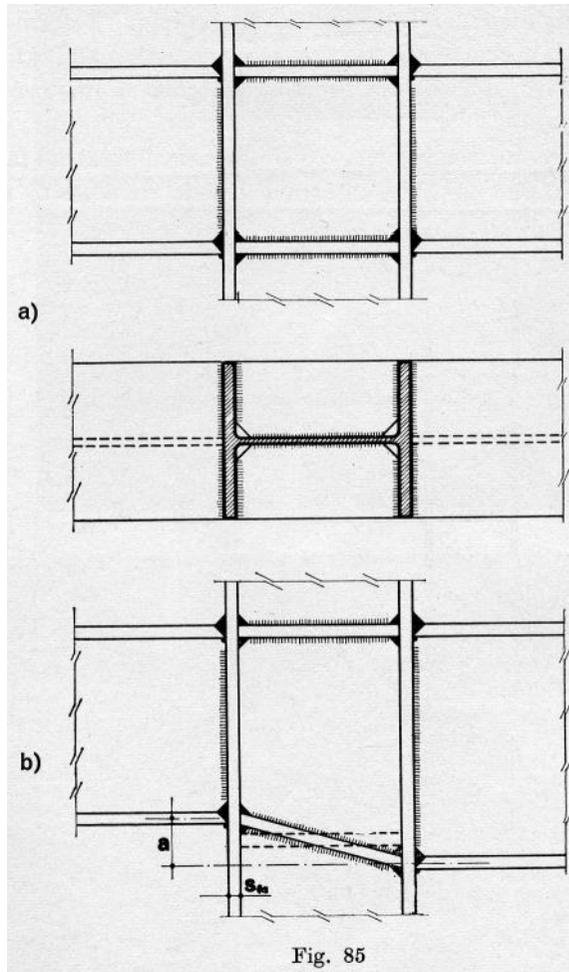
Verifica strappamento ala colonna (calcolo a collasso, ripristino della sezione)

$$s_{fc} \geq 0.4 \sqrt{B_t s_{ft}}$$



Giunzioni trave-colonna

Nodo incastro "a due (o più) vie" con rinforzi





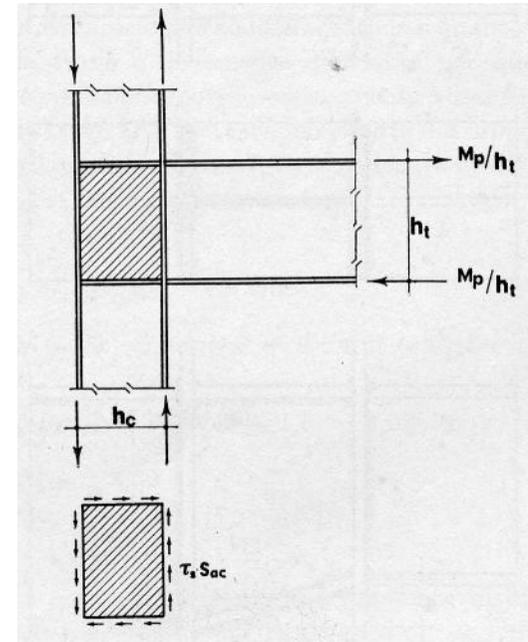
Giunzioni trave-colonna

Nodo incastro "a una via" (di estremità)

In questo caso i rinforzi sono sempre consigliabili. Si tratta inoltre di verificare la capacità del pannello di anima della colonna di trasferire alle ali di quest'ultima i carichi derivanti dalle ali della trave.

Momento trasferibile per taglio dal pannello:

$$M = \tau_{amm} s_{ac} h_c h_t$$



Giunzioni trave-colonna

Nodo incastro "a una via" (di estremità)

Se necessario, si può aumentare lo spessore dell'anima tramite pannelli saldati, oppure inserire un diagonale saldato (preferibilmente teso, in base al verso del momento).

