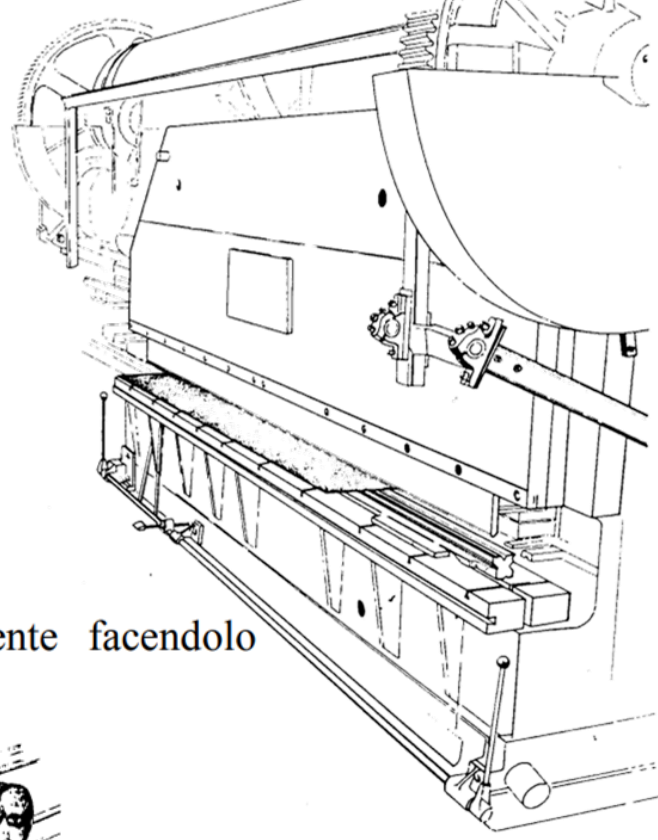
Costruzioni in Acciaio

Profili sagomati (formati) a freddo (CFS)

Profili CFS



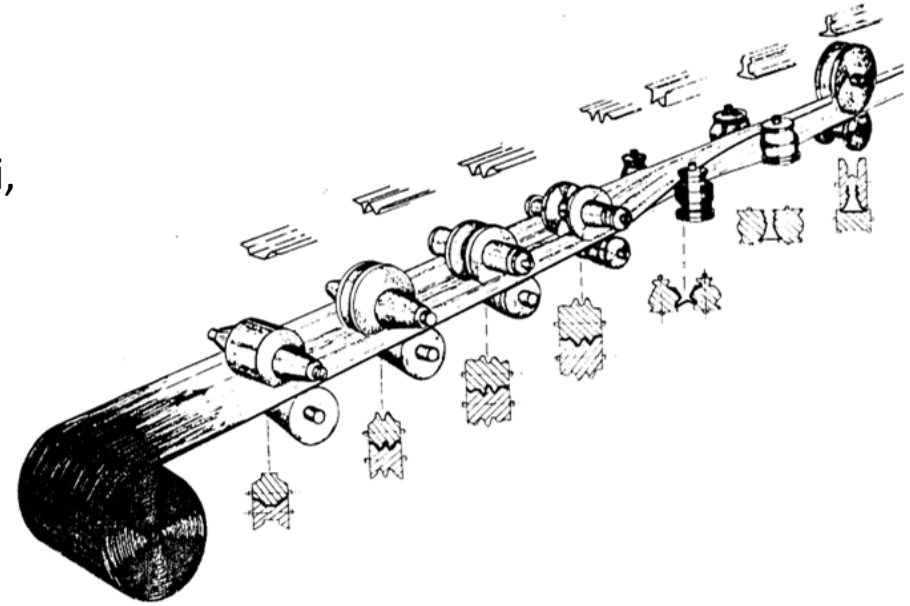
- Sono elementi ottenuti formando a freddo una lamiera d'acciaio

- Procedimenti per ottenerli:

− stampaggio alla pressa

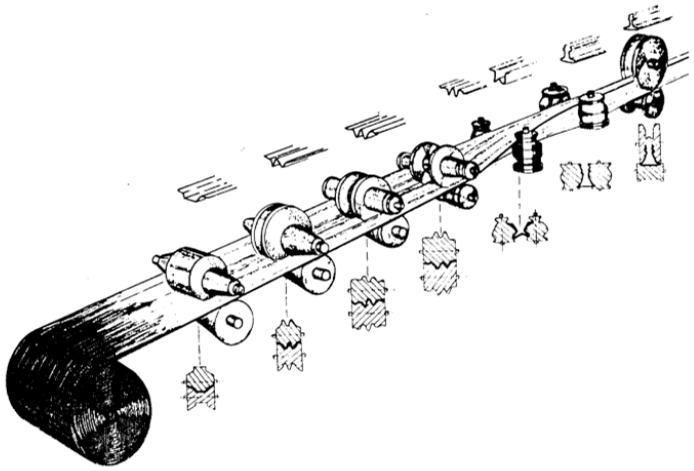
− laminazione stampaggio alla pressa: il nastro d'acciaio viene pressato, a singoli tratti, su uno stampo

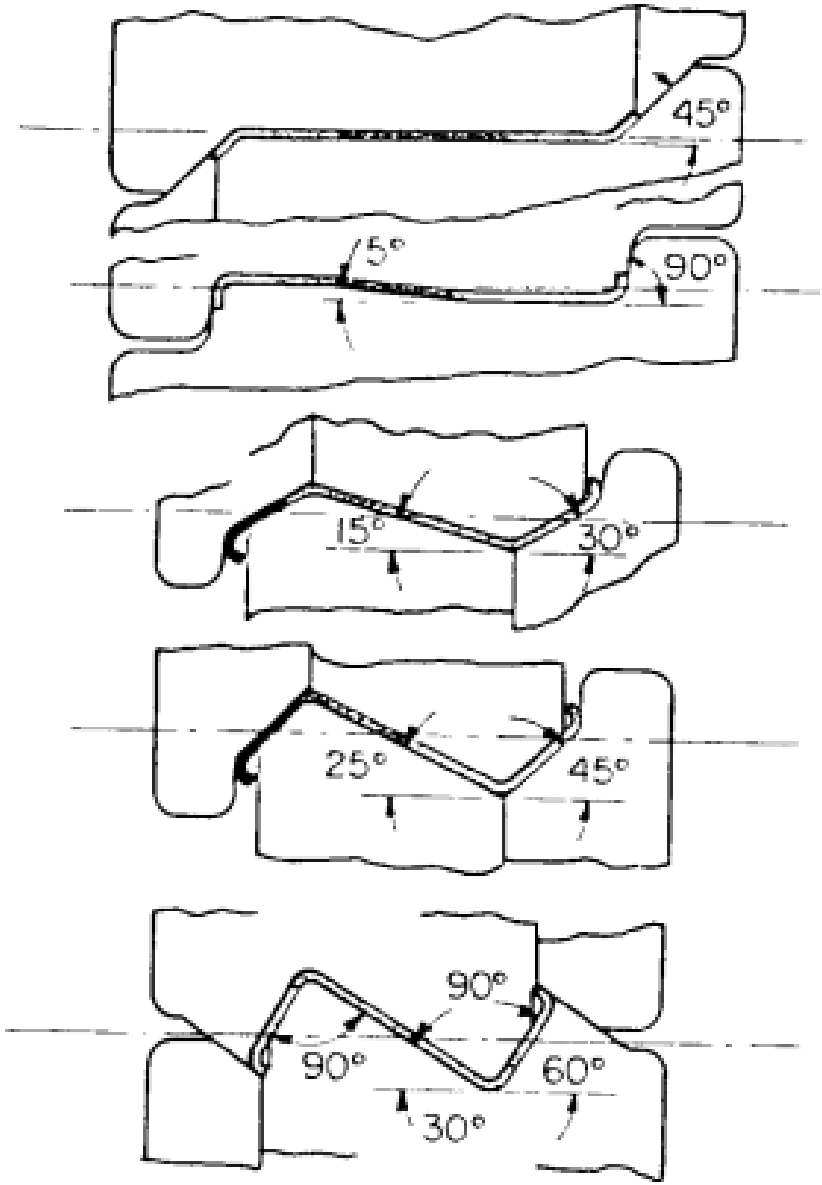
il nastro d'acciaio viene deformato gradualmente facendolo passare attraverso coppie di rulli



Profili CFS

il nastro d'acciaio viene deformato gradualmente facendolo passare attraverso coppie di rulli





Vantaggi della laminazione

- alta capacità produttiva
- notevole precisione dimensionale
- possibilità di sagomare lamiera verniciata o rivestita

- la convenienza economica del procedimento dipende soprattutto da: (a) complessità del profilo (b) quantità da produrre

Profili CFS

- Il profilato a freddo ricavato da nastro di acciaio viene da oltre un secolo impiegato nei settori delle scaffalature, degli infissi, ecc.
  Sono in questi ultimi anni esso si sta affermando anche in campo strutturale.

- I principali fattori del suo sviluppo sono:
  - Più approfondite conoscenze del comportamento di questi profili sotto carico e sulle sue metodologie di calcolo
  - L'emissione di normative specifiche
  - Il processo di fabbricazione, che consente di ottimizzare la forma e le dimensioni del profilo.

- Su quest'ultimo aspetto vale la pena sottolineare che la massima economia di materiale si ottiene quando tutti i modi possibili di collasso avvengono contemporaneamente e quindi sta al progettista la scelta dei profili in modo che non si verifichi il collasso per una sola forma di instabilità.

Profili CFS

- La disponibilità dei profili è quasi illimitata

- Il mercato è in grado di rispondere con una serie di gamme dimensionali molto vaste in grado di soddisfare le esigenze di impiego più ricorrenti

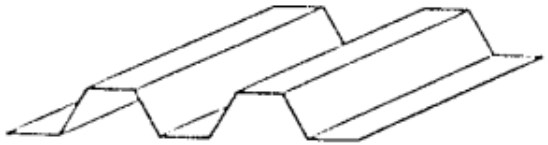
- I profili possono inoltre essere forniti già protetti contro la corrosione per mezzo di zincatura e/o verniciatura e già predisposti all'impiego con operazioni di taglio a misura e foratura

- Dal punto di vista teorico, lo studio di questi profili riprende essenzialmente il problema della stabilità locale in quanto, dato l'**alto rapporto b/t**, questo fenomeno accade in genere prima che sia raggiunta la tensione di snervamento nel materiale. Anche se da un punto di vista teorico era già stato risolto da **Von Karman** nel 1910 il problema relativo allo studio in campo post-critico di un pannello compresso, non ci sono state applicazioni pratiche di questa teoria fino a quando, attorno agli anni '50, Winter condusse una serie molto importante di prove sperimentali presso la Cornell University, che portarono ad una serie di indicazioni tutt'oggi ancora valide

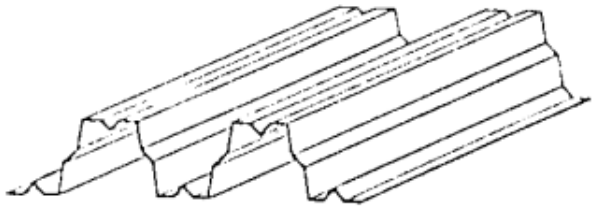
- Studiando il comportamento di questi elementi in fase post-critica, in particolare, si è visto che le riserve di resistenza del profilo sono in genere molto elevate

Profili CFS: lamiere grecate

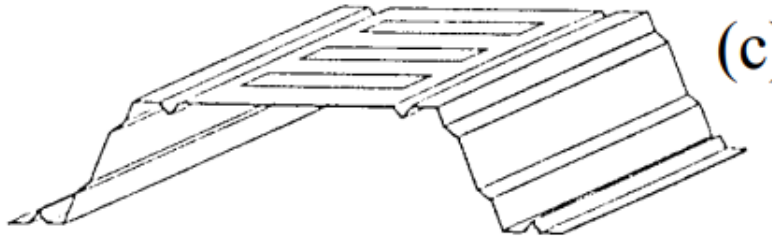
spessore t $\quad 0.5 \leq t \leq 4.0$ mm



(a)

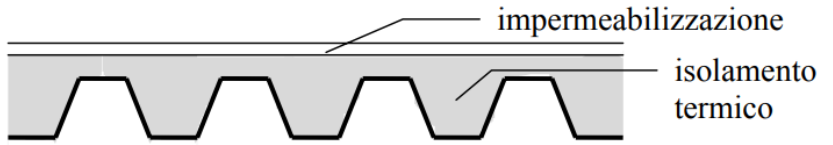


(b)

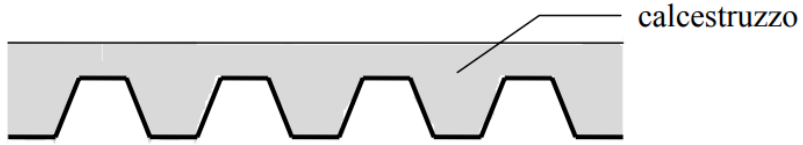


(c)

usate per coperture non praticabili (in genere già predisposte con isolamento termico e impermeabilizzazione)



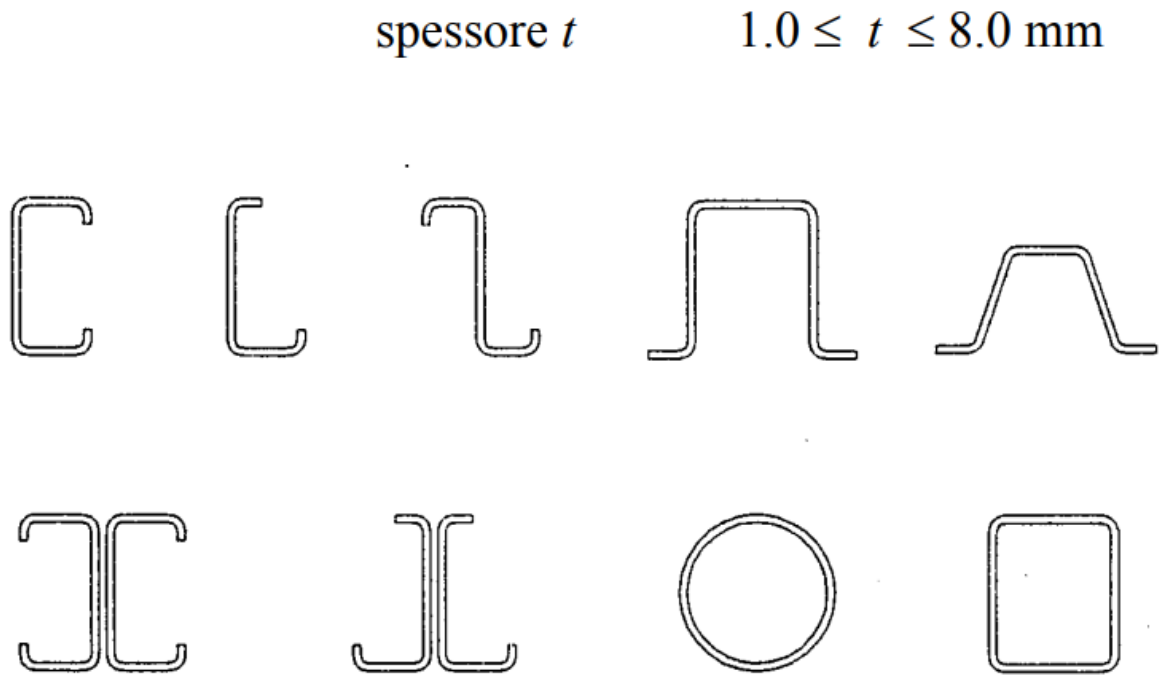
oppure per solai praticabili (in genere con soletta in calcestruzzo, eventualmente armata con una rete)



Massima luce per le tipologie usuali

- (a)-(b): da 1.50 m a 3.00 m
- richiedono quindi travi secondarie (arcarecci)
- dimensioni della greca molto maggiori (c) consentono di evitare le travi secondarie

Profili CFS: elementi strutturali



Tipi di impiego

- elementi secondari (arcarecci) che sostengono la lamiera grecata di una copertura (di solito sezioni a C o a Z)
- aste di travature reticolari (in particolare per luci non molto elevate, fino a 15 m)
- travi principali (di solito sezioni a C accoppiate)
- colonne (sezioni scatolari o anche sezioni a Ω accoppiate a formare uno scatolare)
- N.B. aspetto critico per l'utilizzazione come travi e colonne in zona sismica è la duttilità

Esempio

Esempio di realizzazione a secco con colonne in profili laminati a caldo e travi in profili sottili formati a freddo - foto: Scaff System srl

Esempio

Vista di un sistema costruttivo in profili sottili formati a freddo - foto: Cogi srl

Effetti della lavorazione CFS

INCRUDIMENTO

– aumento del limite elastico f_y (fino al 50% in più) ed anche della tensione di rottura fu (molto di meno)

per l'Eurocodice 3, parte 1-3 [2.4 (1)]

considerare per tutta la sezione un'unica tensione di snervamento f_{ya}, maggiorata rispetto a quella del materiale base f_{yb}

$$f_{ya} = f_{yb} + \left(\frac{C\,N\,t^2}{A_g}\right)\left(f_u - f_{yb}\right) \qquad \leq \quad 0.5\left(f_u + f_{yb}\right)$$

con:

t spessore della lamiera prima della formatura (mm)

A_g area geometrica della sezione trasversale

C coefficiente funzione del tipo di processo di piegatura
- C=7 per piegatura in continuo
- C=5 per altri tipi di piegatura

N numero degli angoli a 90° presenti nella sezione aventi un raggio di curvatura minore di 5 t

– riduzione della duttilità e della resilienza

Effetti della lavorazione CFS

RIDUZIONE DELLO SPESSORE

l'Eurocodice non fornisce indicazioni specifiche
le norme inglesi valutano lo spessore ridotto t_{rid}

$$t_{rid} = \left(\frac{r + k\,t}{r + 0.5\,t} \right) t$$

con r raggio interno di piegatura
k $= 0.35$ per $r \geq 1.5\,t$

TENSIONI RESIDUE

di tipo flessionale, cioè variabili lungo lo spessore e a risultante nulla nello spessore

hanno influenza sull'instabilità locale (imbozzamento) ma non direttamente sul comportamento globale

Problemi principali

Corrosione

- superabile con opportuno trattamento della superficie (zincatura, ecc.)

Ridotta resistenza al rifollamento nei collegamenti bullonati

- porta problemi alla progettazione dei giunti, che possono essere condizionanti nel progetto della membratura

Bassa rigidezza torsionale

- è dovuta alla piccolezza dello spessore ed alla forma quasi sempre aperta della sezione
- in molti casi il comportamento è ulteriormente peggiorato dalla mancanza di assi di simmetria

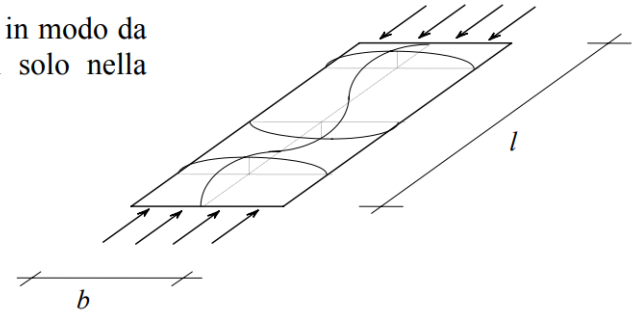
Instabilità locale

- si manifesta con ondulazioni delle parti della sezione soggette a compressione, con lunghezza d'onda dello stesso ordine di grandezza della larghezza della parte instabilizzata
- limita la resistenza e la duttilità
- riduce la rigidezza dell'asta i suoi effetti possono cumularsi a quelli dell'instabilità globale

Instabilità locale di profili CFS

LASTRA COMPRESSA

vincolata lungo i bordi in modo da consentire spostamenti solo nella direzione del carico



Lastra ideale

- priva di imperfezioni e costituita da materiale linearmente elastico

Carico critico:

le ondulazioni che si formano hanno una lunghezza d'onda comparabile con la larghezza b

la soluzione delle equazioni della superficie elastica fornisce,

tenendo conto che $I = \frac{b\,t^3}{12}$ $A = b\,t$:

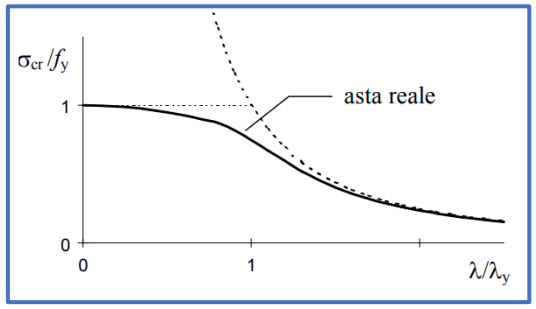
$$N_{cr} = \frac{k\,\pi^2\,E\,I}{(1-\nu^2)\,b^2} = \frac{k\,\pi^2\,E\,t^3}{12\,(1-\nu^2)\,b}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{k\,\pi^2\,E}{12\,(1-\nu^2)\,(b/t)^2}$$

con

$$k = \left(\frac{l}{m\,b}\right)^2 + 2 + \left(\frac{m\,b}{l}\right)^2 \qquad \text{e} \qquad m = \text{numero di semi-onde}$$

quando $l > 4$ si ha $k \cong 4$



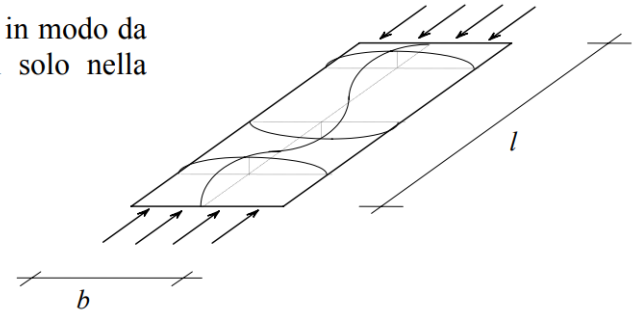
Comportamento post-critico:

- quando si raggiunge il carico critico, lo sbandamento fuori piano causa l'allungamento delle fibre trasversali, che tendono quindi a limitarlo grazie alla loro rigidezza estensionale
- per questo motivo:
  - è possibile aumentare ulteriormente il carico
  - la rigidezza assiale della lastra si riduce (fino al 40% del valore iniziale) ma non si annulla

Instabilità locale di profili CFS

LASTRA COMPRESSA

vincolata lungo i bordi in modo da consentire spostamenti solo nella direzione del carico



Lastra ideale

<u>Comportamento post-critico:</u>

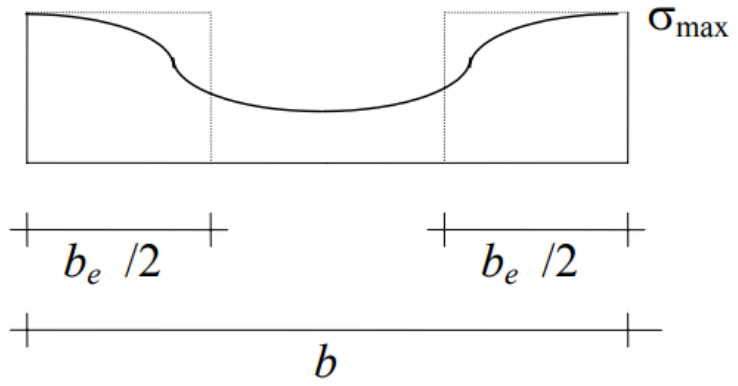
- per $N>N_{cr}$
  - ➢ le fibre longitudinali più vicine al bordo, più vincolate, sono più rigide di quelle centrali e portano un carico maggiore
  - ➢ il diagramma delle tensioni in mezzeria non è uniforme, ma ha un valore massimo in prossimità dei bordi e minimo al centro

Comportamento post-critico (VALUTAZIONE APPROSSIMATA)

$$N = \int \sigma \, db = \sigma_{max} \, b_{eff}$$

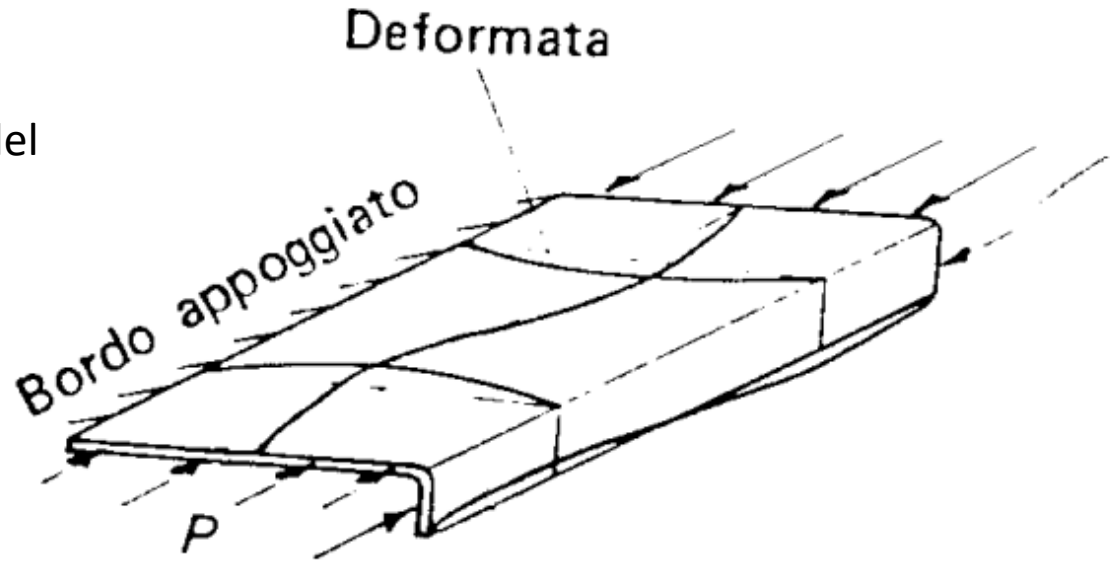
b_{eff} è detta ***larghezza efficace***

$$\sigma_{com} = \frac{k \, \pi^2 \, E}{12 \, (1 - \nu^2) \, (b_{eff} \, / \, t)^2}$$



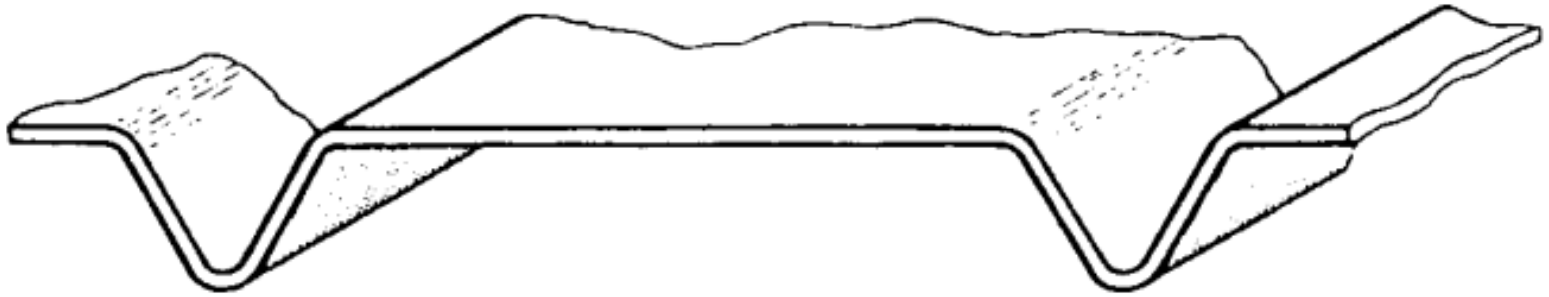
Irrigidimenti di bordo

- È il caso delle lastre con un bordo libero nella direzione del carico
- Il comportamento è analogo a quello della lastra in cui entrambi i bordi longitudinali sono vincolati
- Tuttavia, il suo carico critico è molto più basso
- La tensione critica può essere calcolata con le stesse espressioni valide per lastra appoggiata e entrambi i bordi, ponendo però k=0.45
- per annullare o limitare la riduzione del carico critico (e quindi della capacità portante) si possono aggiungere dei risvolti, denominati irrigidimenti di bordo

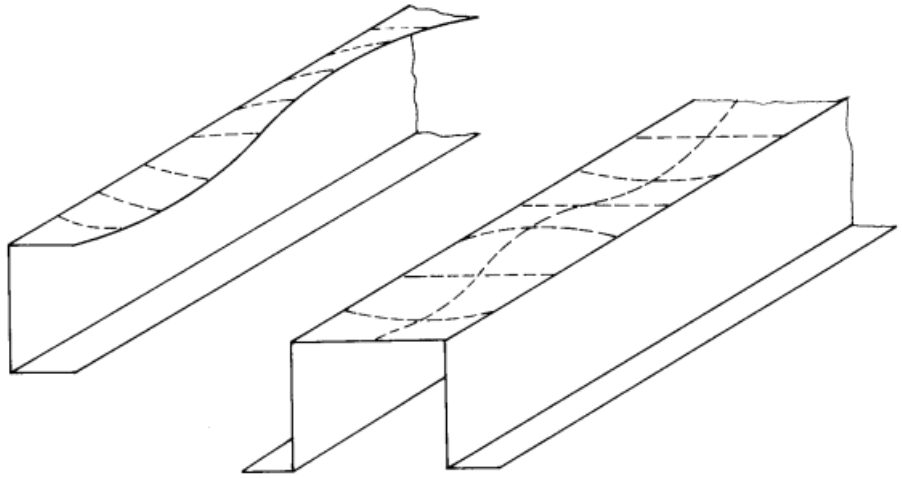


Lastre molto snelle

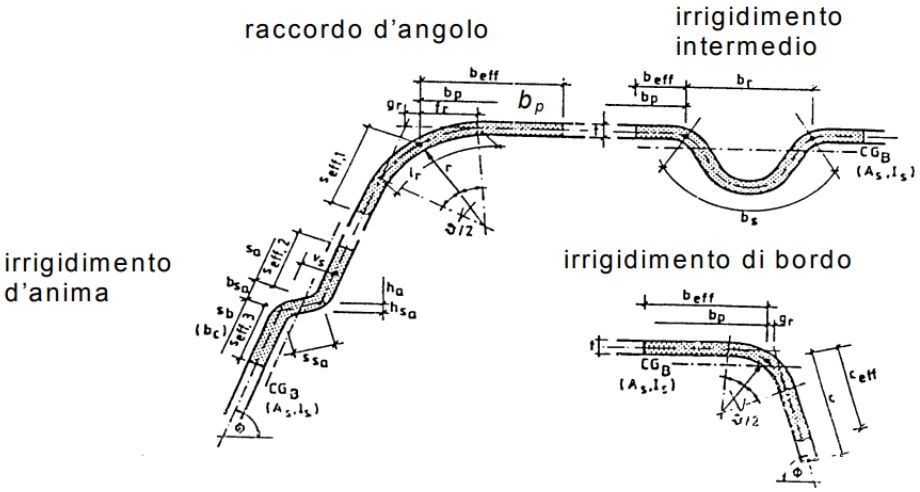
- La capacità portante è generalmente molto bassa
- Questo accade anche nei casi di lastre vincolate ad entrambi i bordi, nelle quali però il rapporto b/t è elevato
- In questi casi per aumentare la capacità portante si inseriscono delle nervature, dette irrigidimenti intermedi



Applicazioni su profili CFS



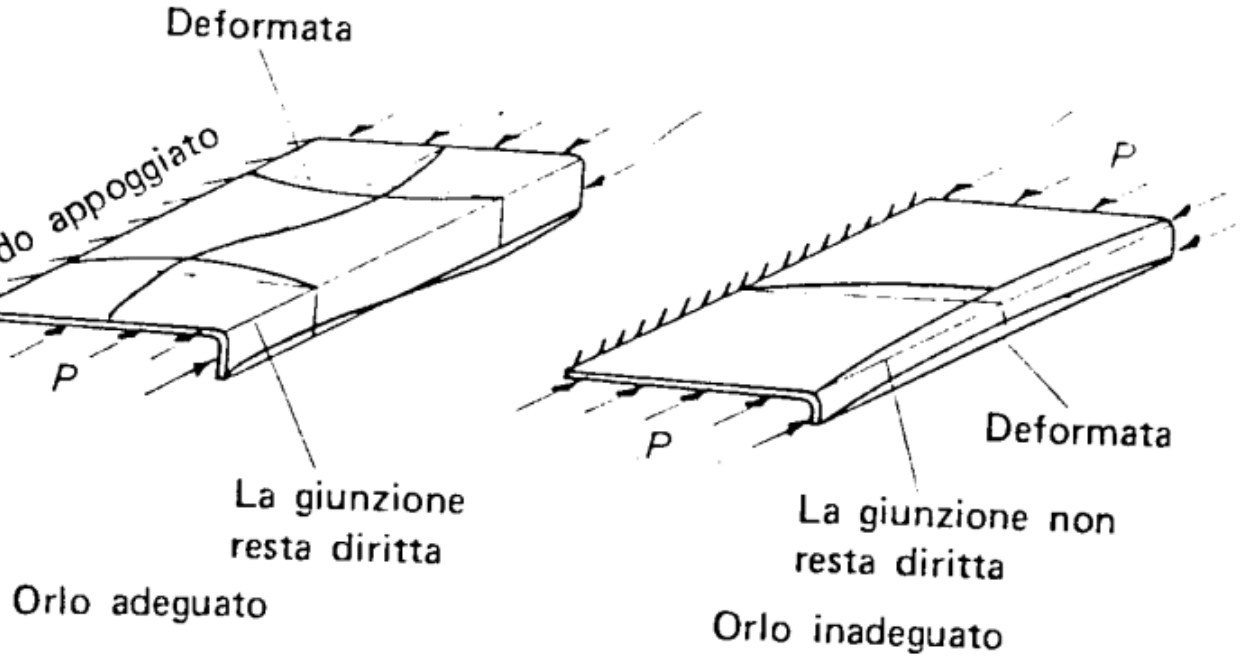
- Per l'analisi dell'instabilità locale, i profilati a freddo si considerano composti da un insieme di lastre piane
- Queste lastre sono mutuamente collegate lungo i bordi comuni
- per semplicità si assume che i bordi siano semplici appoggi
- Ciò significa che si trascura il possibile vincolo mutuo alla rotazione
- In presenza di irrigidimenti di bordo o intermedi sarà necessario verificare l'efficacia dell'irrigidimento, cioè la sua capacità di impedire spostamenti / deformazioni



Efficacia degli irrigidimenti di bordo

- Un elemento vincolato da un irrigidimento di bordo fornisce la stessa resistenza di un elemento con bordo fisso solo se l'irrigidimento si mantiene rettilineo

- Si calcola il carico critico del solo irrigidimento



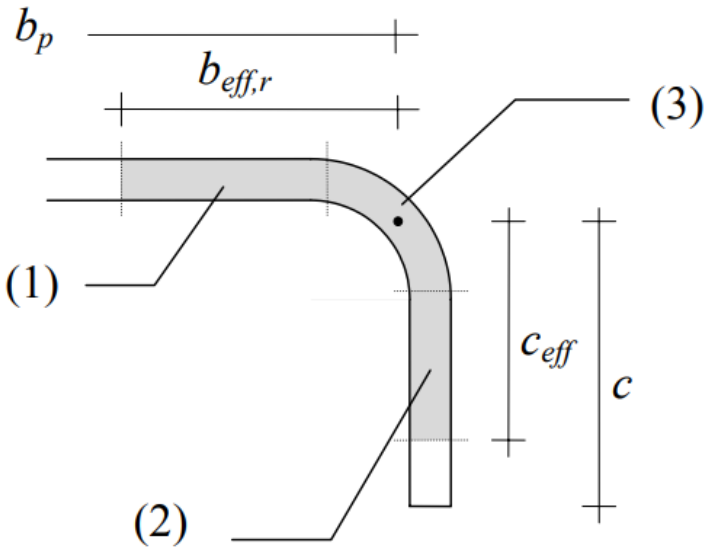
Efficacia degli irrigidimenti di bordo

- L'irrigidimento può essere considerato come un'asta compressa, che potrebbe instabilizzarsi
- Essa è però vincolata elasticamente al resto del profilo e ciò riduce il rischio di instabilità
- Nel valutare l'efficacia (e il rischio di instabilità) dell'irrigidimento, questo deve essere considerato come un'asta la cui sezione è costituita da tre parti:

  (1) parte efficace dell'elemento dal lato dell'irrigidimento

  (2) parte efficace dell'irrigidimento

  (3) raccordo circolare tra elemento e irrigidimento



si usano i seguenti simboli:

A_r area della sezione dell'irrigidimento

I_r momento d'inerzia della sezione dell'irrigidimento

Riduzione della capacità portante degli irrigidimenti di bordo

analogamente a quanto si deve fare per un'asta (vedi in seguito) si determina un coefficiente riduttivo χ in funzione della snellezza relativa adimensionalizzata $\bar{\lambda}_r = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,r}}$ con un coefficiente di imperfezione α=0.13

poiché l'irrigidimento fa parte della sezione ed occorre aggiungere il suo contributo (ridotto) a quello degli altri elementi, si considera convenzionalmente che questa riduzione di capacità portante si trasforma in una riduzione di spessore

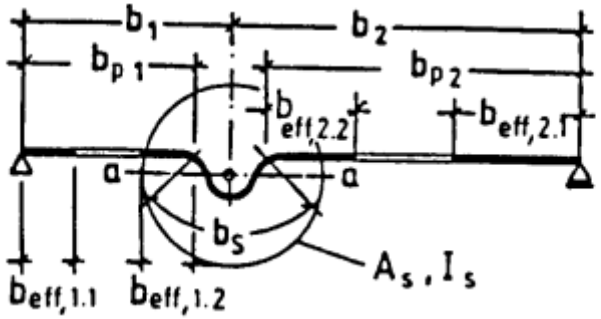
si considera quindi per le tre parti che compongono l'irrigidimento (visto come asta) uno spessore efficace $t_{eff} = \chi\, t$

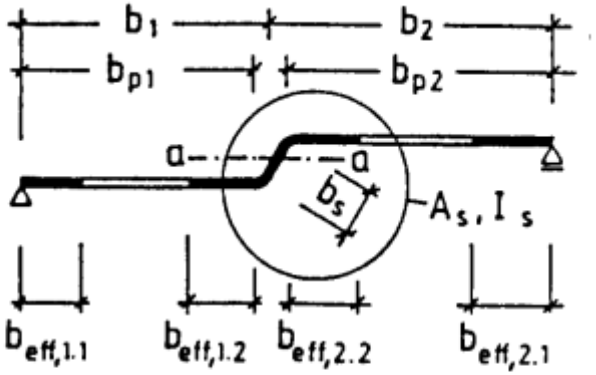
Efficacia degli irrigidimenti intermedi

- Anche in questo caso l'irrigidimento può essere considerato come un'asta compressa, vincolata elasticamente

- La sezione è costituita da tre parti:

(1) parte efficace dell'elemento da un lato dell'irrigidimento
(2) parte efficace dell'elemento dall'altro lato dell'irrigidimento
(3) irrigidimento vero e proprio





si usano i seguenti simboli:

A_s area della sezione dell'irrigidimento
I_s momento d'inerzia della sezione dell'irrigidimento

Efficacia degli irrigidimenti intermedi

la tensione critica, che corrisponde all'instabilizzazione dell'irrigidimento è anche in questo caso

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{C_s\, E\, I_s}}{A_s}$$

dove la costante elastica C_s può essere posta pari a

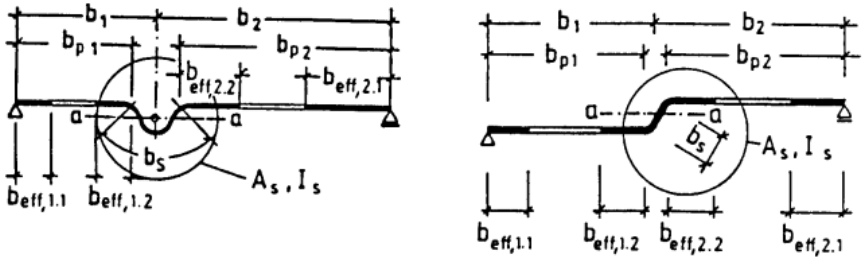
$$C_r = \frac{0.25\, E\, t^3\, (b_1 + b_2)}{(1-\nu^2)\, b_1^2\, b_2^2}$$

con b_1 e b_2 distanza dell'irrigidimento dai due bordi adiacenti

in funzione della tensione critica si calcola la snellezza relativa

$$\bar{\lambda}_s = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}}$$

e quindi, assumendo un coefficiente di imperfezione α=0.13, il coefficiente riduttivo χ e lo spessore efficace $t_{eff} = \chi\, t$



si usano i seguenti simboli:

- A_s area della sezione dell'irrigidimento
- I_s momento d'inerzia della sezione dell'irrigidimento

Resistenza - Trazione

in questo caso non esistono problemi di instabilità locale

la resistenza limite a trazione è fornita dalla relazione

$$N_{t,Rd} = \frac{f_{ya} \; A_g}{\gamma_{M0}}$$

essendo

f_{ya}	la tensione di snervamento media nella sezione
A_g	l'area della sezione geometrica del profilo
γ_{M0}	il coefficiente parziale di sicurezza (γ_{M0}=1.1)

in presenza di fori la resistenza limite sarà il minore tra il valore innanzi definito e la resistenza ultima della sezione netta, che dipende dall'area netta della sezione e dal tipo di collegamento

Resistenza - Compressione

(in assenza di problemi di instabilità globale)

l'instabilità locale può giocare un ruolo molto rilevante

la resistenza limite a compressione è fornita dalla relazione

$$N_{c,Rd} = \frac{f_y \ A_{eff}}{\gamma_{M1}}$$

essendo

f_y	la tensione di snervamento caratteristica nella sezione, pari a f_{ya} quando la sezione è tutta efficace, f_{yb} quando la sezione lo è solo parzialmente
A_{eff}	l'area della sezione efficace del profilo
γ_{M1}	il coefficiente parziale di sicurezza (γ_{M1}=1.1)

Resistenza - Compressione

(in assenza di problemi di instabilità globale)

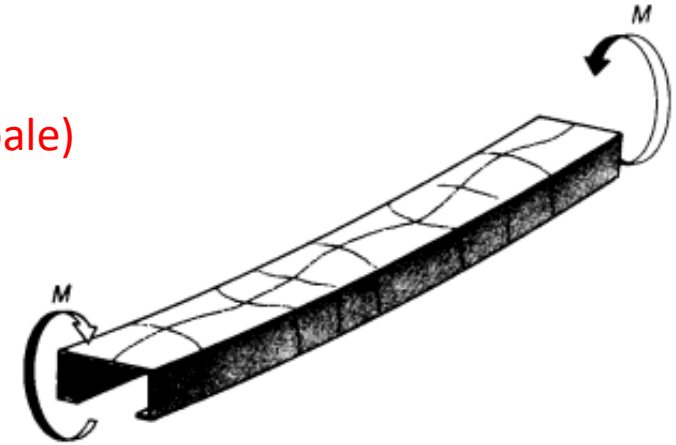
si procede quindi nel modo seguente:

- si calcola la larghezza efficace per tutti gli elementi che costituiscono la sezione, tenendo conto per ciascuno di essi del rapporto b_p / t e delle condizioni di vincolo agli estremi e considerando un diagramma di tensioni uniforme e pari a f_{ya}
- se per tutti gli elementi $b_{eff} = b$ si ha che $A_{eff} = A_g$
- in caso contrario si assume che la tensione sia pari a f_{yb} e si calcola di conseguenza la sezione efficace

ATTENZIONE: per sezioni che non hanno un doppio asse di simmetria vi può essere una eccentricità e_N tra il baricentro della sezione efficace e il baricentro della sezione geometrica. In questo caso andrà considerata la presenza di un momento flettente addizionale $\Delta M = N_{Sd}\, e_N$ il che comporta la necessità di verificare la sezione a pressoflessione

Resistenza - Flessione

(in assenza di problemi di instabilità globale)



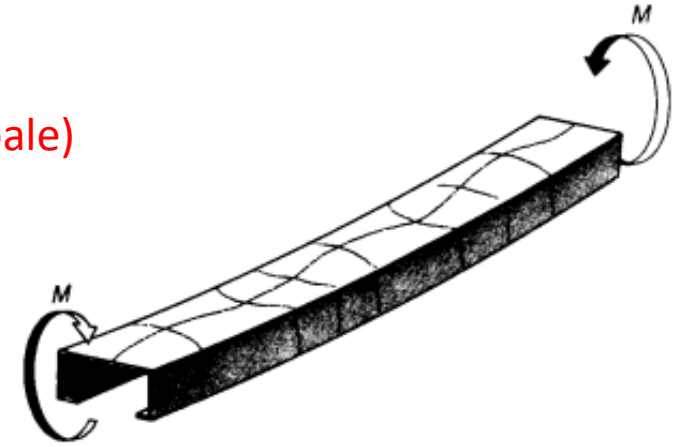
anche in questo caso l'instabilità locale può giocare un ruolo rilevante

occorre procedere in maniera iterativa:

- si valuta la posizione del baricentro della sezione geometrica
- si assegna un diagramma di deformazioni ε con valore nullo in corrispondenza all'asse baricentrico e pari a ε_y all'estremo compresso (accettando l'eventuale superamento della deformazione limite elastica all'estremo teso) ed il corrispondente diagramma di tensioni $\sigma = E\,\varepsilon$
- si calcola la larghezza efficace per tutti gli elementi che costituiscono la sezione, tenendo conto per ciascuno di essi del rapporto b_p / t e delle condizioni di vincolo agli estremi e considerando il diagramma di tensioni precedentemente definito (uniforme nelle ali, variabile linearmente nelle anime)
- si valuta la posizione del baricentro della sezione efficace, che sarà variata rispetto alla precedente

Resistenza - Flessione

(in assenza di problemi di instabilità globale)



– si determina la risultante del diagramma di tensioni sulla sezione efficace; essa porta in genere a uno sforzo normale non nullo; occorre quindi assegnare un nuovo diagramma di deformazioni e di tensioni e iterare il procedimento, fino ad ottenere una posizione dell'asse neutro cui corrisponde solo momento flettente

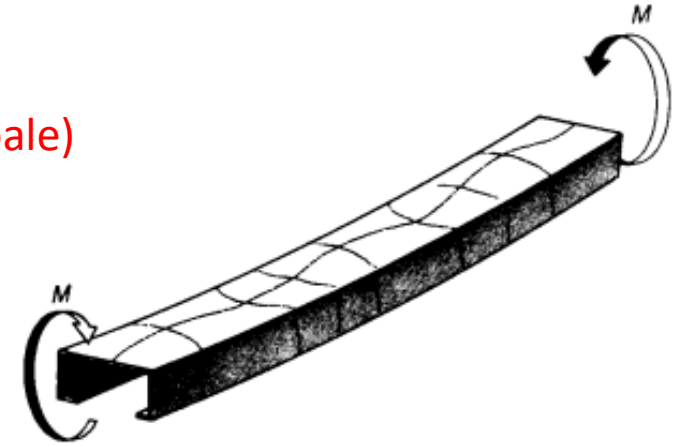
se la parte tesa rimane in campo elastico, la condizione sopra riportata equivale a dire che l'asse neutro deve essere baricentrico per la sezione efficace; la resistenza limite a flessione è fornita dalla relazione

$$M_{c,Rd} = \frac{f_y W_{eff}}{\gamma_{M1}}$$

f_y	la tensione di snervamento caratteristica nella sezione, pari a f_{ya} quando la sezione è tutta efficace, f_{yb} quando la sezione lo è solo parzialmente
W_{eff}	il modulo di resistenza della sezione efficace del profilo
γ_{M1}	il coefficiente parziale di sicurezza (γ_{M1}=1.1)

Resistenza - Flessione

(in assenza di problemi di instabilità globale)



in caso di parziale plasticizzazione della parte tesa della sezione, occorre utilizzare le espressioni che forniscono le caratteristiche di sollecitazione per una sezione in regime elastico-perfettamente plastico

in determinate condizioni [4.4 (5)] l'Eurocodice 3 consente di tenere conto anche delle riserve plastiche del materiale in zona compressa. Si parla in questo caso di "calcolo plastico" [4.4.3]. Il momento limite è quello per il quale la deformazione al lembo compresso raggiunge un valore massimo pari a $C_y\ \varepsilon_y$, con C_y che dipende dal rapporto b_p / t e delle condizioni di vincolo agli estremi e può essere al più pari a 3

Resistenza – Tenso-Flessione

occorre rispettare la condizione

$$\frac{N_{Sd}}{A_g f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Sd}}{W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Sd}}{W_{eff,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

nella quale

A_g	è l'area della sezione geometrica
$W_{eff,y}$ e $W_{eff,z}$	sono i moduli di resistenza della sezione efficace, per flessione nei due piani xy e xz

Resistenza – Presso-Flessione

(in assenza di problemi di instabilità globale)

occorre rispettare la condizione

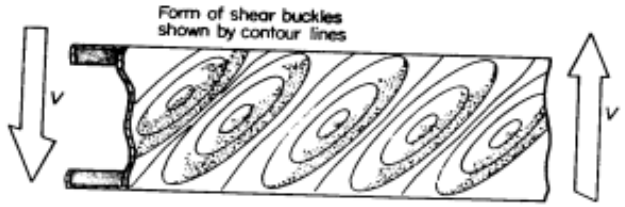
$$\frac{N_{Sd}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Sd} + \Delta M_{y,Sd}}{W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Sd} + \Delta M_{z,Sd}}{W_{eff,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

nella quale

A_g	è l'area della sezione geometrica
$W_{eff,y}$ e $W_{eff,z}$	sono i moduli di resistenza della sezione efficace, per flessione nei due piani *xy* e *xz*
$\Delta M_{y,Sd}$ e $\Delta M_{z,Sd}$	sono gli eventuali valori del momento flettente dovuti alla non coincidenza tra baricentro della sezione geometrica e baricentro della sezione efficace

Taglio – Instabilità dell'anima

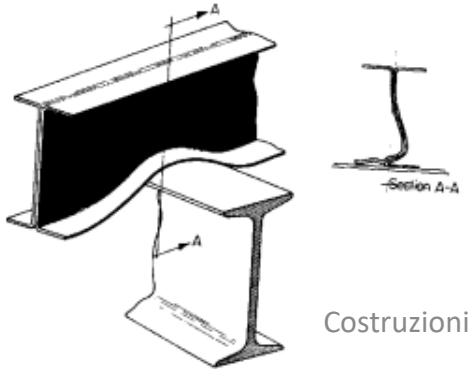
il problema dell'instabilità dell'anima viene preso in considerazione in funzione della snellezza relativa dell'anima $\bar{\lambda}_w$



la resistenza limite a taglio è fornita dalla relazione

$$V_{w,Rd} = \frac{\tau_w \, s_w \, t}{\gamma_{M1}}$$

occorre inoltre prevenire l'instabilità dell'anima in corrispondenza dell'appoggio o di carichi concentrati



τ_w la resistenza media a taglio, dipendente dalla snellezza relativa dell'anima

s_w la distanza tra i punti di intersezione dell'anima con le ali del profilo

$$\bar{\lambda}_w = 0.346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$ in assenza di irrigidimenti d'anima

$$\tau_w = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad \text{per} \quad \bar{\lambda}_w \le 0.84$$

$$\tau_w = 0.48 \frac{f_y}{\bar{\lambda}_w} \quad \text{per} \quad 0.84 < \bar{\lambda}_w \le 1.38$$

$$\tau_w = 0.67 \frac{f_y}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{per} \quad 1.38 < \bar{\lambda}_w$$