



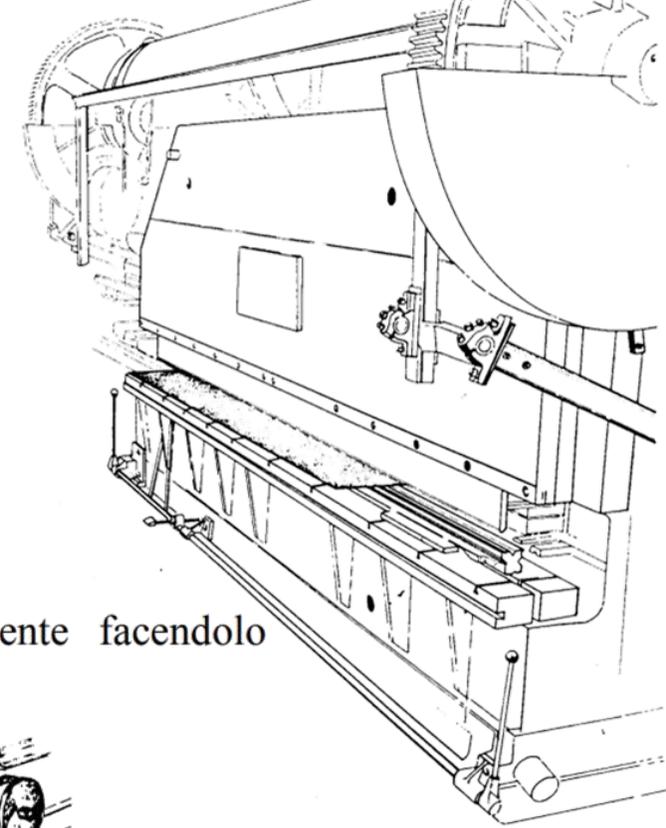
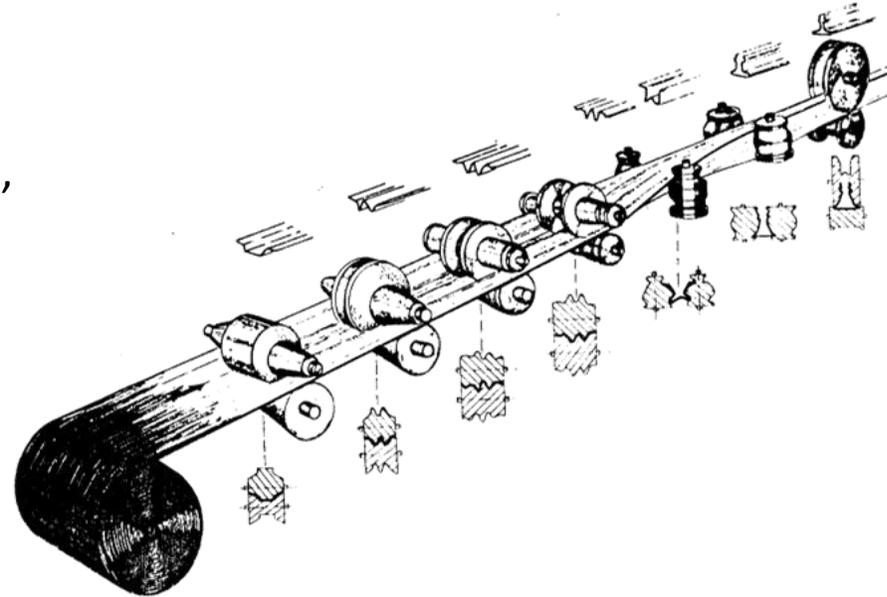
# Costruzioni in Acciaio

Profili sagomati (formati) a freddo  
(CFS)

# Profili CFS

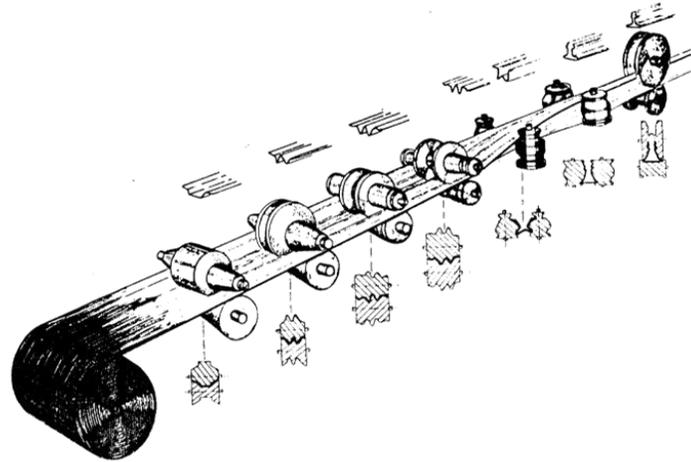
- Sono elementi ottenuti formando a freddo una lamiera d'acciaio
- Procedimenti per ottenerli:
  - stampaggio alla pressa
  - laminazione stampaggio alla pressa: il nastro d'acciaio viene pressato, a singoli tratti, su uno stampo

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



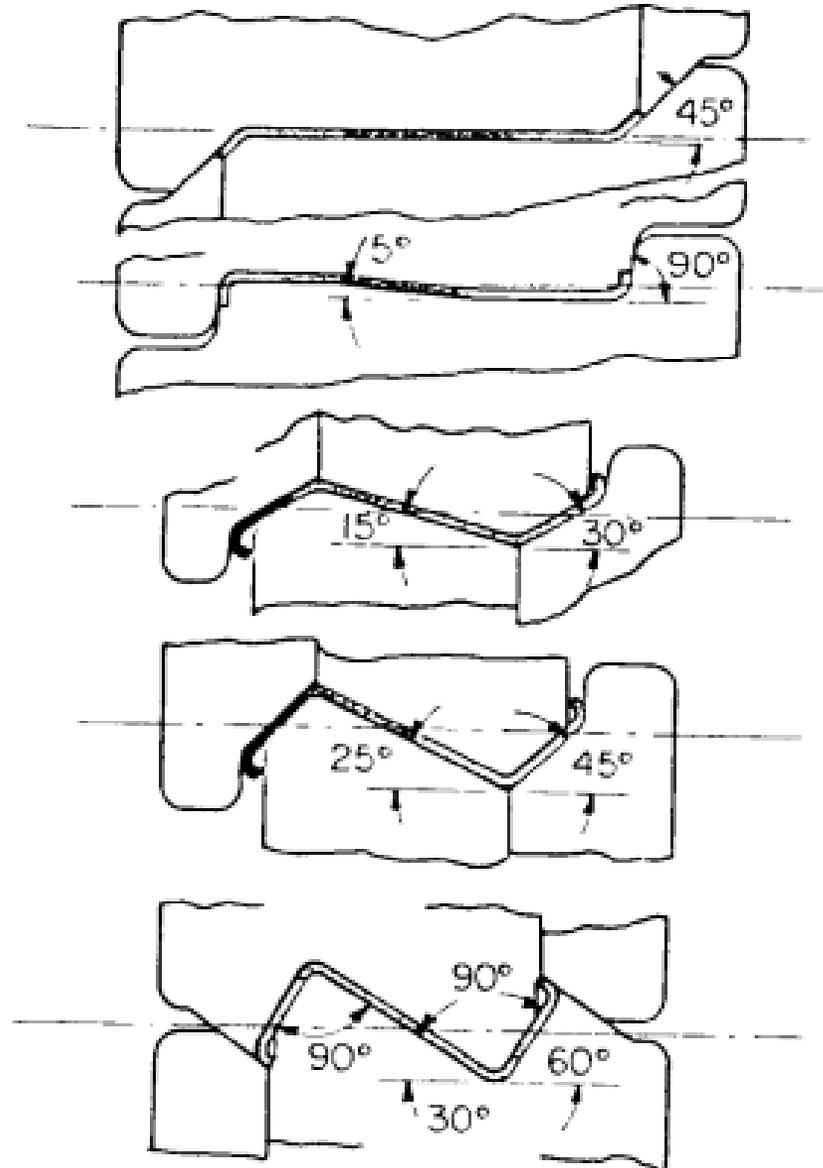
# Profili CFS

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

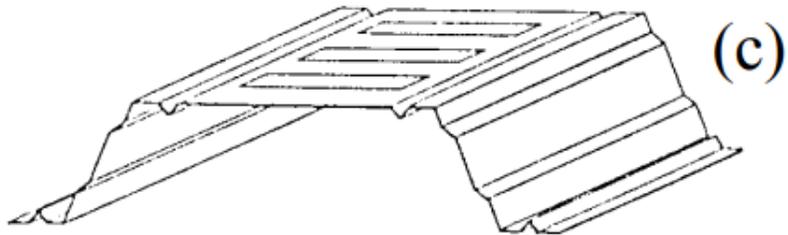
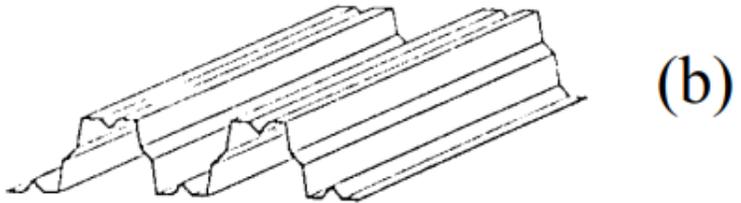
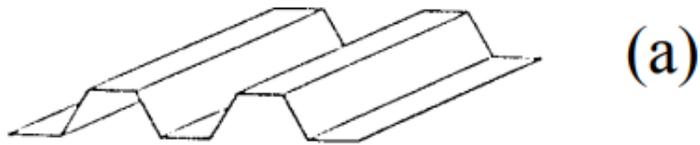
- Il profilato a freddo ricavato da nastro di acciaio viene da oltre un secolo impiegato nei settori delle scaffalature, degli infissi, ecc.  
Sono in questi ultimi anni esso si sta affermando anche in campo strutturale.
- I principali fattori del suo sviluppo sono:
  - Più approfondite conoscenze del 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

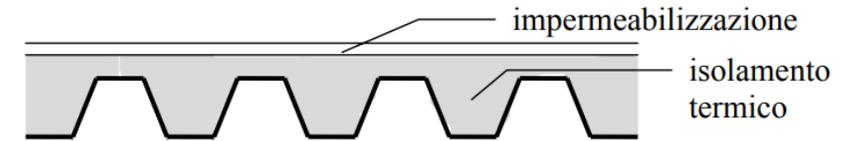
- La disponibilità dei profili è quasi illimitata
- Il mercato è in grado di rispondere con una serie di gamme dimensionali molto vaste in grado di soddisfare le esigenze di impiego più ricorrenti
- I profili possono inoltre essere forniti già protetti contro la corrosione per mezzo di zincatura e/o 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: lamiera grecate

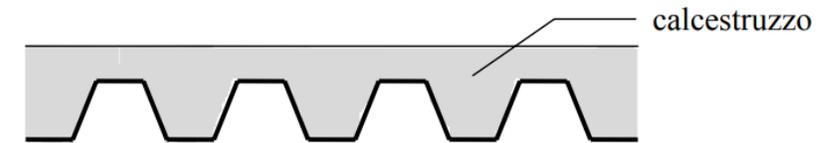
spessore  $t$        $0.5 \leq t \leq 4.0$  mm



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)



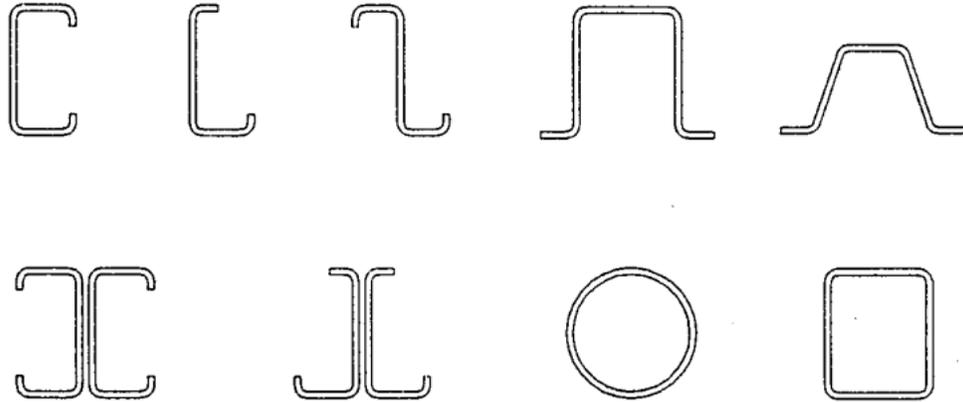
## Massima luce per le tipologie usuali

- (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

spessore  $t$

$1.0 \leq t \leq 8.0$  mm



## 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  $\Omega$  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  $f_u$  (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  $f_{yb}$

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

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  $90^\circ$  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

# Caratteristiche geometriche / inerziali

Possibilità:

- considerare l'effettivo sviluppo, con tratti rettilinei e raccordi circolari, ciascuno col suo spessore (eventualmente ridotto nei raccordi)
  
- considerare la sezione curvilinea costituita dalla linea media, valutarne le proprietà e poi moltiplicarle per lo spessore (assunto unico per tutti i tratti)

# Caratteristiche geometriche / inerziali

– considerare la sezione idealizzata ottenuta da quella curvilinea eliminando i raccordi e sostituendoli con spigoli vivi

in questo caso l'Eurocodice 3, parte 1-3 [ 2.6 (3) ], prescrive di ridurre le caratteristiche:

$$A'_g = A_g (1 - \delta)$$

$$I'_g = I_g (1 - 2 \delta)$$

con

$$\delta = 0.43 \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^m b_i}$$

e

$r_i$  raggio interno di curvatura

$b_i$  lunghezza del tratto rettilineo

# 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

# Problemi principali

## 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 rigidità dell'asta i suoi effetti possono cumularsi a quelli dell'instabilità globale

Confrontiamo il comportamento critico e post-critico della lastra sottile compressa e dell'asta caricata di punta

# Instabilità locale di profili CFS

## Asta ideale

- Si calcola il carico critico di Eulero su asta ideale considerata priva di imperfezioni e costituita da materiale linearmente elastico

## Comportamento post-critico

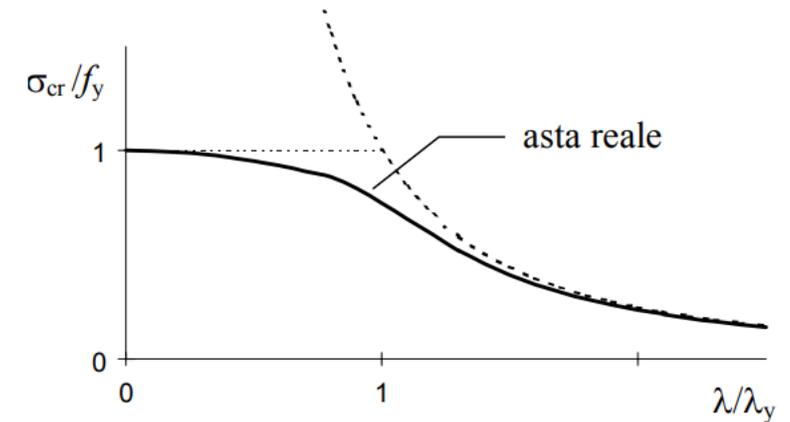
- quando si raggiunge il carico critico, si manifestano spostamenti trasversali molto grandi per piccolissimi incrementi di carico
- in pratica, il carico non può aumentare ulteriormente e la rigidità assiale si può considerare nulla (capacità residua nulla)

## Asta reale

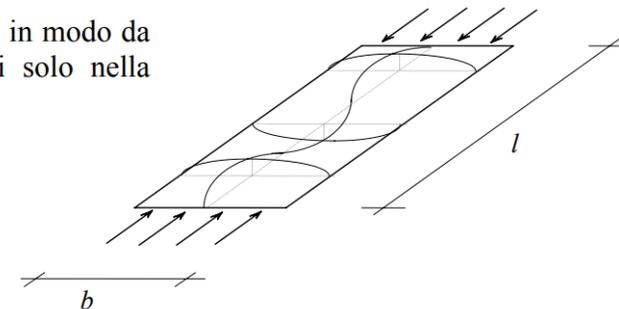
- Caratterizzata da imperfezioni e costituita da materiale elasto-plastico
- La tensione critica è minore di quella che si avrebbe nel caso di asta ideale ma anche di asta perfetta (cioè costituita da materiale elasto-plastico)

## Comportamento post-critico (simile per asta reale e perfetta)

- la tensione critica non può superare la tensione di snervamento
- si può distinguere tra aste tozze (che si snervano prima di instabilizzarsi) e aste snelle (che si instabilizzano in campo elastico)
- il limite è costituito dalla snellezza  $\lambda_y$  corrispondente alla tensione di snervamento



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



# Instabilità locale di profili CFS

## 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

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

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 rigidità estensionale
- per questo motivo:
  - è possibile aumentare ulteriormente il carico
  - la rigidità assiale della lastra si riduce (fino al 40% del valore iniziale) ma non si annulla

# Instabilità locale di profili CFS

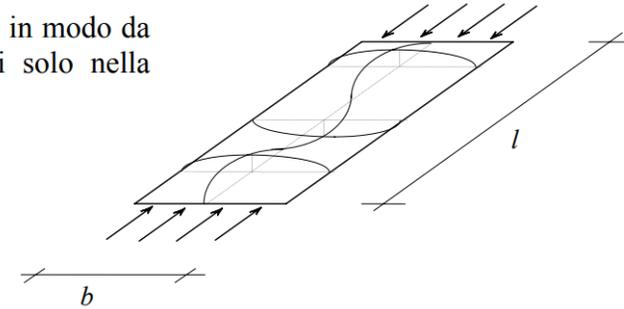
## Lastra ideale

### Comportamento post-critico:

- 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

## LASTRA COMPRESSA

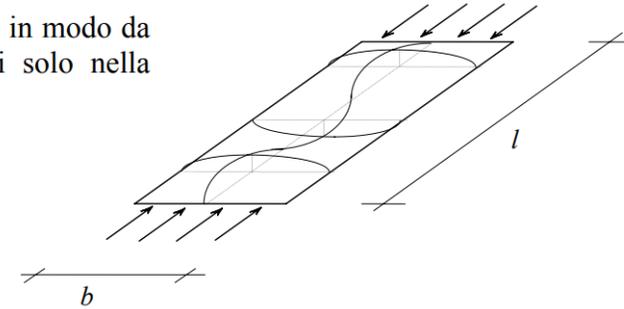
vincolata lungo i bordi in modo da consentire spostamenti solo nella direzione del carico



con

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}} \cong \frac{N}{N_{cr}} + 2.83 \left( \frac{N}{N_{cr}} - 1 \right) + 0.52 \left( \frac{N}{N_{cr}} - 1 \right)^2$$

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



# Instabilità locale di profili CFS

## Lastra perfetta

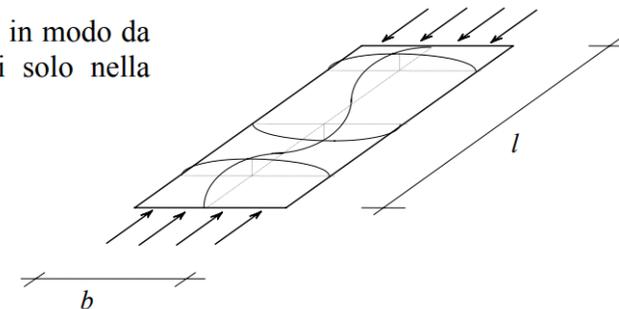
costituita da materiale elasto-plastico

- il carico massimo corrisponde al raggiungimento della tensione di snervamento nella fibra più sollecitata
- dall'espressione precedente si ottiene

$$\frac{N_{ult}}{N_y} = 0.36 + 0.83 \frac{N_{cr}}{N_y} - 0.19 \frac{(N_{ult} / N_y)^2}{N_{cr} / N_y}$$

- per ulteriori incrementi di deformazione il carico portato tende a diminuire

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



# Instabilità locale di profili CFS

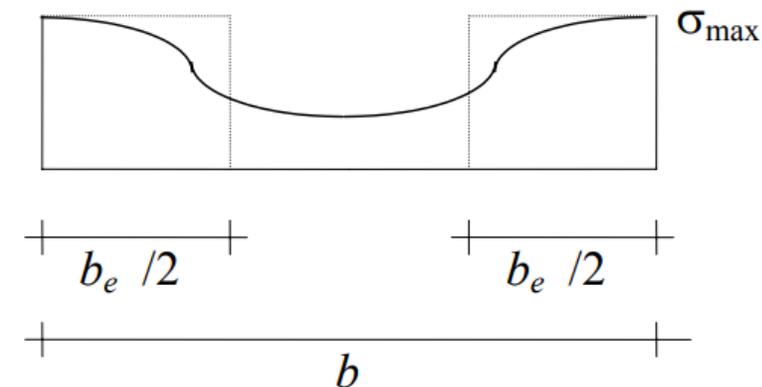
## Comportamento post-critico (VALUTAZIONE APPROSSIMATA)

- secondo alcune vecchie normative:
  - poiché la tensione media è minore di quella massima, si impone alla tensione media un limite più basso della tensione di snervamento (in funzione di  $b/t$ )

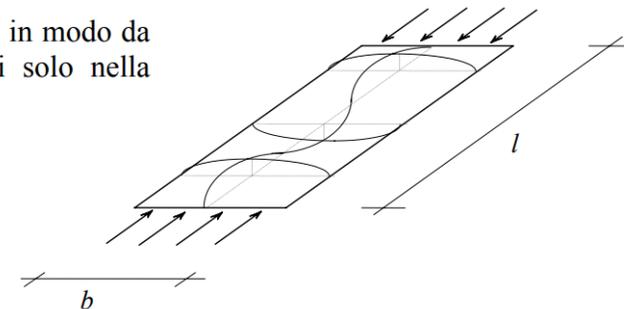
$$N = \int \sigma \, db = \sigma_{\max} b_{\text{eff}}$$

$b_{\text{eff}}$  è detta *larghezza efficace*

- impostazione attuale (Eurocodice 3): proposta per la prima volta da Von Karman (1932) si considera la tensione massima agente su una parte  $b_{\text{eff}}$  della larghezza, cioè si considera



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



# Instabilità locale di profili CFS

## Comportamento post-critico (VALUTAZIONE APPROSSIMATA)

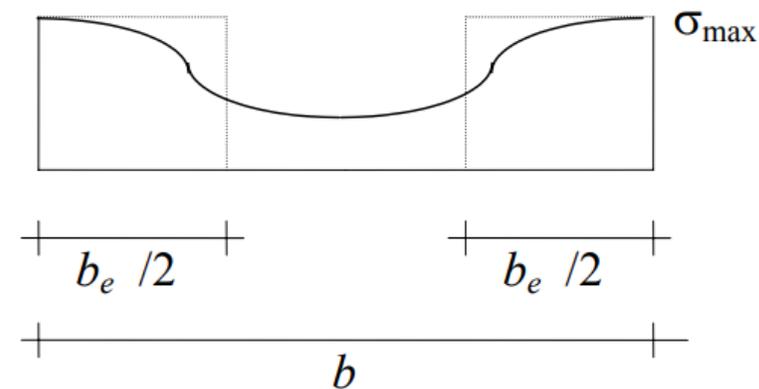
la larghezza efficace  $b_{eff}$  dipende da  $\sigma_{max}$

ad esempio, al collasso si avrebbe  $b_{eff} / b = N_{ult} / N_y$  e si potrebbe usare l'espressione riportata in precedenza

più semplicemente, si assume per ogni assegnata tensione massima di compressione  $\sigma_{com}$  che  $b_{eff}$  sia la larghezza per la quale tale tensione è critica, cioè per cui è  $\sigma_{com} = \sigma_{cr}$

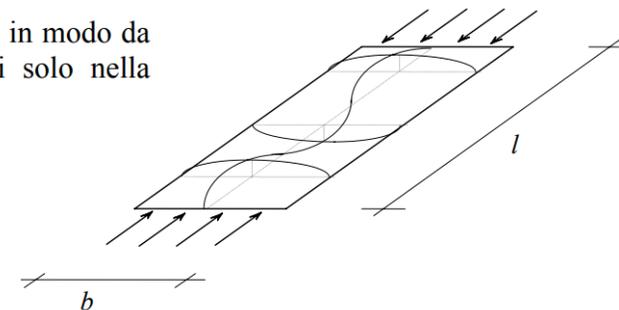
quindi

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



# Instabilità locale di profili CFS

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



## Comportamento post-critico (VALUTAZIONE APPROSSIMATA)

dall'espressione precedente si ricava (sostituendo il valore di  $\pi$  e ricordando che  $\nu=0.3$ )

$$\frac{b}{b_{eff}} = \bar{\lambda}_p$$

avendo posto

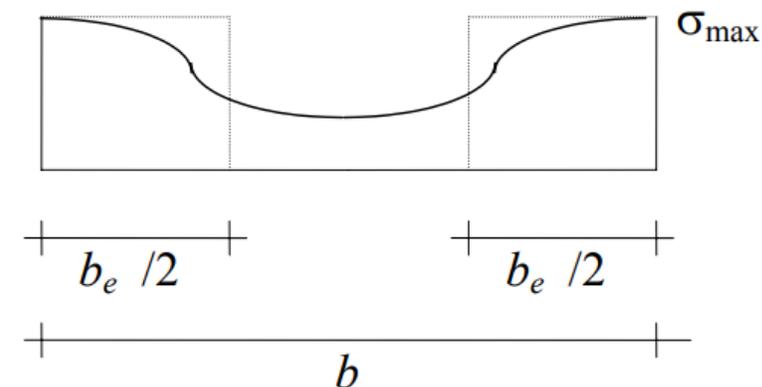
$$\bar{\lambda}_p = 1.052 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{E k}}$$

$\bar{\lambda}_p$  è denominata “snellezza relativa”

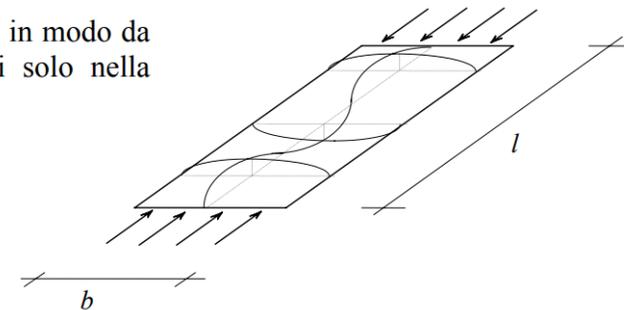
si ha allora, per una lastra perfetta:

$$b_{eff} = \rho b \quad \text{con} \quad \rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \leq 1$$

espressione che vale per  $\bar{\lambda}_p \geq 1$



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



# Instabilità locale di profili CFS

## Lastra reale

con imperfezioni iniziali e costituita da materiale elasto-plastico

per tenere conto delle imperfezioni si assume

$$\rho = \frac{1 - 0.22 / \bar{\lambda}_p}{\bar{\lambda}_p} \leq 1$$

espressione da usare (perché dà valori  $\leq 1$ ) quando  $\bar{\lambda}_p \geq 0.673$

i risultati sono corretti quando  $\sigma_{com} = f_y$

per  $\sigma_{com} < f_y$  l'espressione è troppo cautelativa  
l'Eurocodice consiglia di assumere

$$\rho = \frac{1 - 0.22 / \bar{\lambda}_{pd}}{\bar{\lambda}_{pd}} + 0.18 \frac{\bar{\lambda}_{pu} - \bar{\lambda}_{pd}}{\bar{\lambda}_{pu} - 0.6} \leq 1$$

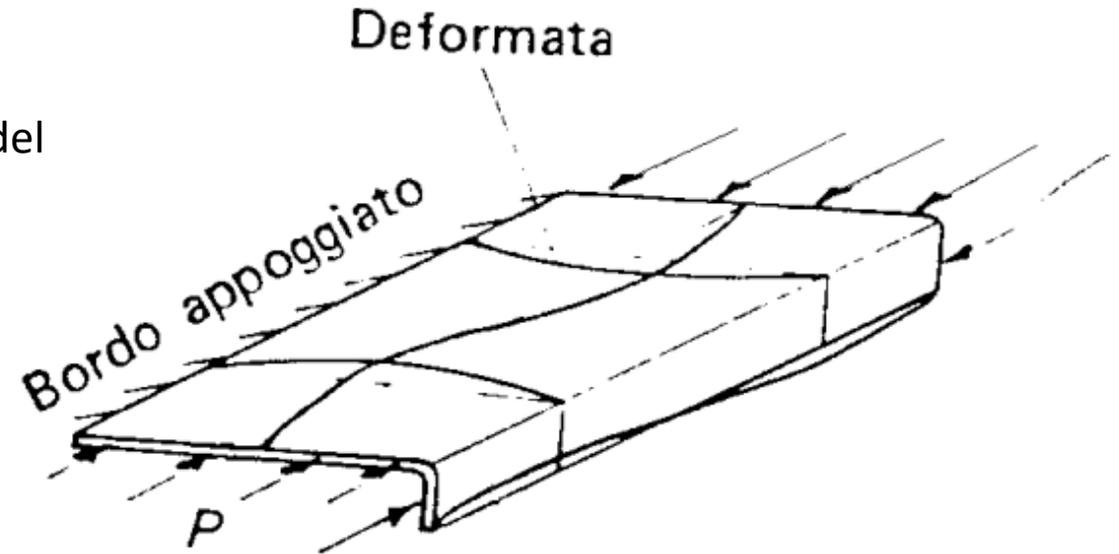
con

$$\bar{\lambda}_{pd} = 1.052 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{E k}}$$

$$\bar{\lambda}_{pu} = 1.052 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E k}}$$

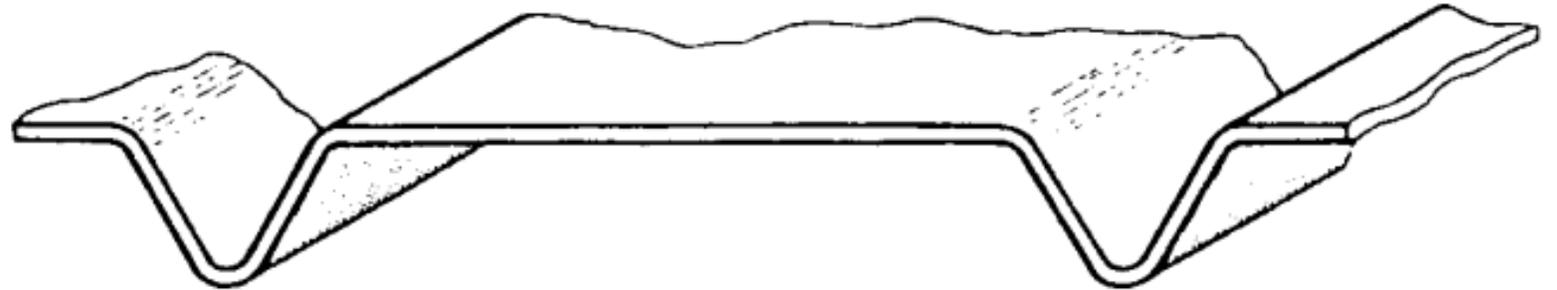
# Irrigidimenti di bordo

- 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



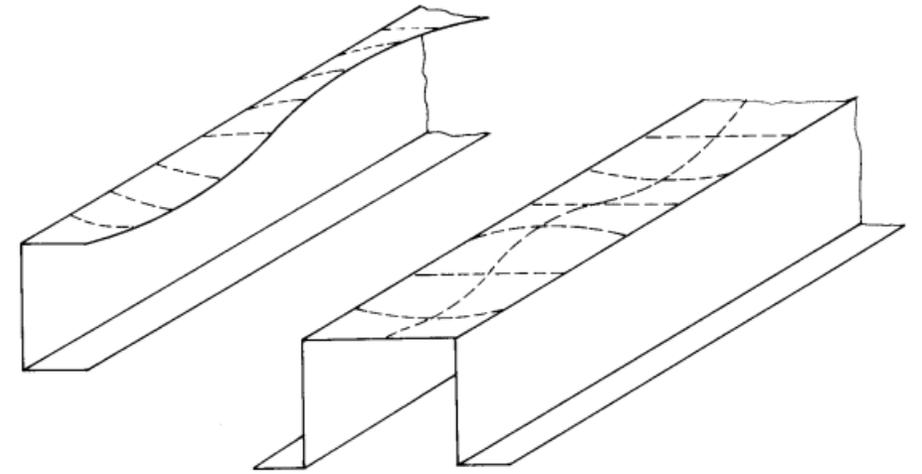
# Lastre molto snelle

- 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

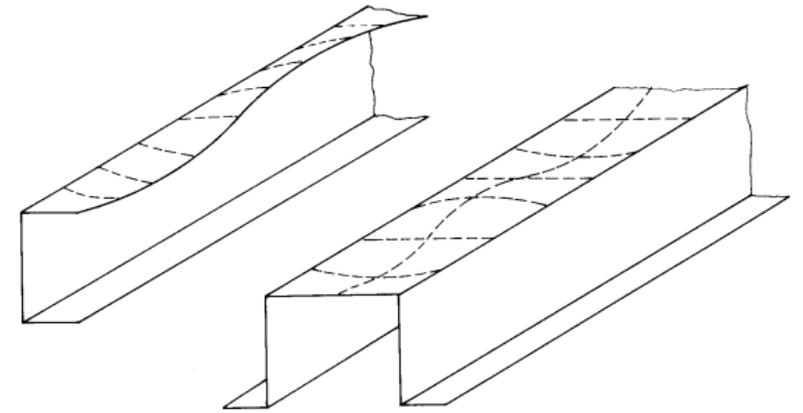


# Applicazioni su profili CFS

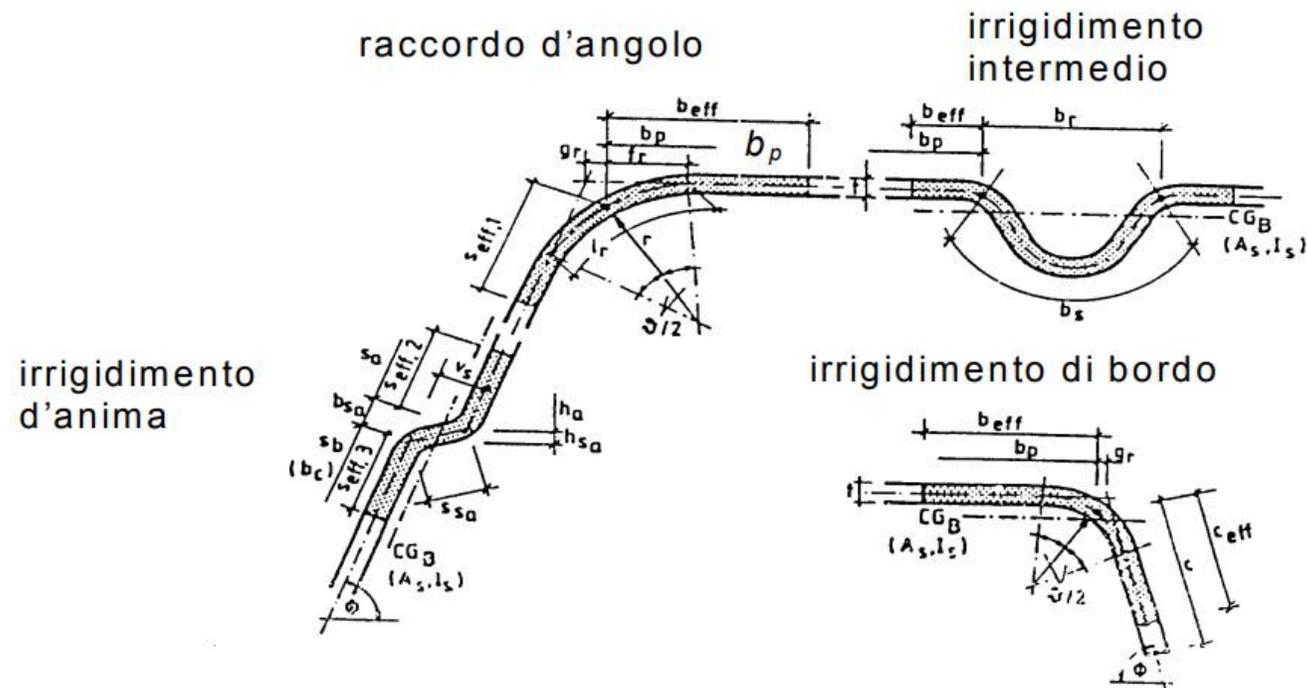
- Per l'analisi dell'instabilità locale, i profilati a freddo si considerano composti da un insieme di lastre piane
- Queste lastre sono mutuamente collegate lungo i bordi comuni
- per semplicità si assume che i bordi siano semplici appoggi
- Ciò significa che si trascura il possibile vincolo mutuo alla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



# Applicazioni su profili CFS

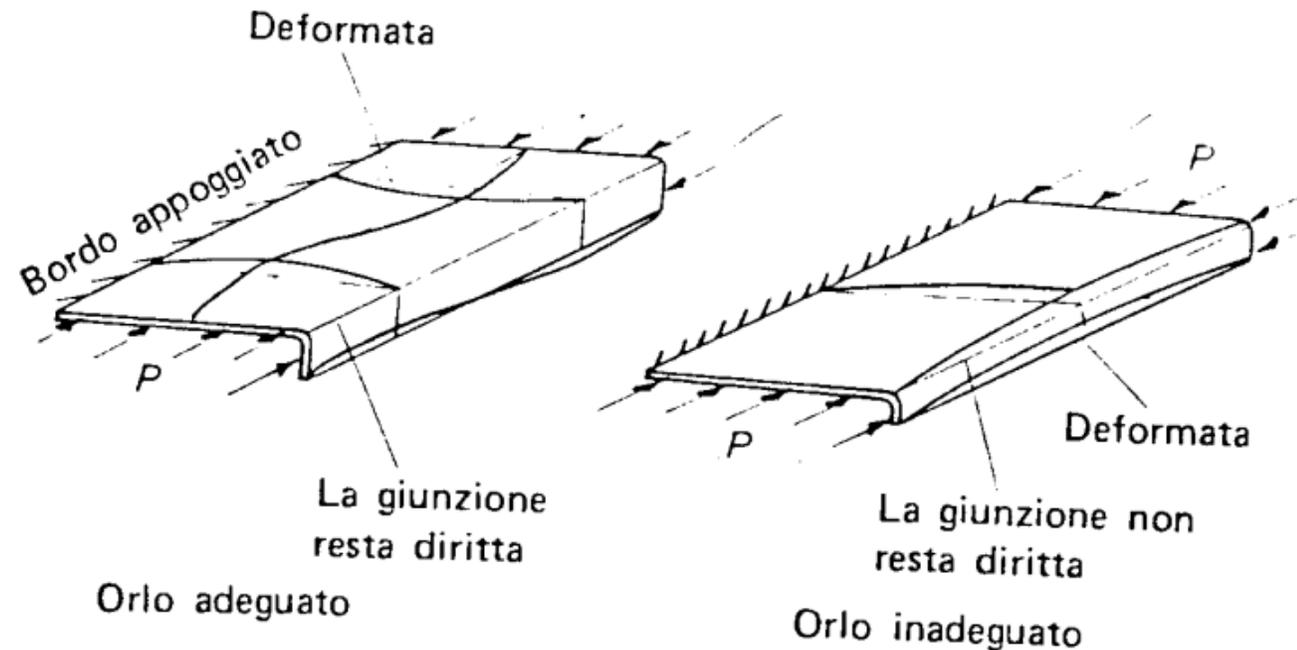


per l'Eurocodice 3 la larghezza geometrica è indicata col simbolo  $b_p$  ed è misurata dal punto medio del raccordo d'angolo



# 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



dimensione  $c$  consigliata dell'irrigidimento affinché sia efficace:

$$c \geq b / 5 \quad e \quad c \leq 10 t$$

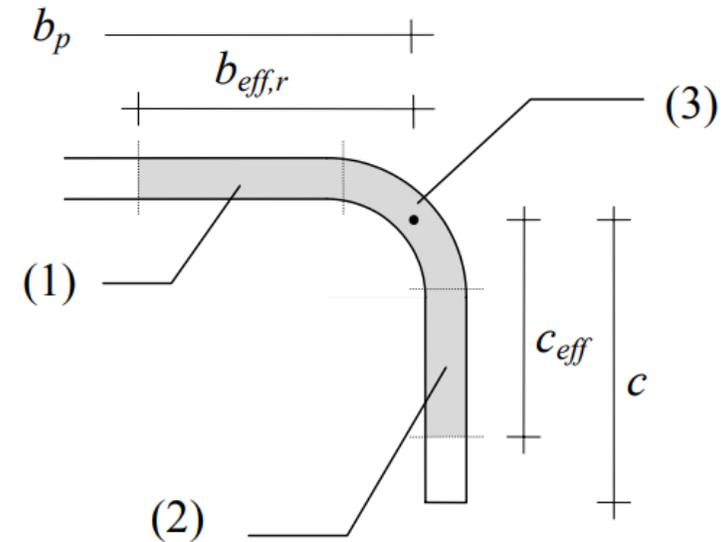
# Efficacia degli irrigidimenti di bordo

- 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

# Carico critico dell'irrigidimento

visto come trave elastica su suolo elastico

il carico critico vale

$$N_{cr,r} = 2 \sqrt{C_r E I_r}$$

e quindi la tensione critica è

$$\sigma_{cr,r} = \frac{2 \sqrt{C_r E I_r}}{A_r}$$

dove  $C_r$  è la costante elastica del suolo che può essere posta pari a

– per sezioni a C o Z irrigidite

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{b^2 (1 - \nu^2) (b + 1.5h)} \quad \text{in caso di compressione}$$

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{b^2 (1 - \nu^2) (b + h)} \quad \text{in caso di flessione}$$

# Carico critico dell'irrigidimento

visto come trave elastica su suolo elastico

– per sezioni a L irrigidite

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{b^2 (1 - \nu^2) (b + h)}$$

in caso di flessione nel piano  $x-z$ , con fibre superiori tese

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{h^2 (1 - \nu^2) (b + h)}$$

in caso di flessione nel piano  $x-y$ , con fibre di destra tese

– per sezioni a omega e per lamiera grecata

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{h^2 (1 - \nu^2) (b + 1.5h)}$$

in caso di compressione

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{h^2 (1 - \nu^2) (b + h)}$$

in caso di flessione

# Riduzione della capacità portante dell'irrigidimento

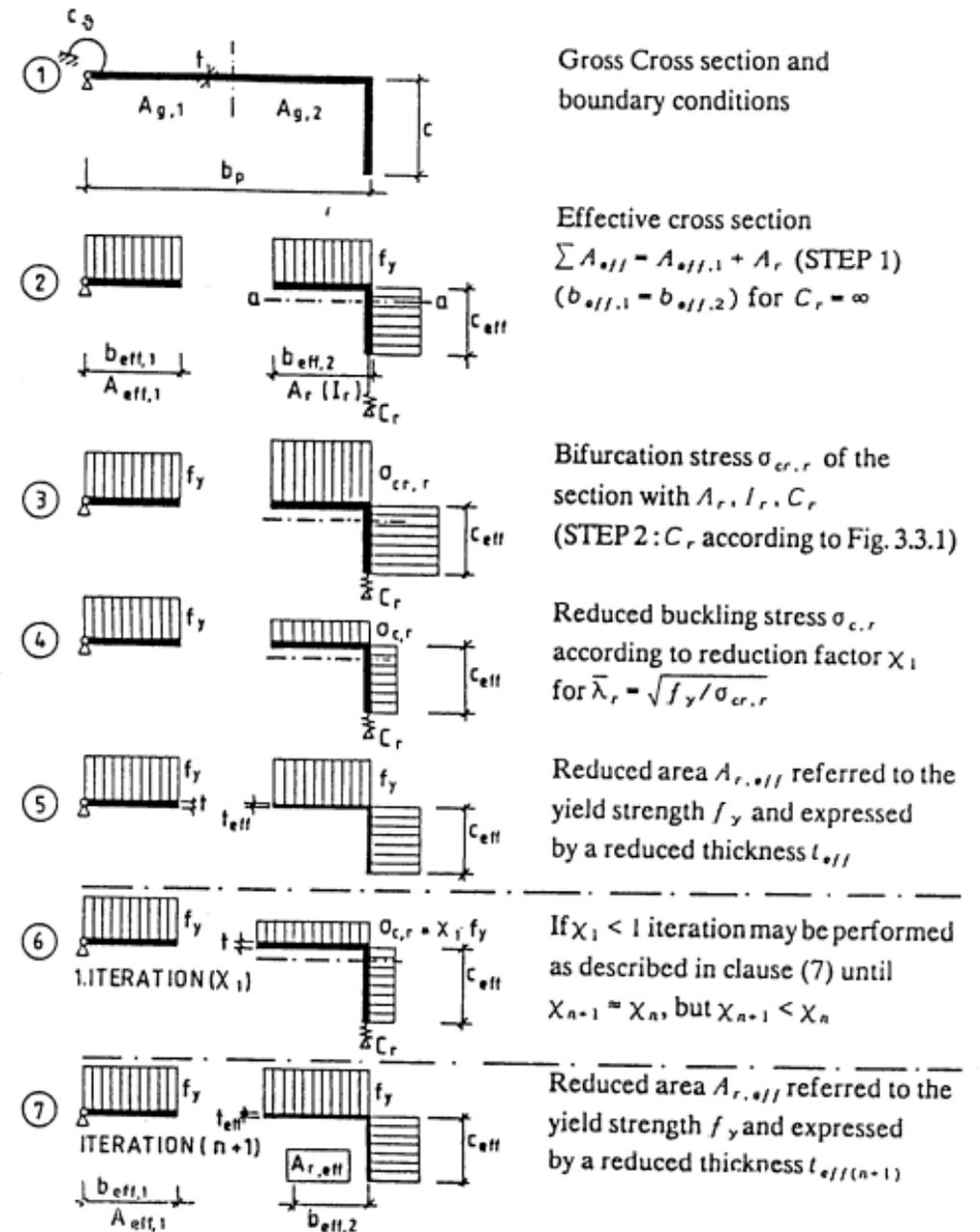
analogamente a quanto si deve fare per un'asta (vedi in seguito) si determina un coefficiente riduttivo  $\chi$  in funzione della snellezza relativa adimensionalizzata  $\bar{\lambda}_r = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,r}}$  con un coefficiente di imperfezione  $\alpha=0.13$

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  $t_{eff} = \chi t$

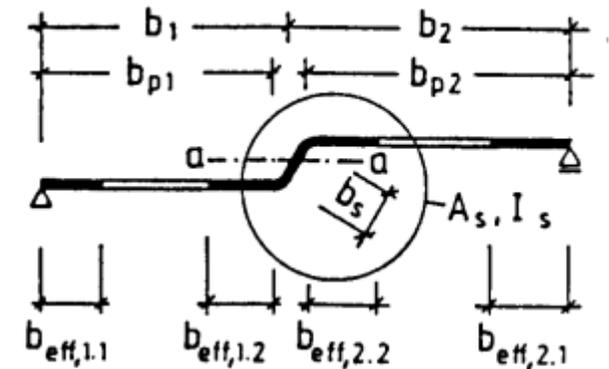
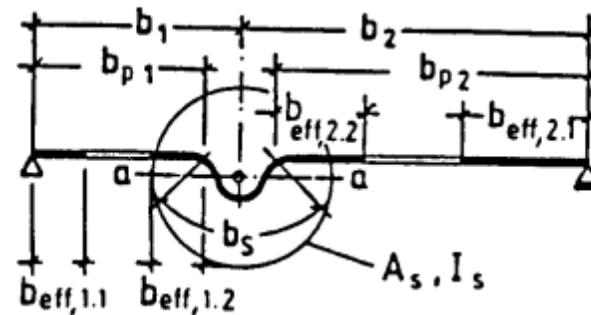
# Riduzione della capacità portante dell'irrigidimento

Questa riduzione può modificare lo stato tensionale e quindi rendere necessario un procedimento iterativo



# 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

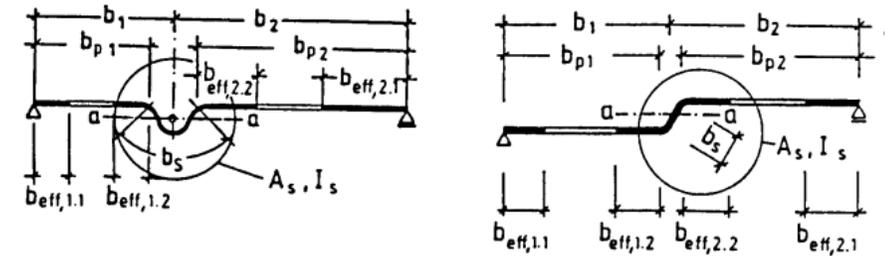
$$C_r = \frac{0.25 E t^3 (b_1 + b_2)}{(1 - \nu^2) b_1^2 b_2^2}$$

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  $\alpha=0.13$ , il coefficiente riduttivo  $\chi$  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
- $\gamma_{M0}$  il coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_{M0}=1.1$ )

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

$\gamma_{M1}$  il coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_{M1}=1.1$ )

# 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

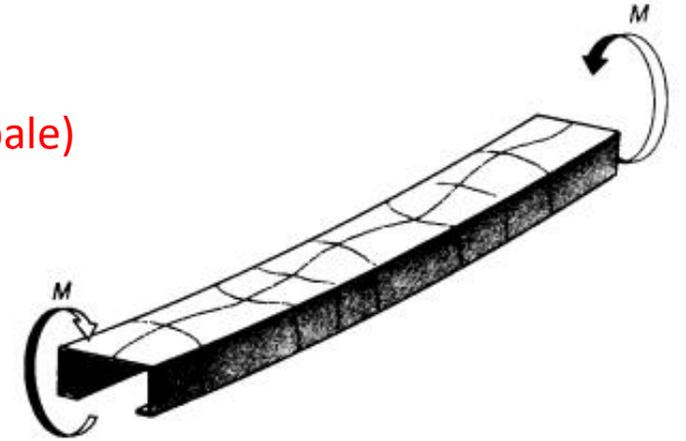
# Resistenza - Flessione

(in assenza di problemi di instabilità globale)

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

occorre procedere in maniera iterativa:

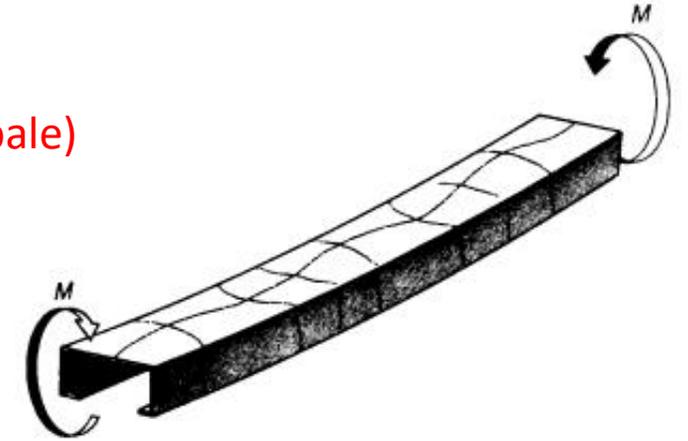
- si valuta la posizione del baricentro della sezione geometrica
- si assegna un diagramma di deformazioni  $\varepsilon$  con valore nullo in corrispondenza all'asse baricentrico e pari a  $\varepsilon_y$  all'estremo compresso (accettando l'eventuale superamento della deformazione limite elastica all'estremo 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

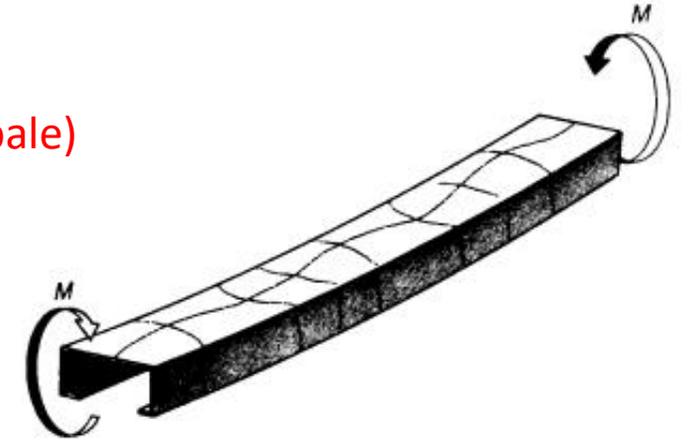
$W_{eff}$  il modulo di resistenza della sezione efficace del profilo

$\gamma_{M1}$  il coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_{M1}=1.1$ )

# 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  $C_y \epsilon_y$ , 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

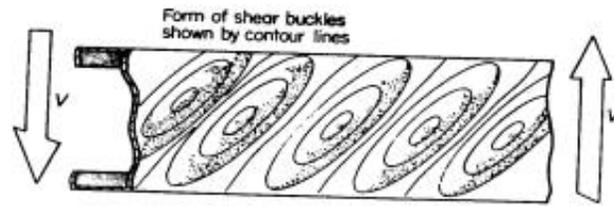
$$\frac{N_{Sd}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Sd} + \Delta M_{y,Sd}}{W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Sd} + \Delta M_{z,Sd}}{W_{eff,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

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

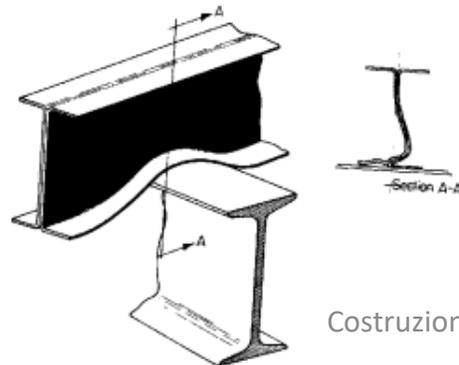
il problema dell'instabilità dell'anima viene preso in considerazione in funzione della snellezza relativa dell'anima  $\bar{\lambda}_w$



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



$\tau_w$  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

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

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

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

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