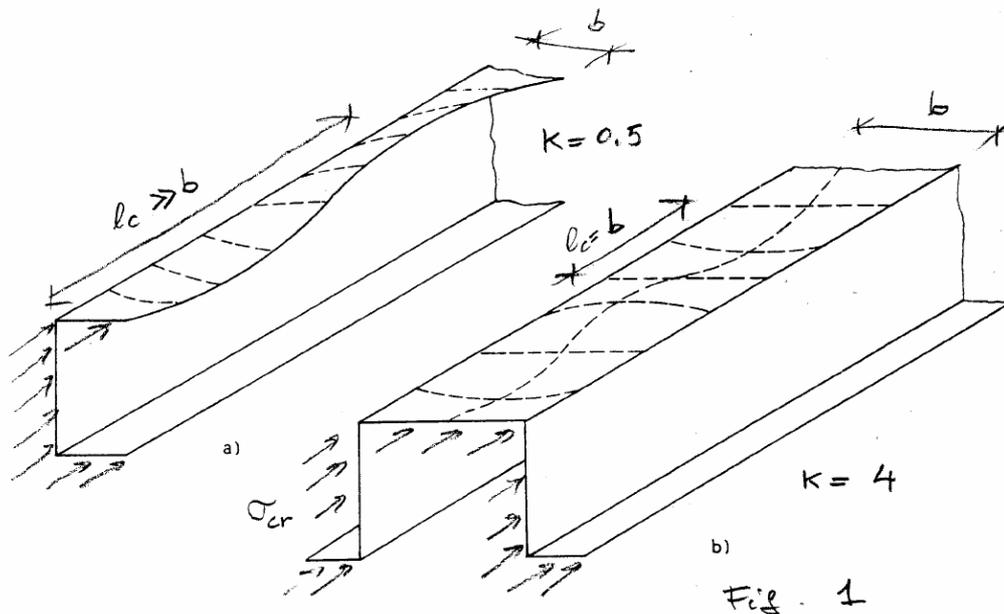


IMBOZZAMENTO



Le lastre, che costituiscono le pareti degli elementi strutturali, possono instabilizzarsi localmente, cioè uscire dal proprio piano formando delle “bozze”.

Se l’asta è semplicemente compresso (Fig. 1), le bozze hanno flessi a distanza $l_c = b$ nel caso di fig. b) e $l_c \gg b$ nel caso di fig. a).

La tensione critica è data dalla formula:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{(1-\nu^2)(b/i)^2} \quad \text{nella quale:}$$

ν = modulo di Poisson = 0.3 per l’acciaio

b = larghezza della lastra in direzione perpendicolare alle σ

i = raggio d’inerzia = $t/\sqrt{12}$ (t = spessore)

k = coefficiente che dipende dalle condizioni di vincolo della lastra soprattutto lungo i bordi paralleli alle σ

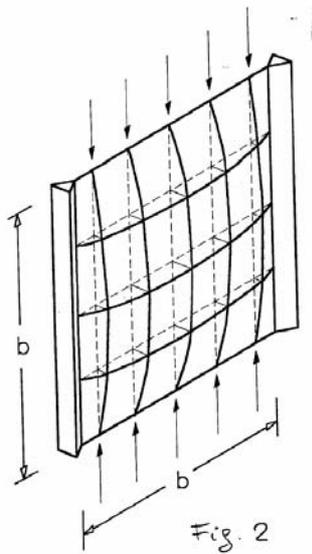
Ponendo $E = 210000$ MPa, $\nu = 0.3$ si ha:

$$\sigma_{cr} = k \frac{189800}{(b/t)^2} \text{ MPa}$$

E’ evidente la similitudine con la formula di Eulero per le aste caricate di punta:

$$\sigma_{cr,E} = \frac{\pi^2 E}{(\beta L/i)^2} = k \frac{\pi^2 E}{(L/i)^2} \quad \text{con} \quad k = \left(\frac{1}{\beta}\right)^2$$

La singola bozza dell’asta di fig. 1b) è rappresentata in fig. 2.



Per interpretare qualitativamente il fenomeno pensiamo la lastra discretizzata in un graticcio di aste. Le aste verticali, caricate di punta, sono vincolate da quelle orizzontali. Questo contributo spiega il termine $1/(1-\nu)^2$ che tiene conto del comportamento a lastra (dilatazioni trasversali impedito) ed il valore maggiore del coefficiente k ($k=1$ per l'asta di Eulero, $k=4$ per il pannello di fig. 2). Il contributo delle fibre trasversali, che ostacolano il progredire dell'imbozzamento una volta raggiunto il carico critico,

spiega inoltre la resistenza post-critica, con carichi di collasso che, a seconda delle condizioni di vincolo, possono essere anche molto maggiori del carico critico.

Nelle costruzioni civili si tende comunque a cautelarsi dal fenomeno dell'imbozzamento, seppure con coefficienti di sicurezza inferiori, per evitare danni psicologici, estetici (stato limite di utilizzazione)

Nelle strutture in cui è fondamentale la leggerezza (es. strutture aeronautiche) si ammette che l'imbozzamento avvenga sotto i carichi di esercizio.

In fig. 3 sono riportati i valori di k per lastre di lunghezza indefinita, soggette a σ uniformi di compressione, per varie condizioni di vincolo lungo i bordi.

VINCOLI SUI LATI NON CARICATI	DEFORMATA	k
		4.00
		5.42
		6.97
		0.425
		1.277

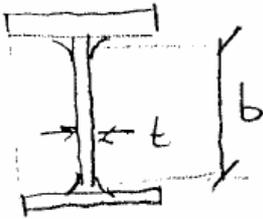
Fig. 3

Rapporti limite larghezza spessore

La tensione critica per imbozzamento σ_{cr} (instabilità locale) deve essere superiore alla tensione limite σ_{lim} per l'intera asta (resistenza globale)

$$\sigma_{lim} < k \frac{189800}{(b/t)^2} MPa \rightarrow \frac{b}{t} < \sqrt{\frac{189800k}{\sigma_{lim}}} \quad (1)$$

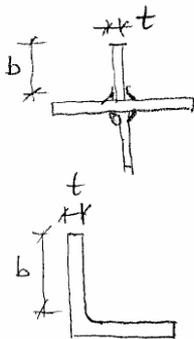
Se si pone $\sigma_{lim} = \gamma_M \gamma_Q f_y = 1.1 \cdot 1.5 f_y$, si hanno i valori dei rapporti b/t_w indicati dall'EC3 prospetto 5.3.1 per le anime compresse delle sezioni di classe 3:



$K = 4$

acciaio	S235	S275	S355
(1) $b/t_w <$	44.2	40.9	36.0
(EC3) $d/t_w <$	42	40	34

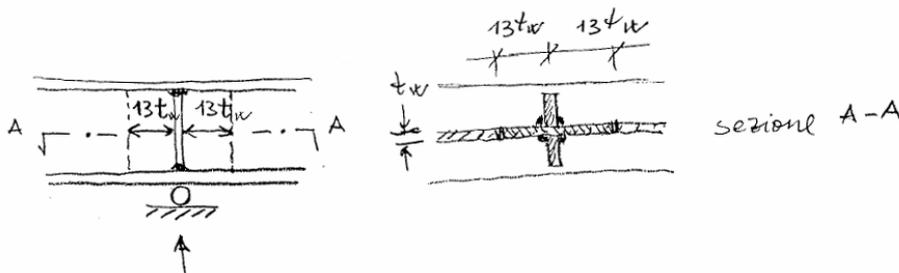
Per pareti sottili con un bordo non irrigidito:



$K = 0.425$

acciaio	S235	S275	S355
(1) $b/t_w <$	14.4	13.3	11.7
(EC3) $d/t_w <$	14	13	11

Quest'ultimo caso indica quale larghezza collaborante assumere nel caso di lastra soggetta a carico concentrato, come ad esempio l'anima di una trave sugli appoggi:



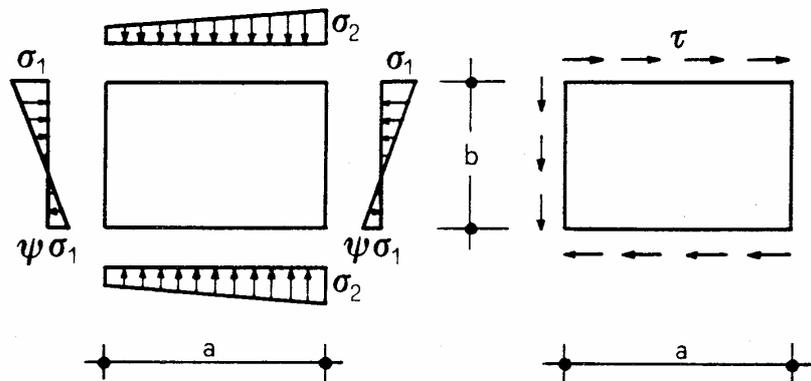
L'EC3 classifica le sezioni che non soddisfano questi rapporti come sezioni di classe 4.

5.3.5. Proprietà efficaci delle sezioni trasversali per sezioni trasversali di classe 4

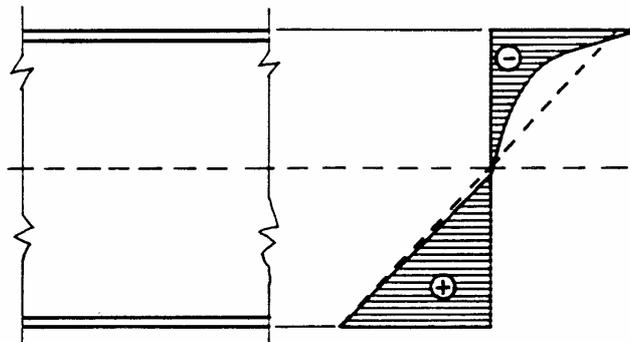
- (1) Le proprietà efficaci delle sezioni trasversali per le sezioni trasversali di classe 4 devono essere basate sulle larghezze efficaci degli elementi compressi: vedere 5.3.5(2).
- (2) Si raccomanda di calcolare le larghezze efficaci degli elementi piatti compressi usando il prospetto 5.3.2 per gli elementi interni e il prospetto 5.3.3 per gli elementi esterni.

9.7.1.2 Lastre inflesse

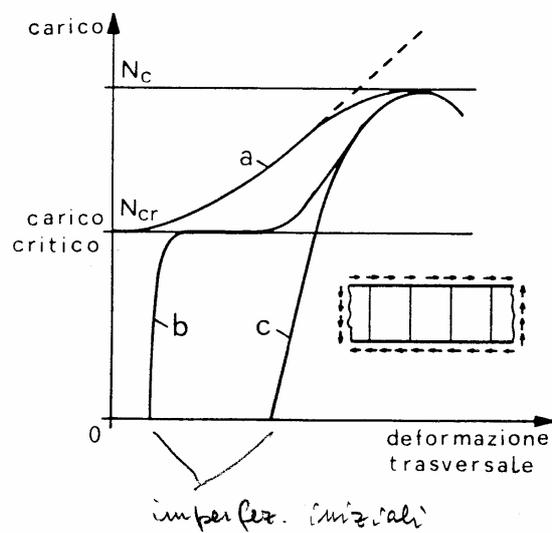
Pannello d'anima con sollecitazione composta di flessione e taglio



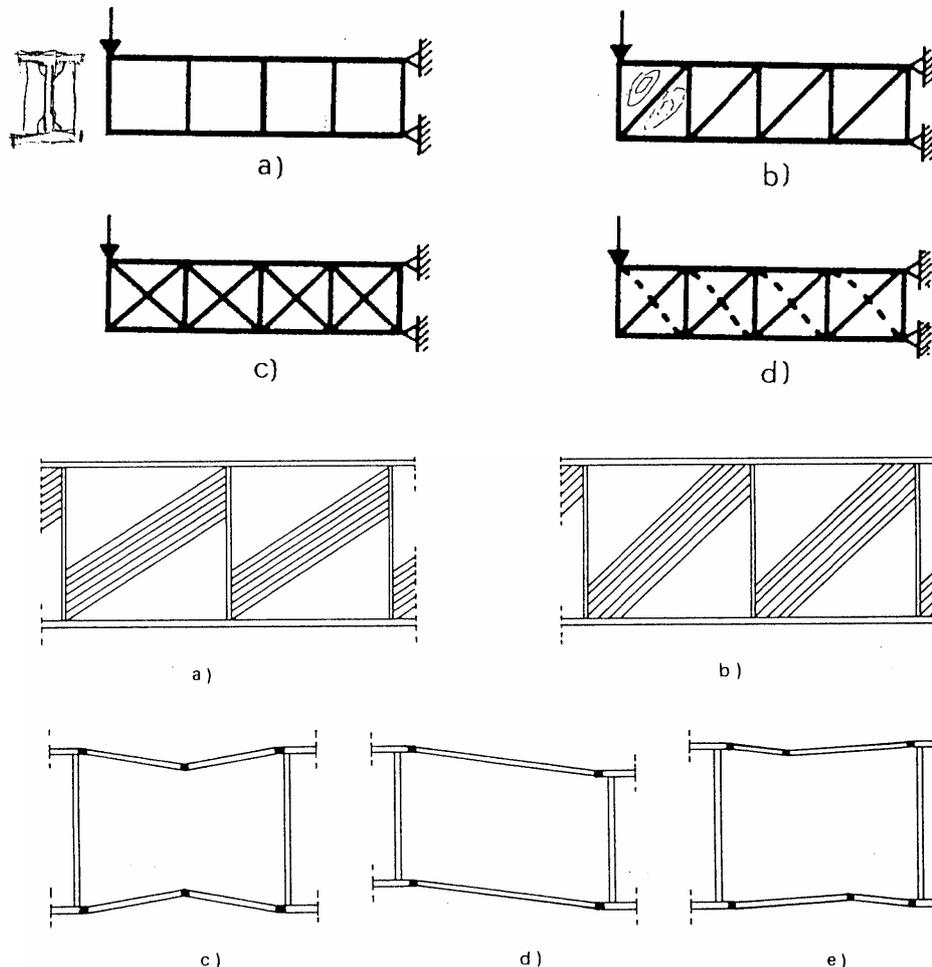
La fase post-critica è più pronunciata di quella delle piattabande compresse.



Nella flessione il diagramma a farfalla si modifica per l'imbozzamento della parte compressa dell'anima. Se l'ala è sufficientemente rigida, in fase post-critica si può comunque raggiungere il momento resistente plastico.



Per effetto del taglio, se gli irrigidimenti dell'anima sono sufficientemente rigidi, si può instaurare in fase post-critica uno schema di funzionamento statico a trave reticolare, capace di resistere a valori del carico molto maggiori di quello critico (**Teoria della tensione diagonale**).



Il collasso avviene in tal caso per cedimento delle diagonali tese o degli irrigidimenti verticali o delle ali.

9.7.1.3. Impostazione del calcolo

Teoria lineare (Timoshenko) con coefficienti di sicurezza più bassi per tener conto della resistenza post-critica.

La teoria non è adeguata per le lastre ortotrope (lastre irrigidite). Non è però disponibile in pratica un'altra teoria e quindi su di essa si basano le raccomandazioni, che pongono anche l'accento sui dettagli costruttivi.

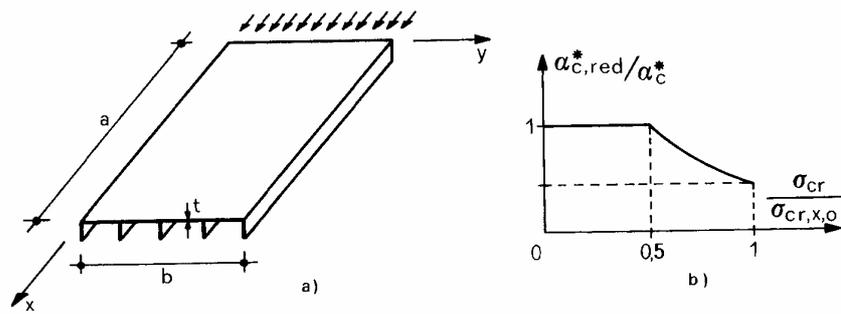
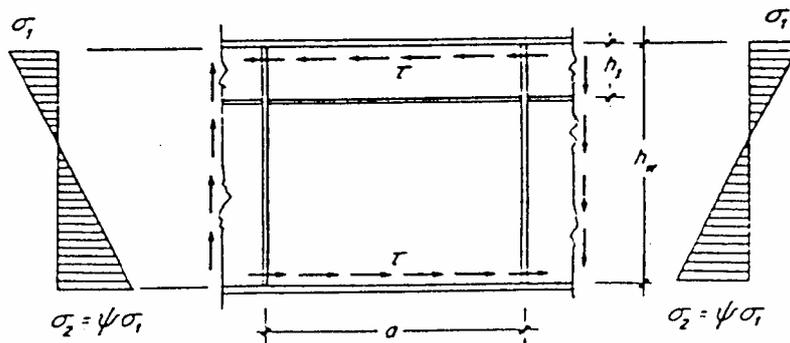


Fig. 9.196

9.7.1.4. Metodi per la verifica delle anime

Si presenta solo il “metodo post-critico semplificato” adottato dall’EC3 #5.6.3, basato sulla teoria lineare. Il metodo non è applicabile alle piattabande compresse in lastra ortotropa. Poiché piattabande siffatte si impiegano solo in strutture particolari (es. impalcati da ponte), si tralascia questa problematica che il Ballio tratta ai paragrafi 9.7.1.5 e 9.7.2.

Per le ali delle travi con irrigidimenti longitudinali in zona compressa si può seguire la CNR 10030/87 “Anime irrigidite di travi a parete piena”



INSTABILITA' PER TAGLIO

5.6. Resistenza all'instabilità per taglio

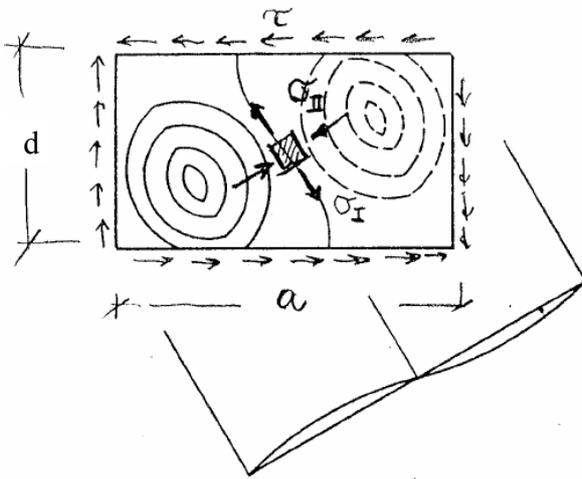
5.6.1. Principi

- (1) Le anime con d/t_w maggiore di 69ϵ per anime non irrigidite, oppure di $30\epsilon \sqrt{k_\tau}$ [vedere 5.4.6(7)] per anime irrigidite, devono essere verificate per resistere all'instabilità per taglio.
- (2) La resistenza all'instabilità per taglio dipende dal rapporto altezza-spessore d/t_w e dalla spaziatura di eventuali irrigidimenti d'anima intermedi.
- (3) La resistenza all'instabilità per taglio può inoltre dipendere dall'ancoraggio delle bande diagonali di trazione attraverso gli irrigidimenti di estremità o le piattabande. L'ancoraggio fornito dalle piattabande è ridotto dalle sollecitazioni longitudinali prodotte dal momento flettente e dallo sforzo normale.
- (4) Tutte le anime aventi d/t_w maggiore di 69ϵ devono essere munite di irrigidimenti trasversali agli appoggi.

5.6.2. Metodi di progetto

- (1) Per le anime senza irrigidimenti trasversali intermedi e per le anime con i soli irrigidimenti trasversali, la resistenza all'instabilità per taglio può essere verificata usando in alternativa:
 - a) il metodo post-critico semplificato (vedere 5.6.3); oppure:
 - b) il metodo delle bande diagonali di trazione (vedere 5.6.4).

Pannello soggetto a sole τ



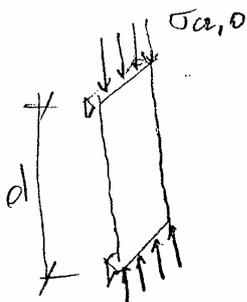
Le τ implicano tensioni principali:

$$|\sigma_I| = |\sigma_{II}| = \tau$$

Le σ_{II} di compressione fanno imbozzare il pannello, mentre le trazioni diagonali σ_I bloccano il punto di mezzo.

La tensione critica è data dalla stessa espressione del caso di pannello compresso, con coefficiente k diverso:

$$\tau_{cr} = \sigma_{II,cr} = k_\tau 189800 (d/t_w)^2 \text{ MPa} = k_\tau \sigma_{cr,0}$$



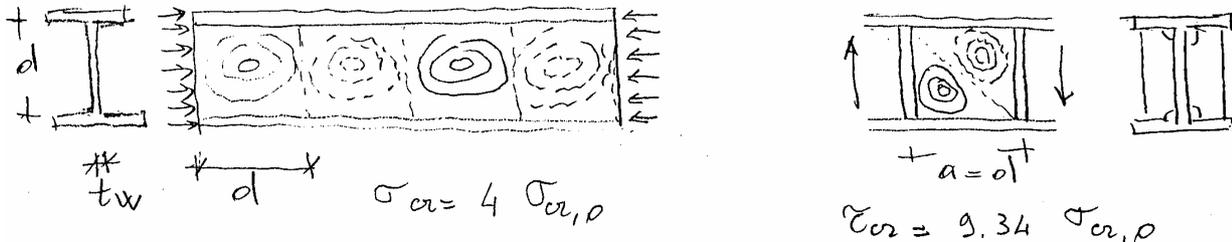
$$\sigma_{cr,0} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_w}{d}\right)^2 \text{ è detta "tensione critica di riferimento" e}$$

corrisponde alla tensione critica euleriana di una lastra (termine $1-\mu^2$) incernierata agli estremi e di lunghezza d .

k_τ dipende dal rapporto $\alpha = a/d$ (a = distanza irrigidimenti).

Per $\alpha = 1$ (pannello quadrato) $k_\tau = 9.34$

Si noti che nel caso di anima compressa non irrigidita le bozze si susseguono con passo $a=d$, cioè come se fossero presenti irrigidimenti trasversali con passo d , e il coefficiente di imbozzamento $k_\sigma=4$. La τ_{cr} è quindi molto più grande della σ_{cr} ($k_\tau=9.34$).



L'Eurocodice adotta la seguente espressione per la resistenza all'instabilità per taglio:

$$V_{ba,Rd} = d t_w \tau_{ba} / \gamma_{M1}$$

nella quale τ_{ba} è la resistenza post-critica a taglio ($b = \text{buckling}$, $a = \text{average}$) che è una sorta di media geometrica fra la tensione plastica τ_y e la tensione critica τ_{cr} :

$$\tau_{ba} = 0.9 \sqrt{\tau_y \tau_{cr}}$$

Moltiplicando e dividendo per $\sqrt{\tau_y}$ si ottiene:

$$\tau_{ba} = 0.9 \frac{\tau_y}{\sqrt{\tau_y / \tau_{cr}}} = 0.9 \frac{\tau_y}{\lambda_w} = 0.9 \frac{f_y / \sqrt{3}}{\lambda_w}$$

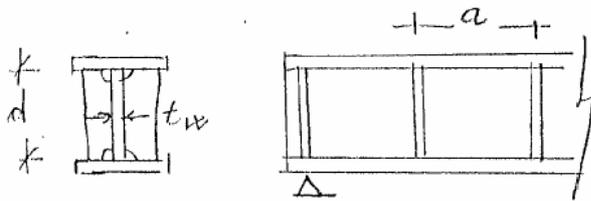
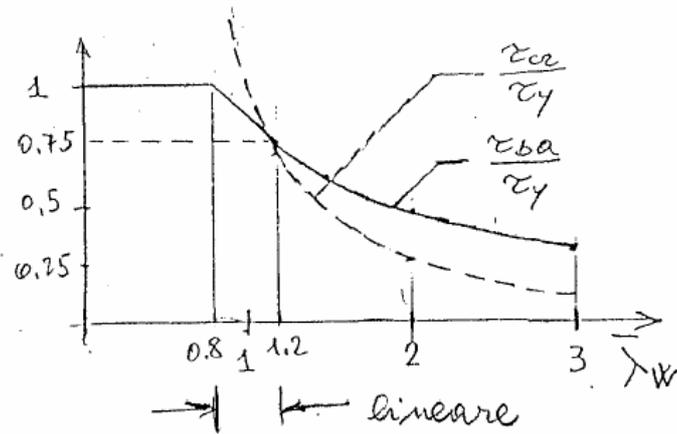
La snellezza adimensionale dell'anima $\bar{\lambda}_w$ ha un'espressione analoga a quella per la verifica a carico di punta ($\bar{\lambda} = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}}$). Introducendo l'espressione di τ_{cr} si ha:

$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_y / \sqrt{3}}{189800 k_\tau}} (d / t_w) = \frac{d / t_w}{\sqrt{\frac{189800 \sqrt{3}}{f_y}} \sqrt{k_\tau}} = \frac{d / t_w}{\sqrt{\frac{189800 \sqrt{3}}{235}} \sqrt{\frac{235}{f_y}} \sqrt{k_\tau}} = \frac{d / t_w}{37.4 \varepsilon \sqrt{k_\tau}}$$

L'espressione di τ_{cr} vale solo in campo elastico, cioè per valori inferiori al limite di proporzionalità che l'EC3 fissa in $0.75 \tau_y$. Il limite di validità in termini di $\bar{\lambda}_w$ vale quindi:

$$\tau_{ba} = 0.9 \frac{\tau_y}{\lambda_w} < 0.750 \tau_y \rightarrow \bar{\lambda}_w > 1.2$$

Per $\bar{\lambda}_w < 0.8$ si considera $\tau_{ba} = \tau_y$ e nel tratto intermedio si adotta un raccordo lineare:



(3) Il fattore di imbozzamento per taglio k_τ è determinato come segue: (teoria classica)

- Per le anime munite di irrigidimenti trasversali agli appoggi ma senza irrigidimenti trasversali intermedi:

$$k_\tau = 5,34$$

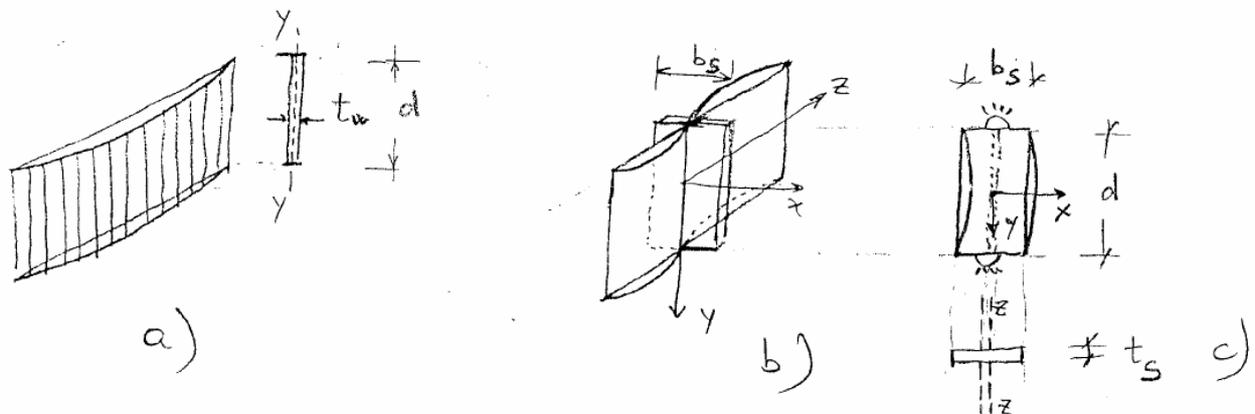
- Per le anime munite di irrigidimenti trasversali agli appoggi e di irrigidimenti trasversali intermedi con $a/d < 1$:

$$k_\tau = 4 + \frac{5,34}{(a/d)^2}$$

- Per le anime munite di irrigidimenti trasversali agli appoggi e di irrigidimenti trasversali intermedi con $a/d \geq 1$:

$$k_\tau = 5,34 + \frac{4}{(a/d)^2}$$

Dimensionamento delle nervature di irrigidimento



Affinché si possano raggiungere i valori della tensione critica di imbozzamento su cui si basano le verifiche, è necessario che gli irrigidimenti rimangano indeformati in modo da costituire un vincolo

efficace per il contorno del pannello. Essi devono quindi una rigidezza tanto maggiore quanto maggiore è quella del pannello.

L'irrigidimento deve contrastare l'inflessione del pannello di spessore t_w intorno all'asse y-y (fig. a), rispetto al quale ha rigidezza flessionale:

$$EI_w = E \frac{dt_w^3}{12}$$

L'irrigidimento è impegnato a flessione intorno all'asse z-z (fig. c) con rigidezza flessionale:

$$EI_s = E \frac{t_s b_s^3}{12}$$

L'irrigidimento è efficiente se il rapporto $\gamma = EI_s / (EI_w)$ è superiore ad un valore γ^* che varia con il tipo di sollecitazione e la distanza a fra gli irrigidimenti.

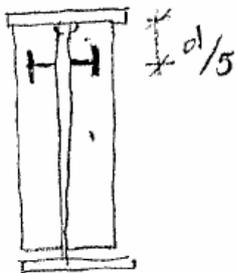
Secondo EC3 #5.6.5 tale valore è:

$$\text{per } a/d < \sqrt{2} \quad \gamma^* = 18/(a/d)^2 \quad \rightarrow \quad I_s \geq 1.5(dt_w)^3 / a^2$$

$$\text{per } a/d \geq \sqrt{2} \quad \gamma^* = 9 \quad \rightarrow \quad I_s \geq 0.75dt_w^3$$

E' buona norma inoltre limitare la snellezza dell'irrigidimento a 60:

$$\lambda_s = \frac{d}{i_s} = \frac{d}{b_s / \sqrt{12}} < 60$$



Analoghe considerazioni valgono per gli irrigidimenti longitudinali dell'anima necessari nelle travi molto alte (travi da ponte) per evitare l'imbozzamento della porzione compressa. Questi irrigidimenti sono necessari secondo la normativa americana AASHO se $d/t_w > 170$ e vanno posti alla distanza di $d/4$ - $d/5$ dall'ala compressa.

5.6.5. Irrigidimenti trasversali intermedi

(1) Per entrambi i metodi, post-critico semplificato e delle bande diagonali di trazione, si raccomanda che la forza di compressione N_s in un irrigidimento trasversale intermedio sia determinata dall'equazione:

$$N_s = V_{sd} \cdot d \cdot t_w \cdot \tau_{bb} / \lambda_{M1} \quad \text{con la limitazione } N_s \geq 0 \quad [5.63]$$

nella quale τ_{bb} è la resistenza iniziale all'instabilità per taglio ricavata da 5.6.4.1(2); si raccomanda di adottare il valore minore di τ_{bb} per i due pannelli adiacenti all'irrigidimento.

(2) Si raccomanda che la resistenza all'instabilità degli irrigidimenti sia determinata come specificato in 5.7.6.

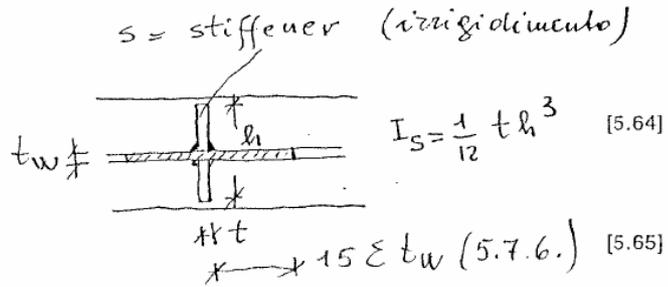
(3) Si raccomanda che il momento di inerzia di un irrigidimento trasversale intermedio soddisfi la seguente equazione: (2)

- se $a/d < \sqrt{2}$:

$$I_s \geq 1,5d^3 t_w^3 / a^2$$

- se $a/d \geq \sqrt{2}$:

$$I_s \geq 0,75 d t_w^3$$



(1) $\tau_{bb} = \tau_y$ per $\bar{\lambda}_w < 0,8$
 $= 0,64 \tau_y$ per $\bar{\lambda}_w = 1,25$
 $= \tau_{cr}$ per $\bar{\lambda}_w > 1,25$ } andamento lineare

(2) lo spessore t si assume in genere $\approx t_w$ e la condizione di solito è verificata

5.6.7. Interazione fra forza di taglio, momento flettente e forza assiale

5.6.7.1. Generalità

(1) Se le piattabande sono in grado di resistere all'intero valore di progetto del momento flettente e della forza assiale agenti nella membratura, non è necessario ridurre la resistenza di progetto a taglio dell'anima per tener conto del momento e della forza assiale agenti nella membratura stessa, ad eccezione di quanto indicato in 5.6.4.1(4) per il metodo delle bande diagonali di trazione.

(2) Per la procedura da seguire negli altri casi fare riferimento:

- al punto 5.6.7.2 per il metodo post-critico semplificato;
- al punto 5.6.7.3 per il metodo delle bande diagonali di trazione.

5.6.7.2. Metodo post-critico semplificato

(1) Si può assumere che la sezione trasversale sia verificata, trascurando l'effetto della forza di taglio sulla resistenza flessionale di progetto, se i seguenti criteri sono entrambi soddisfatti:

$$M_{Sd} \leq M_{f,Rd} \quad [5.66a]$$

$$V_{Sd} \leq V_{ba,Rd} \quad [5.66b]$$

dove: $M_{f,Rd}$ è il momento resistente plastico di progetto di una sezione trasversale costituita dalle sole piattabande, prendendo in considerazione la larghezza efficace b_{eff} della piattabanda compressa: vedere 5.3.5;

$V_{ba,Rd}$ è il valore di progetto della resistenza all'instabilità per taglio indicata in 5.6.3.

Quando è pure applicata una forza assiale N_{Sd} , si raccomanda di ridurre il valore di $M_{f,Rd}$ conseguentemente (vedere 5.4.8).

(2) Non è necessario ridurre la resistenza di progetto della sezione trasversale al momento flettente ed alla forza assiale per tener conto della azione tagliente, purché V_{Sd} non deve essere maggiore del 50% di $V_{ba,Rd}$.