

5.7. Resistenza dell'anima alle forze trasversali

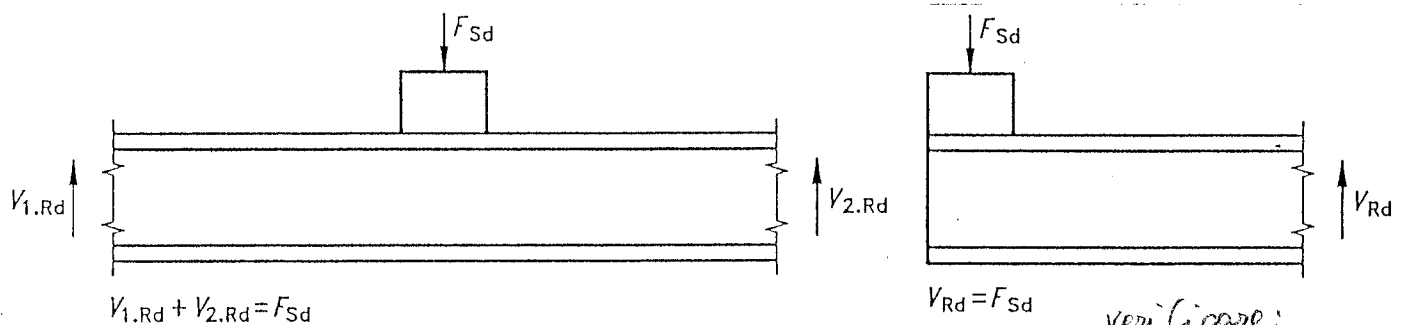
5.7.1. Principi

(1) La resistenza di un'anima non irrigidita alle forze trasversali, applicate attraverso una piattabanda, è governata da una delle seguenti modalità di collasso:

- schacciamento dell'anima in vicinanza della piattabanda, accompagnato dalla deformazione plastica della piattabanda;
- imbozzamento dell'anima sotto forma di un'instabilità localizzata e schacciamento dell'anima in prossimità della piattabanda, accompagnato dalla deformazione plastica della piattabanda;
- instabilità dell'anima estesa a gran parte dell'altezza della membratura.

(2) Viene fatta distinzione fra le due seguenti modalità di applicazione del carico:

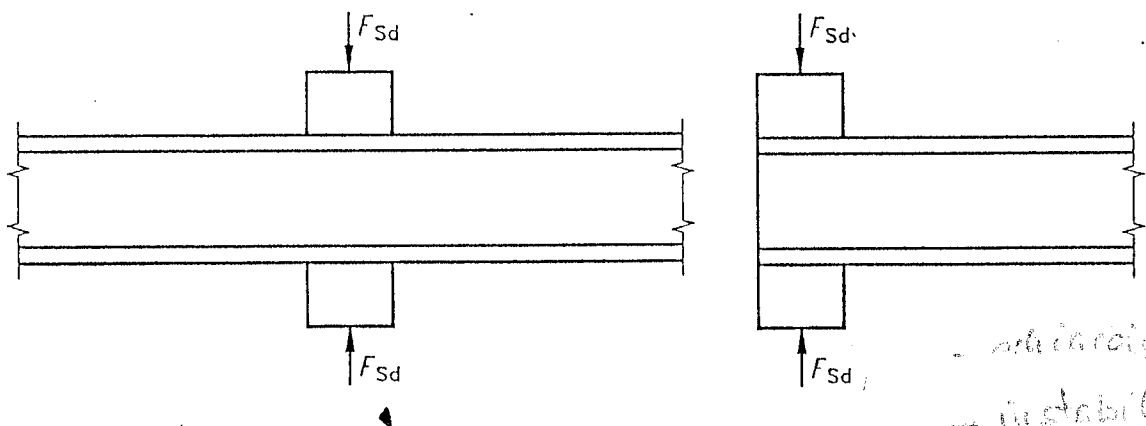
- forze applicate attraverso una piattabanda e contrastate dalle azioni taglianti resistenti nell'anima: vedere fig. 5.7.1(a);
- forze applicate ad una piattabanda e trasferite attraverso l'anima direttamente all'altra piattabanda: vedere fig. 5.7.1(b).



(a) Forze contrastate dall'azione tagliante resistente nell'anima

verificare:

- *schacciamento*
- *imbozzamento*



(b) Forze trasmesse direttamente attraverso l'anima

- *scioccamento*
- *instabilità*

5.7.2. Lunghezza del tratto di contatto rigido

- (1) La lunghezza del tratto di contatto rigido della piattabanda è la distanza sulla quale è effettivamente distribuita la forza applicata.
- (2) La resistenza dell'anima alle forze trasversali è influenzata dalla lunghezza del tratto di contatto rigido.
- (3) *Si raccomanda che la lunghezza del tratto di contatto rigido s_s sia determinata dalla diffusione del carico, attraverso componenti in acciaio che siano correttamente tenuti in posizione, con una pendenza di 1:1 (vedere fig. 5.7.2). Si raccomanda di non tener conto di alcuna diffusione attraverso pacchetti di elementi sciolti.*

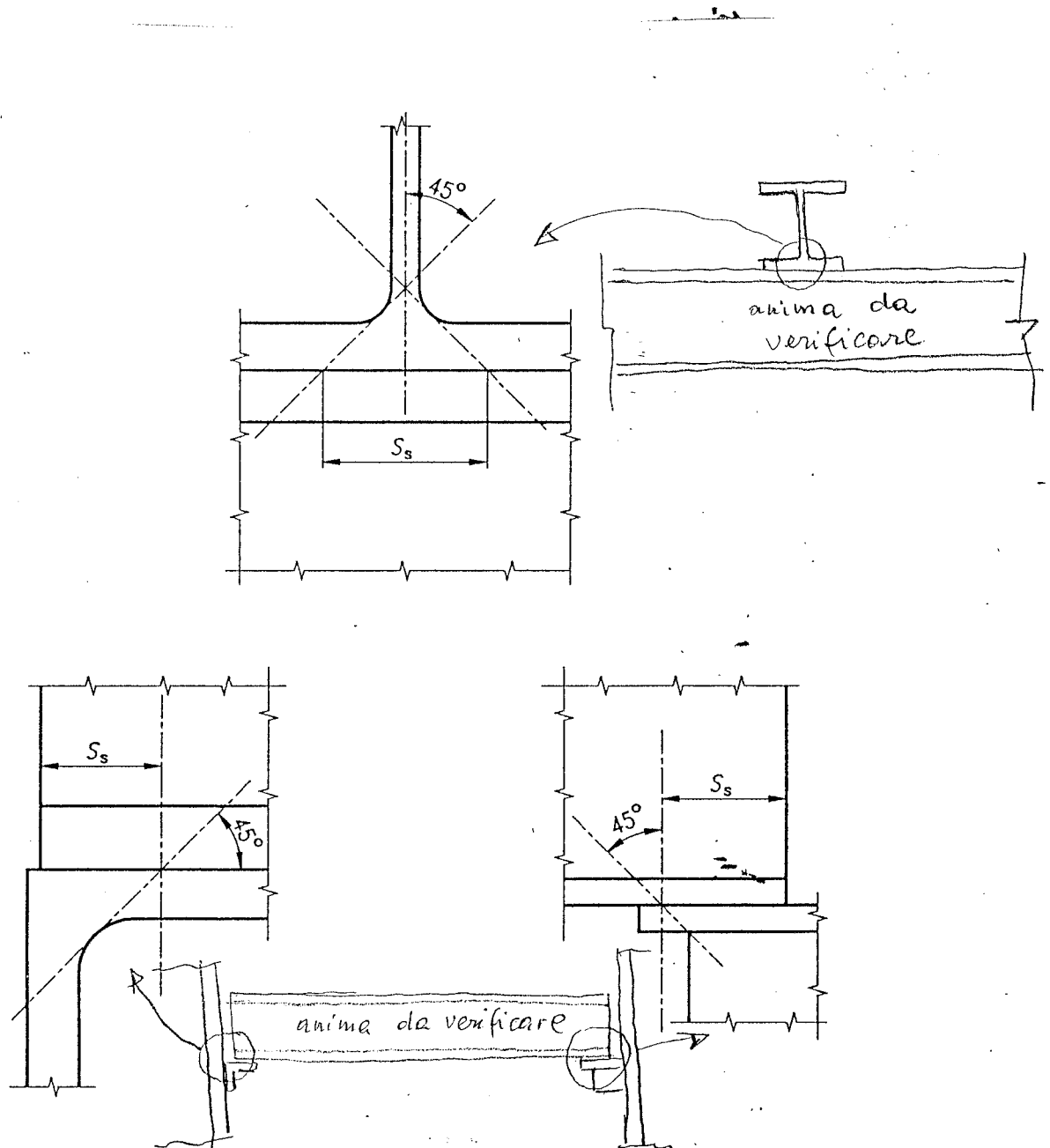


Fig. 5.7.2 - Lunghezza del tratto di contatto rigido

5.7.3. Resistenza allo schiacciamento

(1) Si raccomanda che la resistenza di progetto allo schiacciamento $R_{y,Rd}$ dell'anima di una sezione ad I, H o U sia ottenuta dalla equazione:

$$R_{y,Rd} = (s_s + s_y) t_w f_{yw} / \gamma_{M1} \quad [5.71]$$

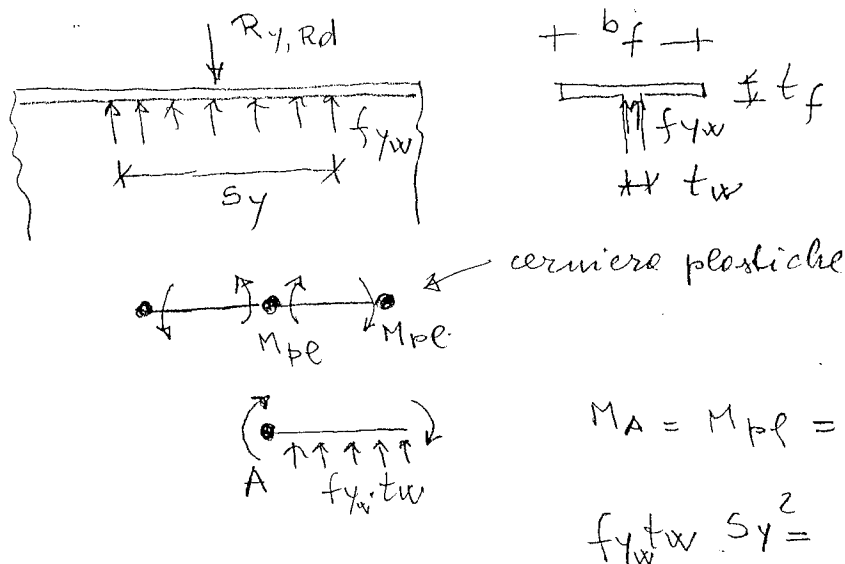
nella quale s_y è dato dall'equazione:

$$s_y = 2t_f (b_f / t_w)^{0.5} [f_{yf} / f_{yw}]^{0.5} [1 - (\gamma_{M0} \sigma_{t,Ed} / f_{yf})^2]^{0.5} \quad [5.72]$$

dove: $\sigma_{t,Ed}$ è la tensione longitudinale nella piattabanda.

Con la limitazione che b_f non sia preso maggiore di $25t_f$.

Le formule [5.72] è basata sul seguente criterio: se la piattabanda non è soggetta a σ dovute alle azioni interne dello trave ($\sigma_{t,Ed} = 0$), esse è in grado di resistere a flessione allo seguente distribuzione di carico



$$M_{pe} = \frac{b_f t_f^2}{4} f_{yf}$$

$$s_y^2 = 4 \frac{b_f t_f^2}{t_w} \frac{f_{yf}}{f_{yw}}$$

(4) Per i carichi delle ruote degli apparecchi di sollevamento, trasmessi attraverso una rotaia di scorrimento gravante su una piattabanda ma non saldata ad essa, si raccomanda che la resistenza di progetto allo schiacciamento dell'anima $R_{y,Rd}$ sia presa pari a:

5.7.4. Resistenza all'imbozzamento *locale* (web crippling)

(1) Si raccomanda che la resistenza di progetto all'imbozzamento $R_{a,Rd}$ dell'anima di una sezione ad I, H o U sia determinata dalla equazione:

$$R_{a,Rd} = 0,5 t_w^2 (E f_{yw})^{0,5} [(t_f/t_w)^{0,5} + 3 (t_w/t_f) (s_s/d)] / \gamma_{M1} \quad [5.77]$$

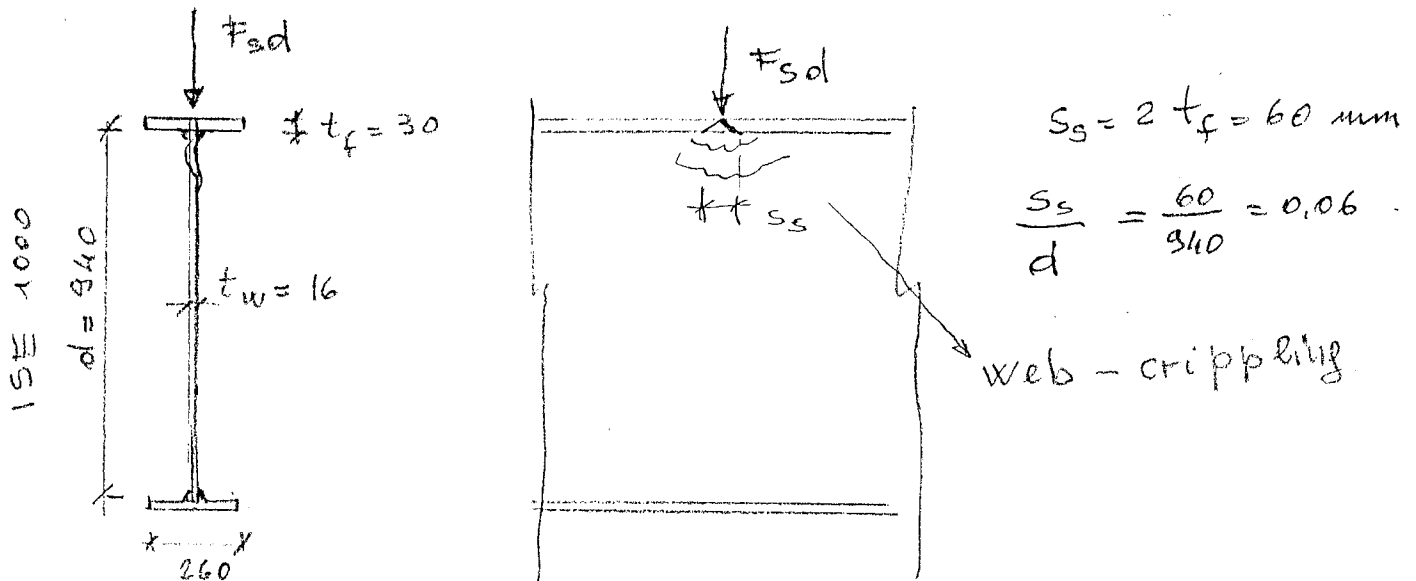
dove: s_s è la lunghezza del tratto di contatto rigido indicata al punto 5.7.2(3);

con la limitazione che s_s/d non sia preso maggiore di 0,2.

(2) Qualora la membratura sia pure soggetta a momenti flettenti, si raccomanda che siano soddisfatti i seguenti criteri:

omissis

Esempio



$$\begin{aligned} R_{a,Rd} &= 0,5 \times t_w^2 \sqrt{210'000 \times 235} \left[\sqrt{30/16} + 3 \left(\frac{16}{30} \right) \times 0,06 \right] / \gamma_{M1} \\ &= 3512 \left[1,37 + 0,10 \right] t_w^2 / \gamma_{M1} = \\ &= 5147 t_w^2 / \gamma_{M1} = 1'197'800 \text{ N} \end{aligned}$$

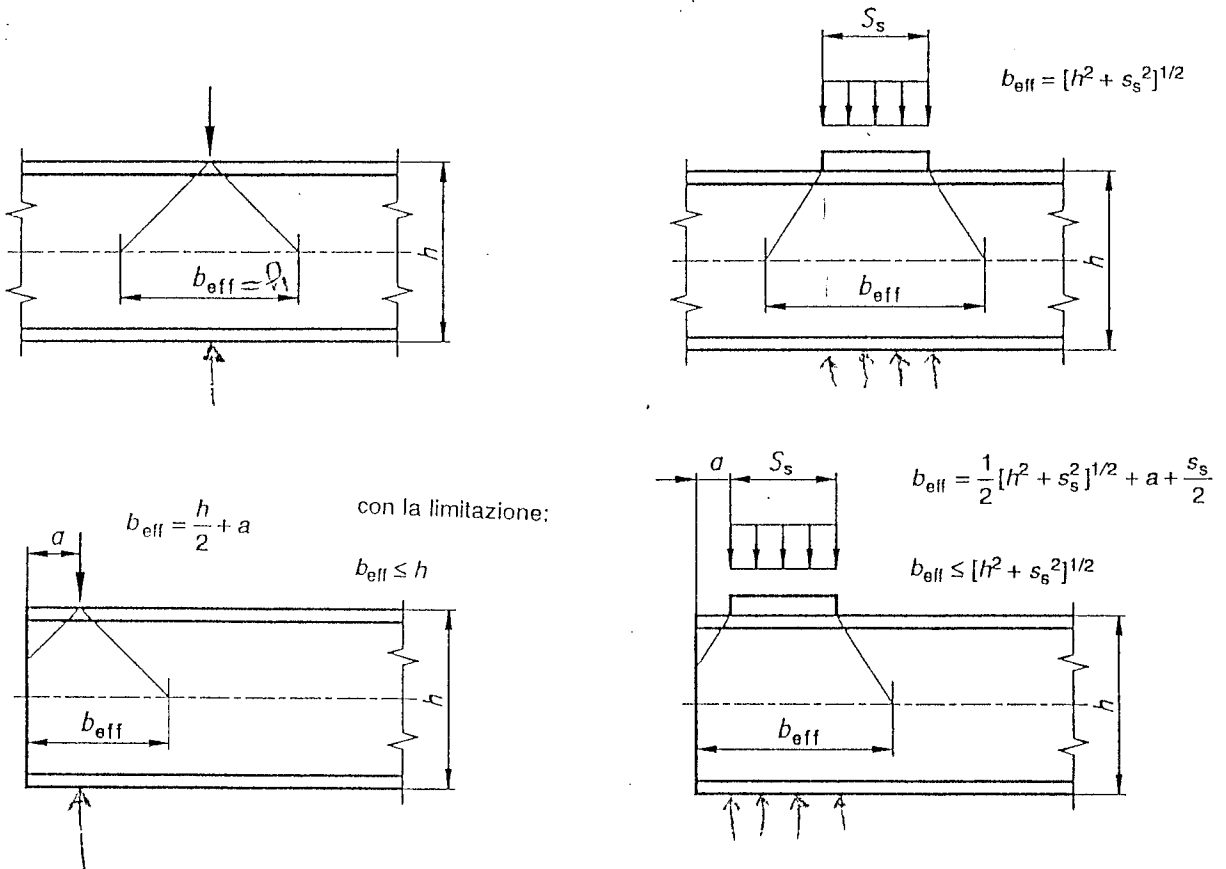
È un fenomeno di imbozzamento locale causato dal carico concentrato. È poco sensibile all'altezza d dell'anima e più sensibile al rapporto t_f/t_w e ovviamente allo spessore t_w dell'anima.

5.7.5. Resistenza di progetto all'instabilità (verificare sugli appoggi)

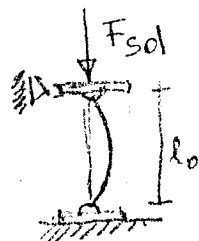
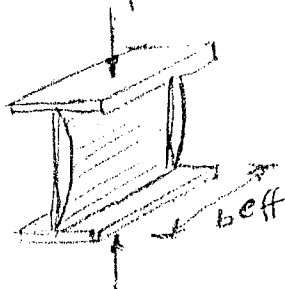
(1) Si raccomanda di determinare la resistenza di progetto all'instabilità $R_{b,Rd}$ dell'anima di una sezione ad I, H o U considerando l'anima come una membratura virtuale compressa avente una larghezza efficace b_{eff} ricavata dalla relazione:

$$b_{eff} = [h^2 + s_s^2]^{0,5} \quad [5.79]$$

(2) In prossimità della estremità della membratura (o in corrispondenza delle aperture nell'anima) si raccomanda che la larghezza efficace b_{eff} non sia assunta maggiore della larghezza realmente disponibile, misurata a metà dell'altezza: vedere fig. 5.7.3.



La verifica va eseguita tipicamente sugli appoggi, dove però di solito si inseriscono anche gli verifici di snodi.



$$l_0 = d$$

$$i = t_w / \sqrt{12}$$

verificare a carico di punta con curve C, $\beta_A = 1$

5.7.6. Irrigidimenti trasversali

- (1) Quando si verifichi la resistenza all'instabilità, si raccomanda che il computo della sezione trasversale efficace di un irrigidimento includa una porzione di lamiera dell'anima pari a $30 \epsilon t_w$, corrispondente a $15 \epsilon t_w$ per ciascun lato dell'irrigidimento: vedere la fig. 5.7.4. Alla estremità della membratura (o in corrispondenza delle aperture nell'anima) si raccomanda che la dimensione di $15 \epsilon t_w$ sia limitata alla effettiva dimensione disponibile.
- (2) Si raccomanda che la resistenza al carico di punta fuori del piano sia determinata come indicato in 5.5.1, usando la curva di instabilità c ed una lunghezza di libera inflessione l non minore di $0,75 d$, o maggiore se appropriata considerando le condizioni di vincolo.
- (3) Si raccomanda che gli irrigidimenti di estremità e gli irrigidimenti in corrispondenza degli appoggi interni siano normalmente disposti sui due lati e simmetrici rispetto alla mezzeria dell'anima.
- (4) Si raccomanda che gli irrigidimenti posizionati dove sono applicate forze esterne di rilevante intensità siano preferibilmente simmetrici.

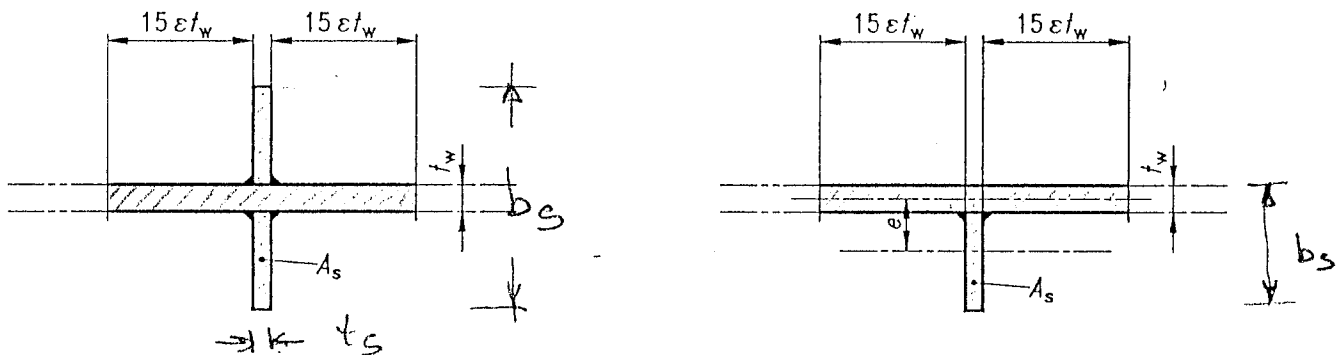
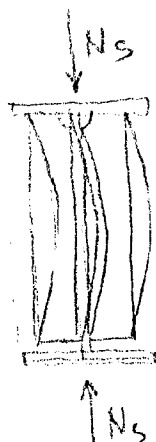


Fig. 5.7.4 - Sezione trasversale efficace degli irrigidimenti

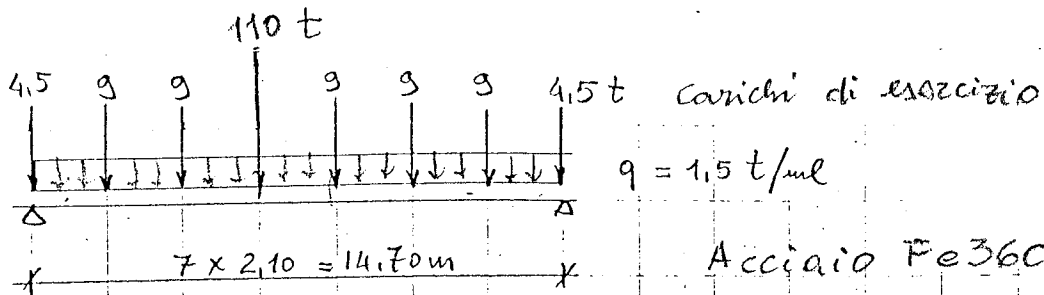
- devono essere sufficientemente rigidi per impedire l'imbottimento dell'anima (par. 5.6.5. (3))
- devono essere verificati a carico di punta per l'azione assiale N_s dovuta al carico concentrato ($N_s = F_{sd}$) o al taglio ($N_s = V_{sd}$) eventualmente diminuito delle resistenze iniziali all'imbottimento (par. 5.6.5).



La sezione i e e croce e il raggio di inerzia vale

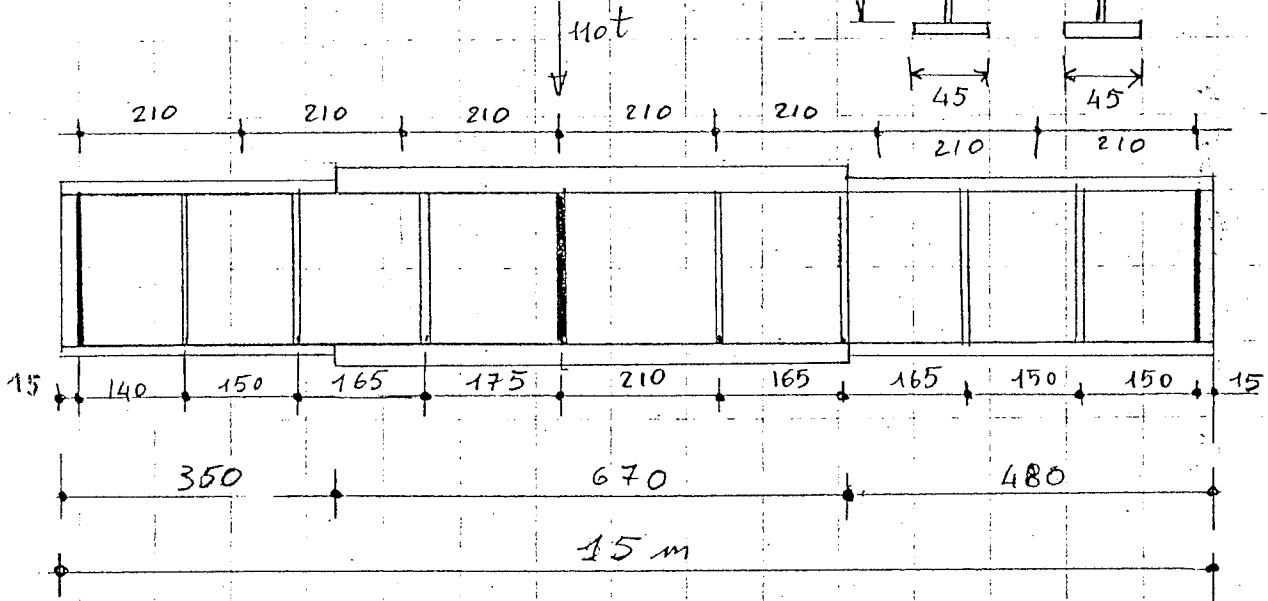
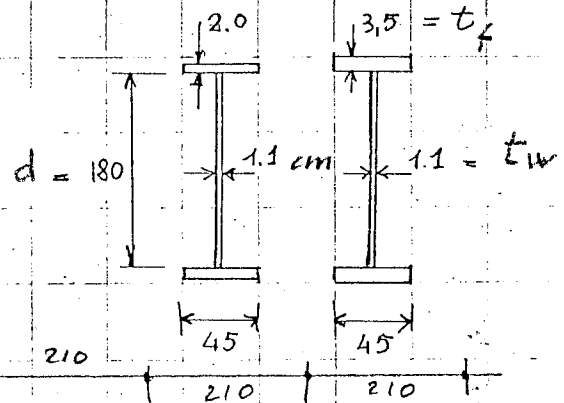
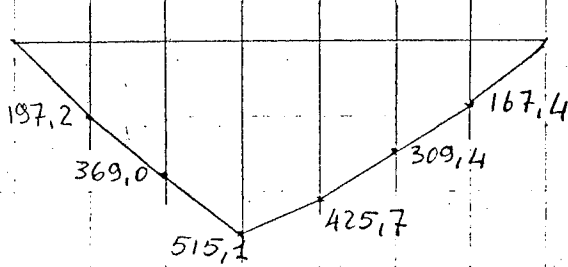
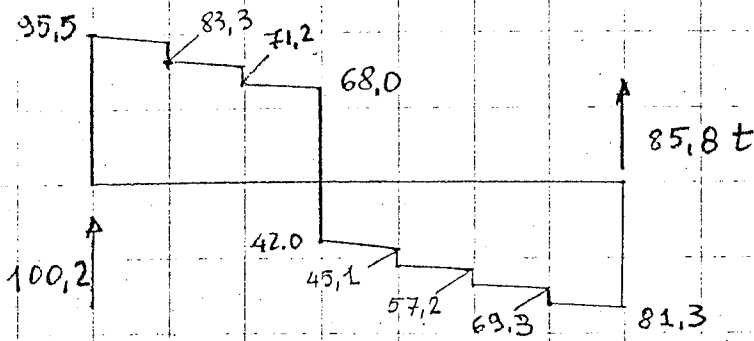
$$i_s = b_s / \sqrt{12}$$

ESEMPIO



Acciaio Fe360

$f_y = 235 \text{ (} t_f < 40 \text{ mm)}$



$\frac{d}{t_w} = \frac{180}{1,1} = 165 < 170$

Non sono necessari irrigidimenti d'anime longitudinali (secondo AASHTO)

Verifica a flessione

Momento massimo di progetto (carichi dovuti a soli pesi propri)

$$M_{sd} = \gamma_g \cdot 515.1 \text{ tm} = 1.35 \cdot 515.1 \text{ kNm} = 695.4 \text{ kNm}$$

classificazione della sezione:

$$d/t_w > 124 \rightarrow \text{classe 4}$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad (\text{par. 5.4.5.2})$$

Prospetto 5.3.2 - Elementi compressi interni

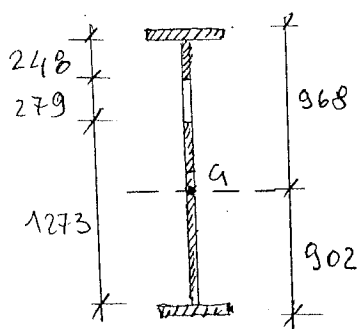
	$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$					
	flessione					
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
Coefficiente di imbozzamento k_σ	4,0	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

calcolo W_{eff} . (par. 5.3.5.)

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28.4 \sqrt{k_\sigma}} = \frac{1800/11}{28.4 \sqrt{23.9}} = 1.179 > 0.673$$

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0.22) / \bar{\lambda}_p^2 = 0.690$$

$$b_{eff} = \rho b_c = 0.690 \times 900 = 621 \text{ mm}$$



$$b_{e1} = 0.4 b_{eff} = 248$$

$$b_{e2} = 0.6 b_{eff} = 373$$

$$W_{eff, sup} = 3.201 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

(per la sezione lordo $W = 3.409 \cdot 10^7$)

$$M_{c,Rd} = 235 \times 3.201 \cdot 10^7 / 1,1 / 10^6 = 6839 \text{ KN.m} \approx M_{sd}$$

Verifica nel cambio di sezione

$$M_{sd} = 1,35(1972 + 3690) / 2 = 3822 \text{ KN.m}$$

$$W_{eff} = 2.201 \cdot 10^7 \quad M_{c,Rd} = 4702 \text{ KN.m}$$

E' bene che la sezione in cui vi e' la saldatura sia poco sollecitata -

Verifica a taglio

Nelle sezioni di momento massimo il taglio

$$\text{vale: } V_{sd} = 1,35 \times 680 = 918 \text{ KN}$$

$$V_{pe,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (\text{par. 5.4.6})$$

$$A_v = d t_w = 1800 \times 11 = 19800 \text{ mm}^2 \quad (\text{sezioni saldate a I})$$

$$V_{pe,Rd} = 19800 (235 / \sqrt{3}) / 1,1 / 10^3 = 2442 \text{ KN}$$

Poiche' $V_{sd} < 50\% V_{pe,Rd}$, non e' necessario nessuna riduzione del momento resistente (par. 5.4.7 (2)) -

Va pero' eseguite le verifiche di resistenza all'instabilita' per taglio - Poiche' tale verifica dipende dal rapporto a/d fra la larghezza del pannello irrigidito e l'altezza dell'anima, esse andrebbe eseguite per tutti i pannelli di dimensioni diverse. Ci limitiamo ad eseguirle per il pannello vicino all'appoggio sinistro dove il taglio e' massimo -

$$V_{sd,1} = 1,35 \times 955 = 1289 \text{ KN} < V_{pe,Rd} = 2442$$

$$V_{ba,Rd} = d t_w \tau_{ba} / \gamma_{ms} \quad (\text{par. 5.6.3})$$

$$k_{\tau} = 5,34 + \frac{4}{(a/d)^2} = 5,34 + \frac{4}{(1400/1800)^2} = 11,95$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{d/t_w}{37,4 \sqrt{k_{\tau}}} = \frac{1800/11}{37,4 \sqrt{11,95}} = 1,266 > 1,2$$

$$\tau_{ba} = \frac{0,9}{\bar{\lambda}_w} f_y / \sqrt{3} = 96,5 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{ba,Rd} = 1800 \times 11 \times 96,5 / 1,1 / 10^3 = 1737 \text{ KN} > V_{sd}$$

Verifica irrigidimenti

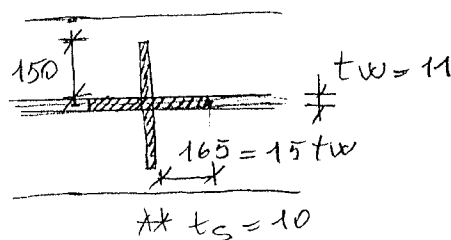
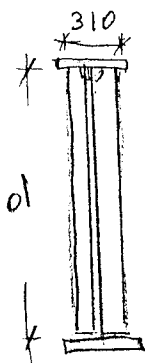
Gli irrigidimenti trasversali correnti, esclusi quelli sugli appoggi e quello soggetto al carico di punta, devono essere verificati:

- per essere sufficientemente rigidi (par. 5.6.5. (3))

$$I_s \geq 1,5 d^3 t_w^3 / a^2 \quad (a/d < \sqrt{2})$$

- a carico di punta con $N_{s5} = V_{sd}$ (par. 5.6.5.)

Si progettano irrigidimenti con tralci 150×10



$$I_s = \frac{1}{12} 10 \times 311^3 = 2,51 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_s > 1,5 \frac{1800^3 11^3}{1400^2} = 5,94 \cdot 10^6 \text{ O.K.}$$

$$N_{s5} = V_{sd} = 1289 \text{ KN} \quad (\text{taglio massimo})$$

Si trascurano a favore di stabilità le riduzioni previste dalle [5.63].

Si assume come lunghezza di libero inflessione $l_0 = d = 1800 \text{ mm}$

$$i = 311 / \sqrt{12} = 89.8 \text{ mm} \quad \lambda = \frac{1800}{89.8} = 20$$

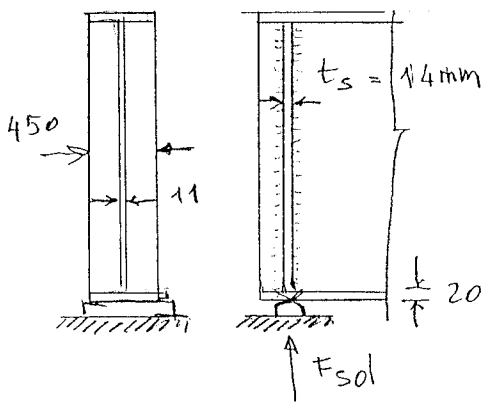
$$\bar{\lambda} = \frac{20}{93.9} = 0.21 \rightarrow \chi = 1$$

$$A = 300 \times 10 + (2 \times 165 + 10) 11 = 6740$$

$$N_{b,Rd} = \chi f_y A / \gamma_{M1} / 10^3 = 1440 \text{ kN} > N_s$$

Gli irrigidimenti sugli appoggi devono anche essere in grado di diffondere le reazioni

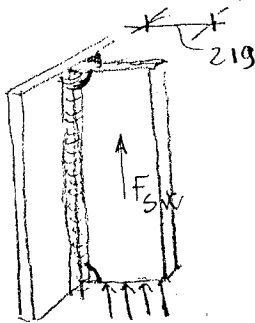
$$F_{sd} = 1.35 \times 1002 = 1353 \text{ kN}$$



Le forze F_{sd} si diffonde a 45° attraverso la piattabanda inferiore - l'area efficace è data quindi da

$$A_{eff} = \underbrace{2 \times 20 \times 11}_{\text{omina}} + \underbrace{439 \times 14}_{\text{irrigid.}} = 6586$$

$$F_{Rd} = f_y A_{eff} / \gamma_{M0} = 235 \times 6586 / 1.1 / 10^3 = 1407 \text{ kN} > N_{sd}$$



Le saldature verticali devono trasferire le forze assorbite dagli irrigidimenti all'anima

$$F_{sw} = \frac{F_{sd}}{A_{eff}} \times 219 \times 14 = 630 \text{ kN (su 2 cordoni)}$$

Per unità di lunghezza si ha

$$F_{sw1} = \frac{630'000}{2 \times 1800} = 175 \text{ N/mm}$$

La resistenza di progetto per unità di lunghezza
vale (par. 6.6.5.3):

$$F_{w,rd} = f_{w,d} \cdot a$$

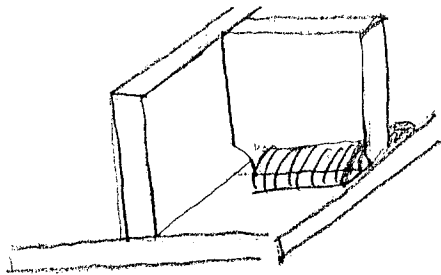
$$f_{w,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}} = 208 \quad f_u = 360 \quad \beta_w = 0.8$$

$$\gamma_{Mw} = 1.25$$

Occorre quindi uno spessore di gola

$$a = \frac{175}{208} = 0.8 \text{ mm.}$$

Si assume $a = 3 \text{ mm}$ (par. 6.6.5.2 (2)).



Le saldature inferiori sono
soffette a:

$$F_{SW1} = \frac{630'000}{2 \times 219} = 1438 \text{ N/mm}$$

Quindi devono avere uno spessore di gola

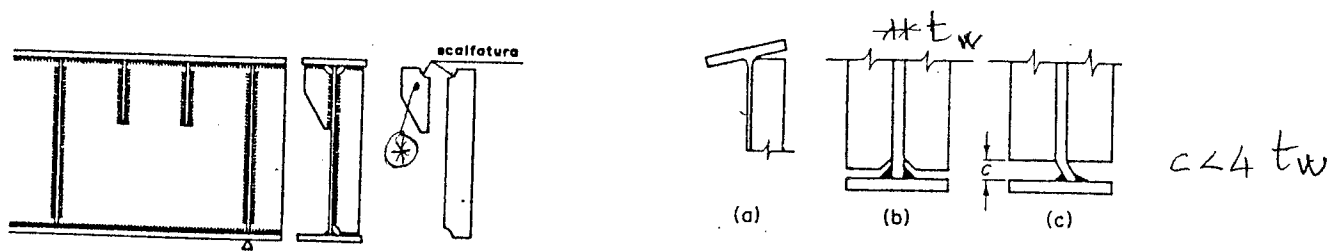
$$a = \frac{1438}{208} = 6.9 \rightarrow 7 \text{ mm (metà dello spessore dell'irrigidimento)}$$

In modo analogo si verificherà l'irrigidimento
centrale, che ha le stesse dimensioni essendo
il carico poco superiore. Esso non dovrà
però essere saldato sull'ala inferiore tesa
per non indebolirla.

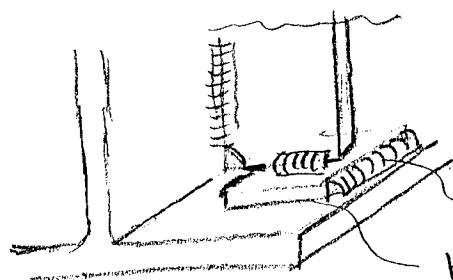
Modalità costruttive (Bollo par. §7.23.)

Raccomandazioni CECM

- le nervature siano saldate con cordoni continui
- le nervature longitudinali siano continue attraverso quelle trasversali
- le nervature trasversali siano collegate all'ala compressa (anche a quelle tese sugli appoggi)

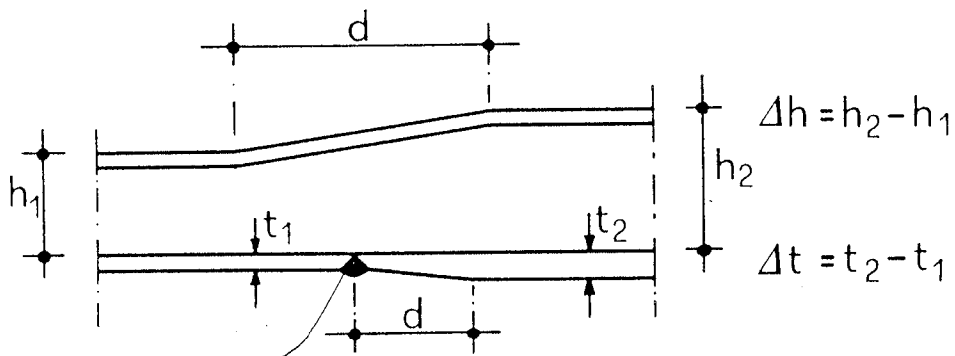


- (*) servono a impedire la rotazione dell'ala compressa.
- si deve evitare l'incontro di saldature ortogonali, quindi non si salda in corrispondenza delle scalfature.
 - Non saldare le costole all'ala tesa (si salda invece sugli appoggi semplici perché l'ala non è tesa), perché la presenza delle saldature perpendicolare al flusso delle tensioni di trazione è molto pericolosa soprattutto in presenza di fenomeni di fatica. È sufficiente rispettare la condizione $c < 4 t_w$, oppure si può eseguire il seguente particolare:



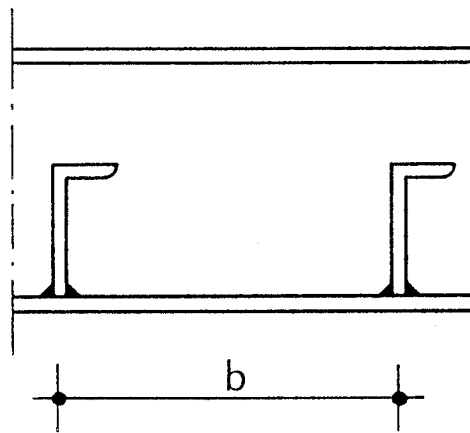
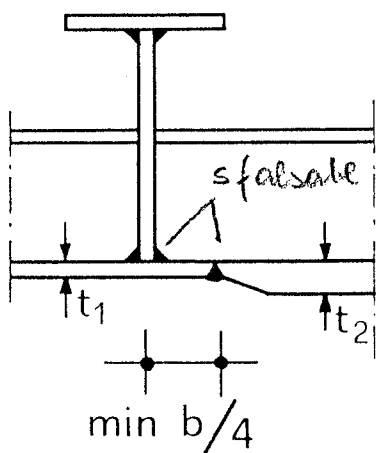
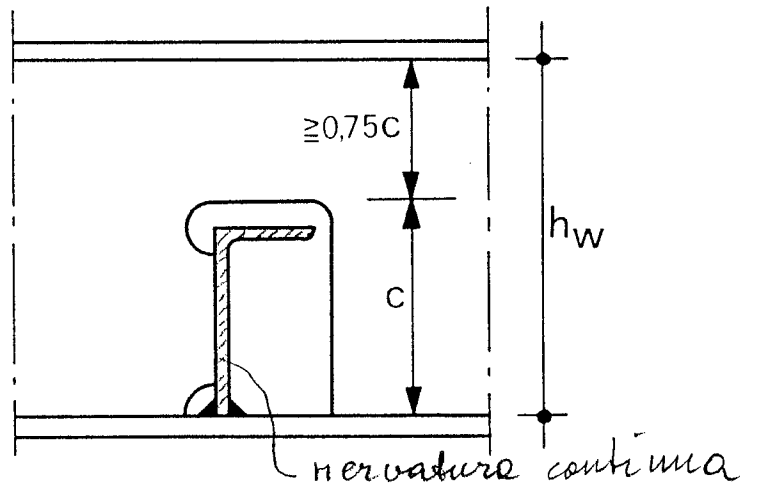
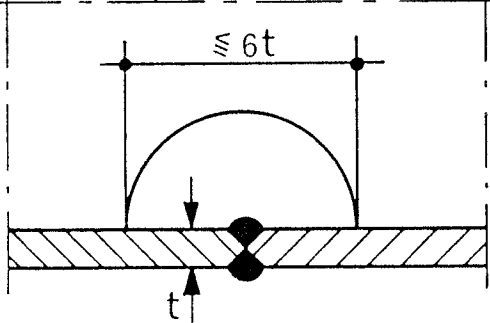
saldature longitudinale
piastre di appoggio

- cambiamenti di sezione graduati



- collegamenti a completo ripristino

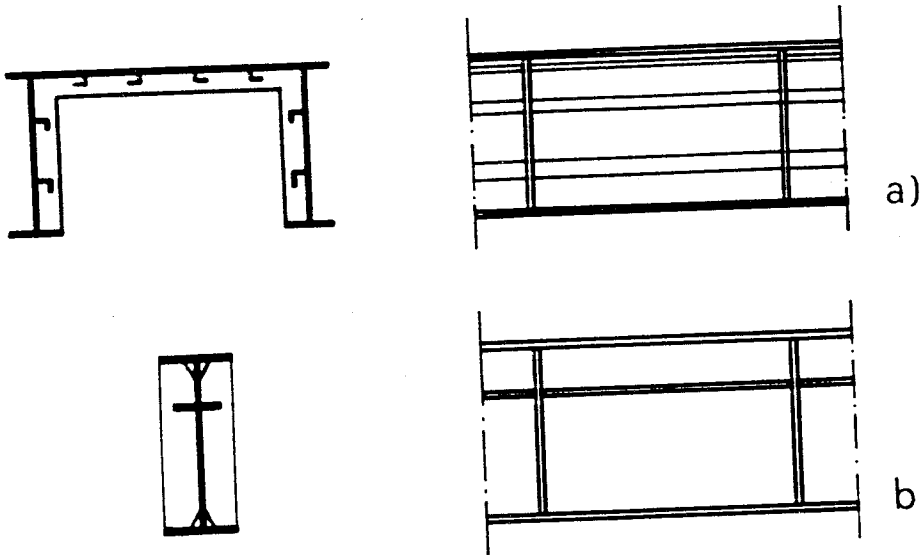
nervature longitudinali
(a perdure limitate)



9.7 LASTRE PIANE IRRIGIDITE

9.7.1 Analisi del problema

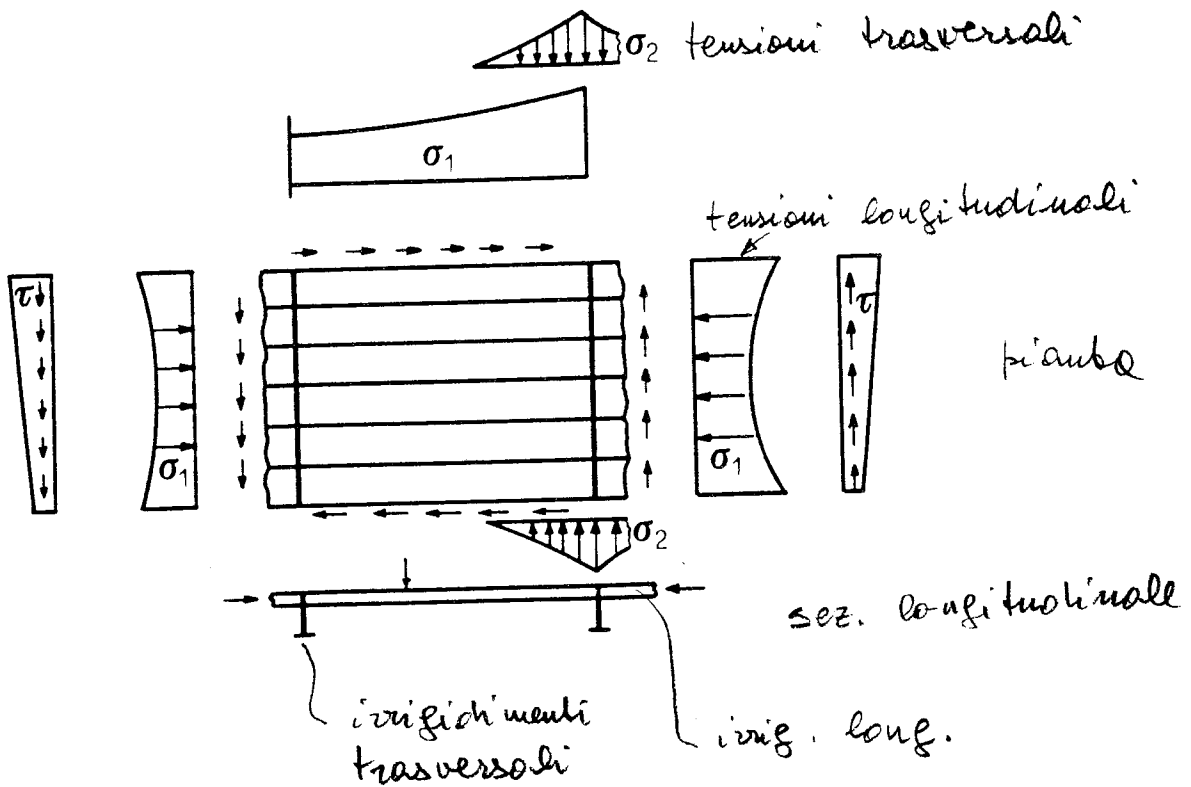
(v. libro)



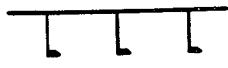
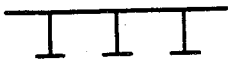
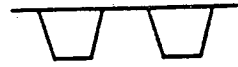
Lastre ortotropie
(ponti)

Armiatura snella

9.7.1.1. Lastre compresse



Tipologie di irrigidimenti longitudinali

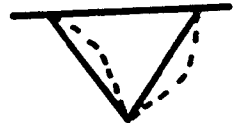
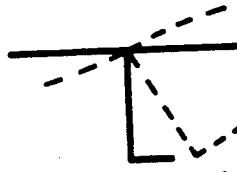


Modi di instabilità



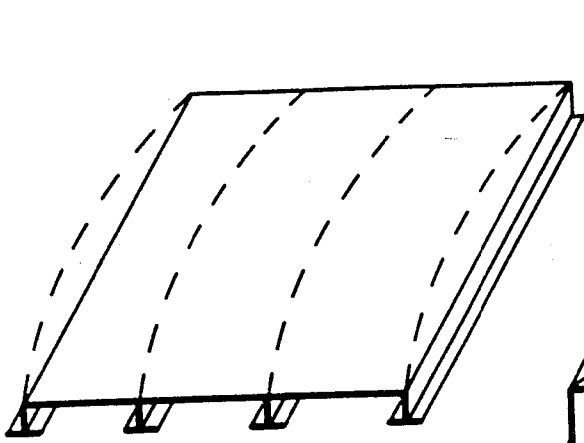
imbott. locale pannelli

a)



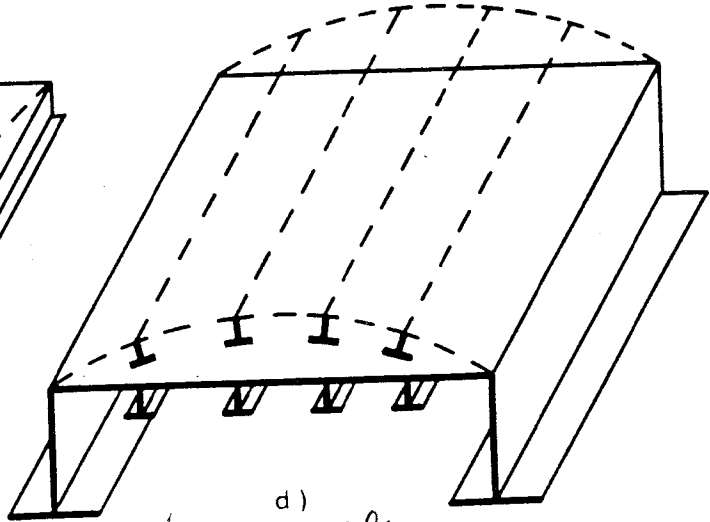
instab. locale irrigidimenti

b)



longitudinale

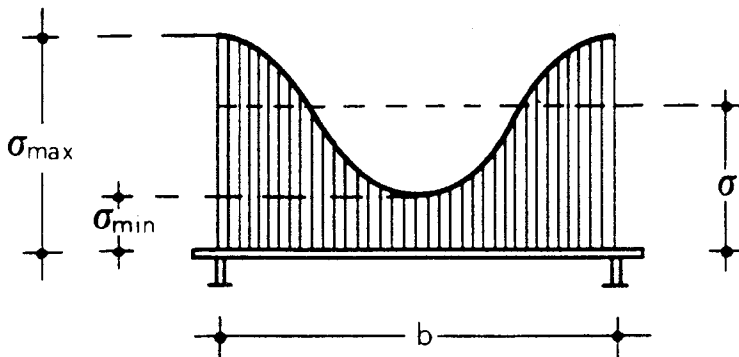
c)



transversale

d)

instabilità globale della lastra nervata



Scarse resistenze post-critiche