

Lezione

PONTI E GRANDI STRUTTURE

Prof. Pier Paolo Rossi

Università degli Studi di Catania

SEZIONI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO

Strutture composte acciaio-clt

Definizione

Dicesi struttura composta (acciaio-clt) una struttura costituita da :

- parti realizzate in acciaio per carpenteria
- parti realizzate in calcestruzzo armato (normale o precompresso)

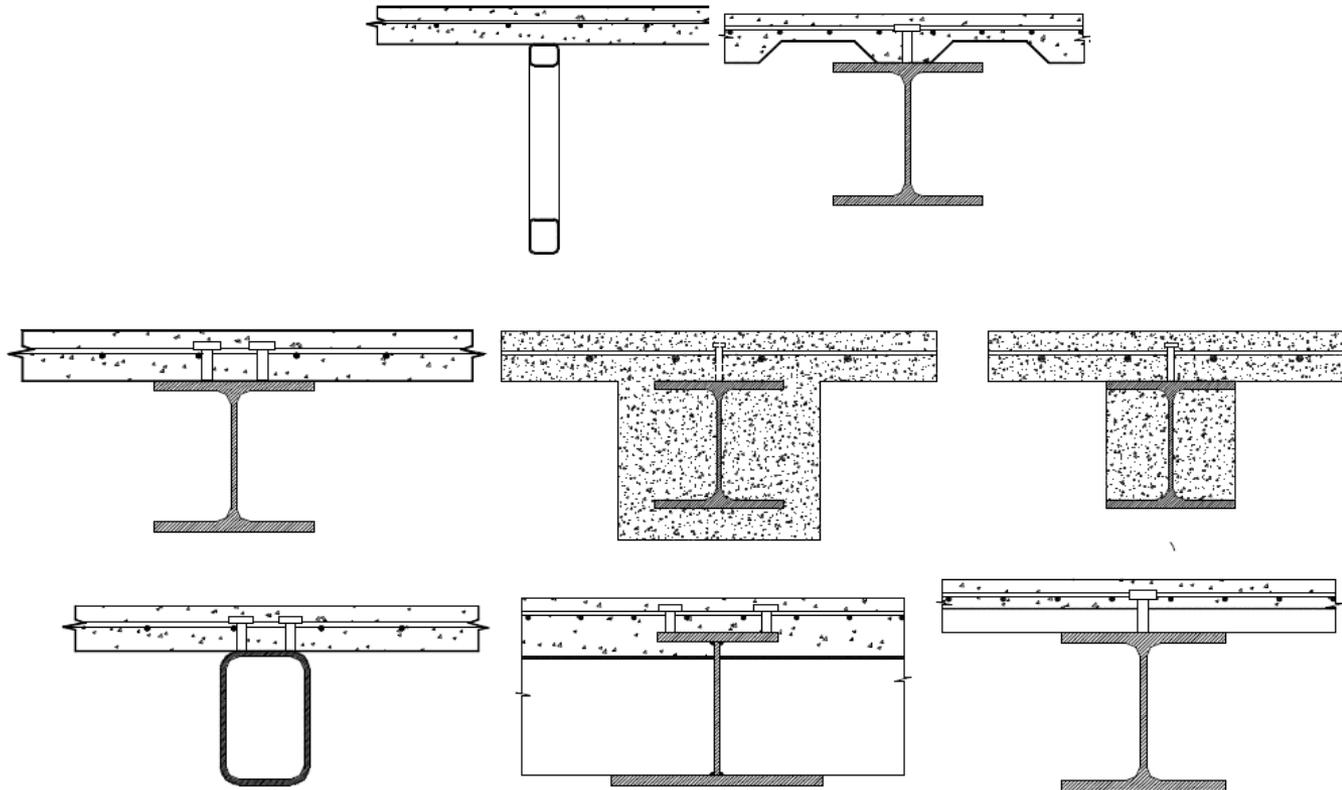
rese collaboranti fra loro con un sistema di connessione appropriatamente dimensionato

Esempi :

- Travi metalliche a parete piena con solette in c.a.
- Colonne in profilati metallici inglobati in getti di calcestruzzo armato
- Tubi metallici riempiti di calcestruzzo
- Lamiere grecate con getto collaborante in calcestruzzo

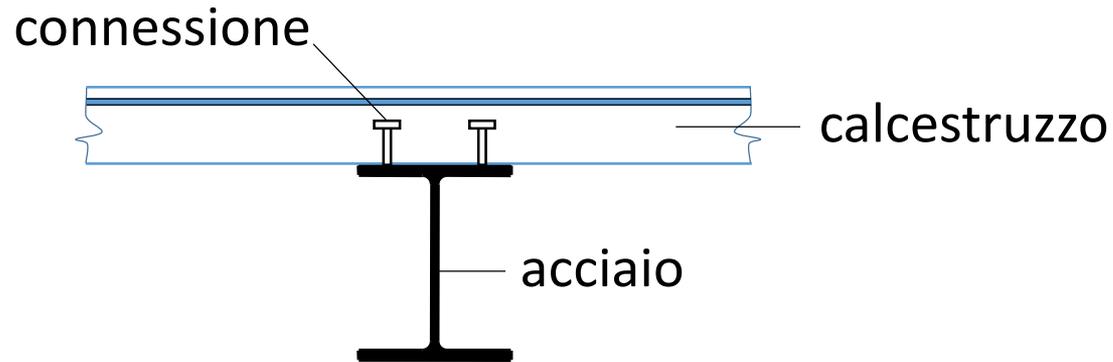
Strutture composte acciaio-clt

Travi



Strutture composte acciaio-clt

La connessione



- La connessione rende possibile la collaborazione tra i due componenti e dà vita all'elemento composto in termini di resistenza e rigidità
- La connessione diventa parte della struttura e da essa può dipendere la crisi della struttura

Travi composte acciaio-clt

Applicazioni a ponti



Travi composte acciaio-calcestruzzo

Vantaggi

Nelle travi semplicemente appoggiate

- **Stabilità** l'acciaio strutturale della sezione composta è teso
- **Leggerezza** il calcestruzzo è compresso. Ciò produce un buon utilizzo dei materiali e quindi una riduzione dei pesi
- **Durabilità** i problemi di fessurazione sono eliminati.



Nelle travi continue con più di due appoggi

- **Stabilità** l'acciaio strutturale è teso in larga parte della trave
- **Leggerezza** il calcestruzzo è compresso in larga parte della trave
- **Durabilità** Per limitare i problemi di fessurazione nelle zone con momento flettente negativo e fornire idonea resistenza flessionale, è necessario disporre opportuna armatura nella soletta in cls.



Travi composte acciaio-calcestruzzo

Vantaggi

In ogni caso

- **Praticità** è spesso possibile eliminare la cassetta in fase di getto, sostituita dalla lamiera grecata o dalle predalles.
- **Funzionalità** le deformazioni sono ridotte rispetto a quelle di sezioni in c.a. di dimensioni paragonabili

Travi composte acciaio-calcestruzzo

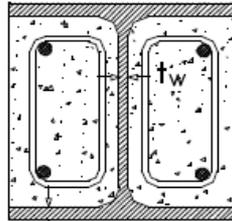
Svantaggi

- **Stabilità** instabilità flessione-torsionale
instabilità dei pannelli d'anima
- **Conessioni** soletta- trave
trave-trave e trave-colonna

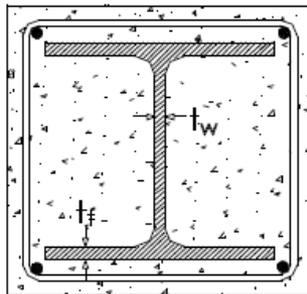
Membrature composte acciaio-clc

Colonne

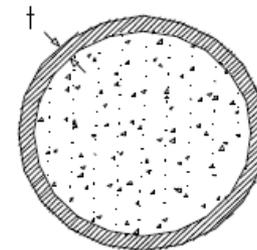
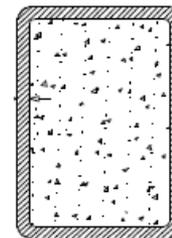
1. Colonne parzialmente rivestite



2. Colonne completamente rivestite



3. Tubolari riempiti di calcestruzzo



Colonne composte acciaio-clc

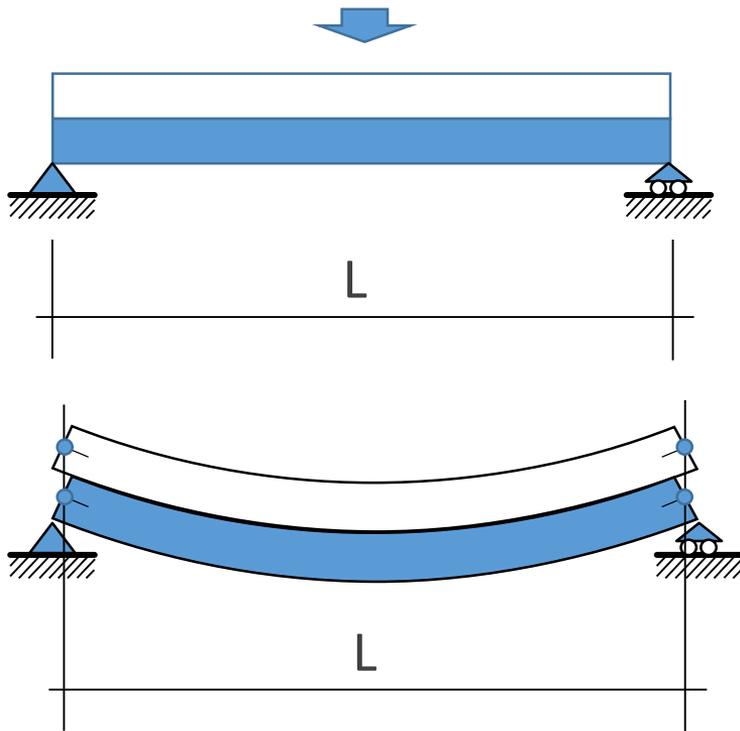
Vantaggi

- **Fuoco** nel caso di elementi parzialmente o totalmente inglobati nel calcestruzzo è garantita un'adeguata resistenza al fuoco
- **Casseforme** nel caso di elementi parzialmente o totalmente inglobati la colonna funge almeno parzialmente da cassaforma. Il vantaggio è ancora più evidente nel caso di sezioni tubolari in acciaio
- **Stabilità** Il profilo di acciaio non può deformarsi liberamente e quindi la lunghezza libera di inflessione si riduce.
- **Praticità** Le colonne possono essere montate prima e poi riempite di calcestruzzo
- **Resistenza** Nel caso di sezioni circolari riempite di calcestruzzo, l'acciaio ha un effetto di confinamento sul calcestruzzo. Ciò determina un aumento della resistenza e della rigidità del calcestruzzo.

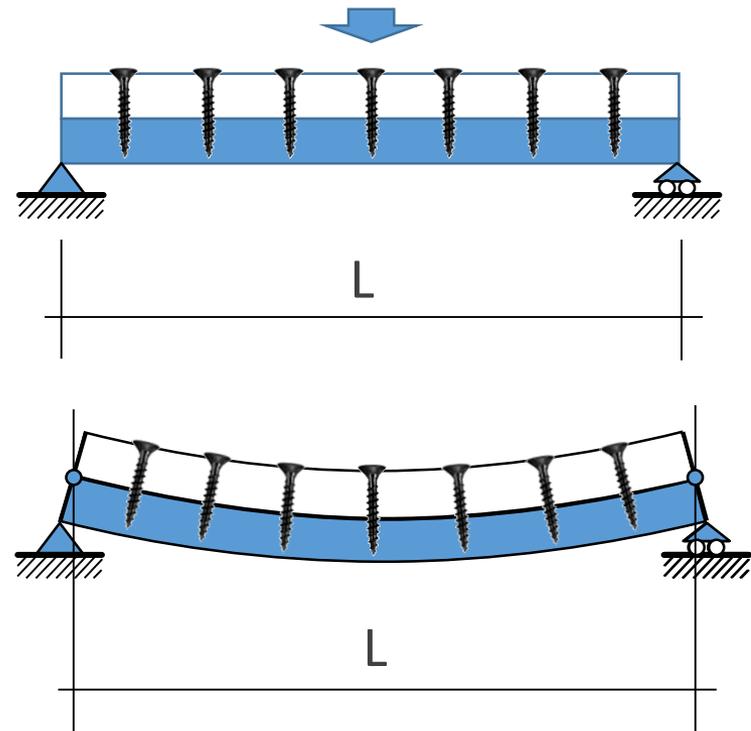
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Funzionamento della connessione

Senza connessione

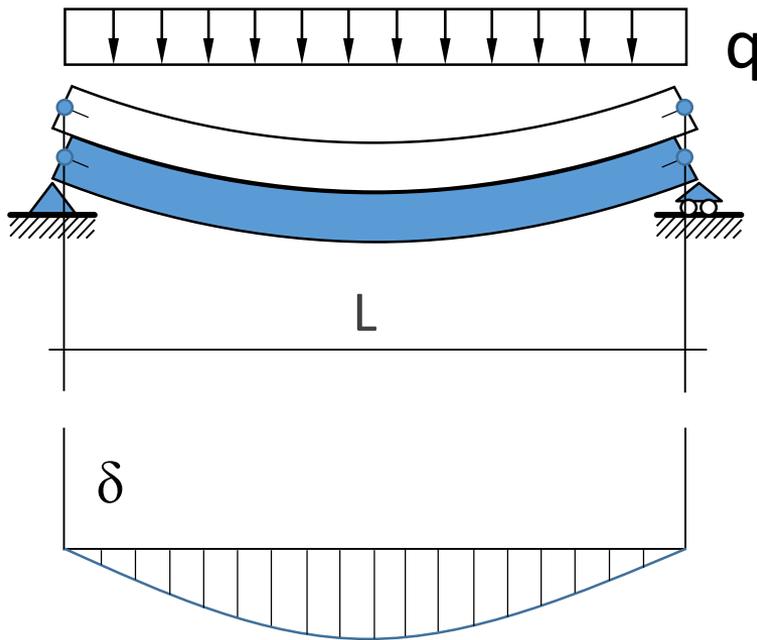


Con connessione

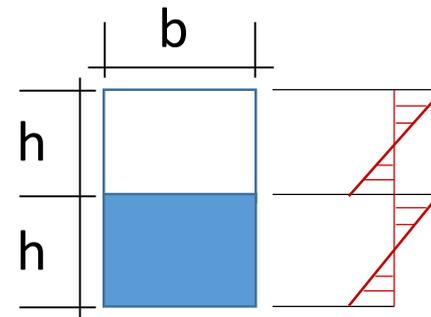


Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

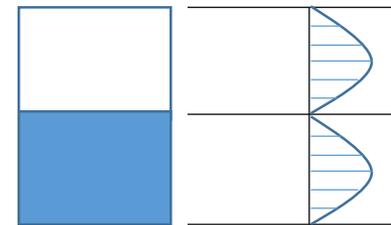
Funzionamento della trave senza connessione



$$\delta_{\max} = \frac{5}{384} \frac{(q/2)L^4}{EI} = \frac{5}{64} \frac{qL^4}{Ebh^3}$$



$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I} = \frac{qL^2}{16} \frac{12}{bh^3} \frac{h}{2} = \frac{3qL^2}{8bh^2}$$



$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{qL}{4} \frac{1}{bh} = \frac{3qL}{8bh}$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Funzionamento della trave senza connessione

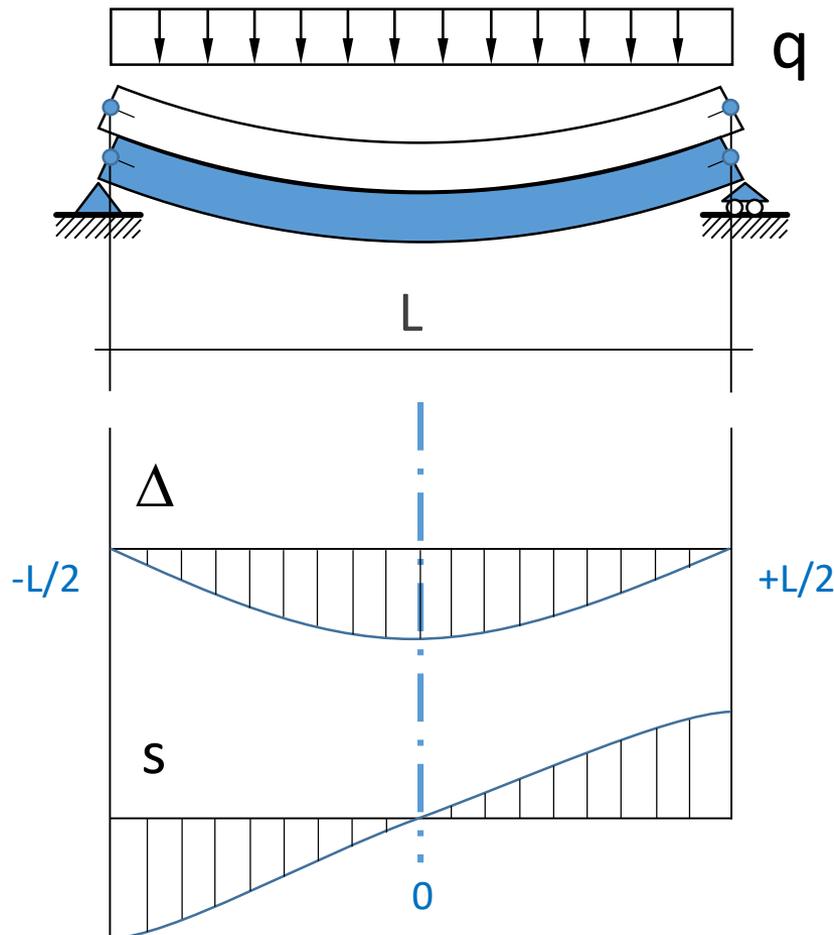


Diagramma del momento flettente

$$M = \frac{q}{16} (L^2 - 4x^2)$$

Deformazione long. max nella sezione

$$\varepsilon_{x,\max} = \frac{M y_{\max}}{EI} = \frac{3}{8} \frac{q}{Ebh^2} (L^2 - 4x^2)$$

Deformazione di scorrimento

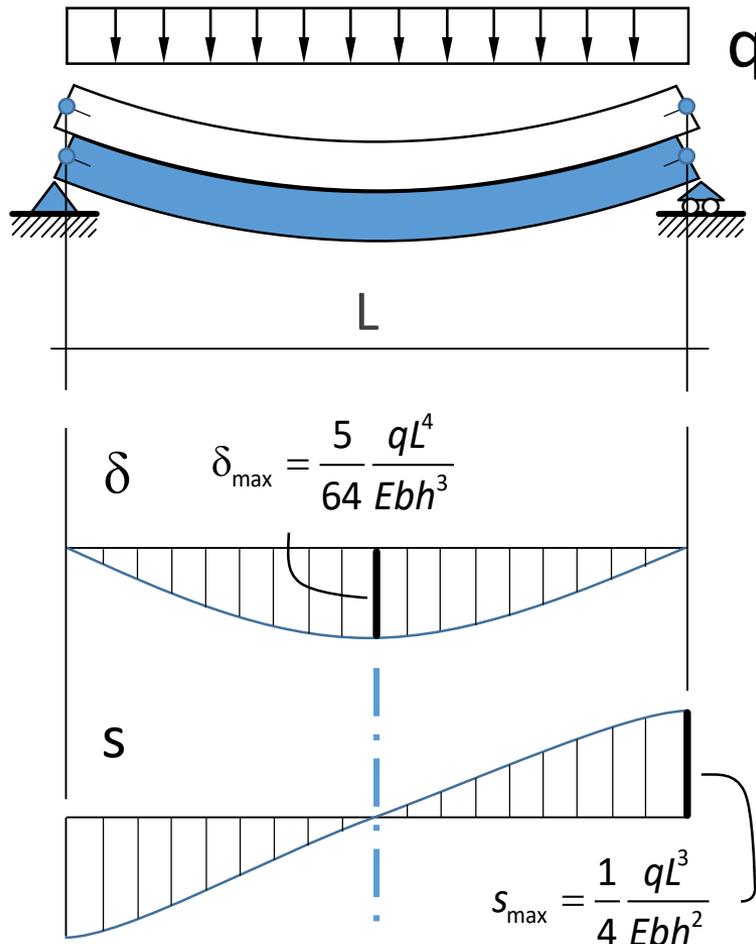
$$\Delta = 2\varepsilon_{x,\max} = \frac{3}{4} \frac{q}{Ebh^2} (L^2 - 4x^2)$$

Scorrimento

$$s = \int_0^x 2\varepsilon_{x,\max} dx = \frac{1}{4} \frac{q}{Ebh^2} (3L^2x - 4x^3)$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Funzionamento della trave senza connessione



Il rapporto tra lo scorrimento massimo e l'abbassamento massimo è

$$3.2 h/L$$

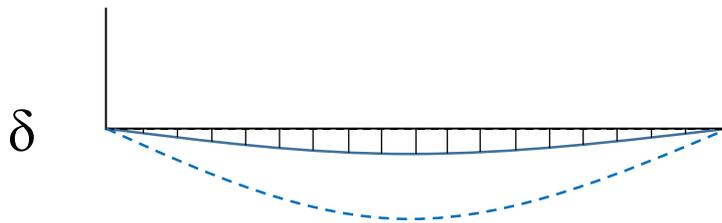
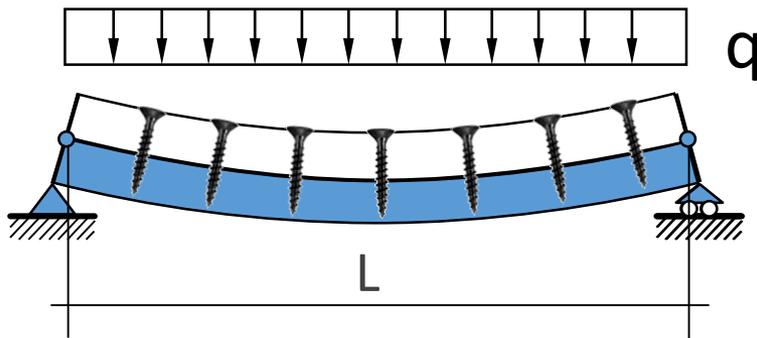
- Il rapporto $L/2h$ è circa 20 per le travi, e quindi lo scorrimento di estremità è appena minore di un decimo dell'abbassamento massimo.



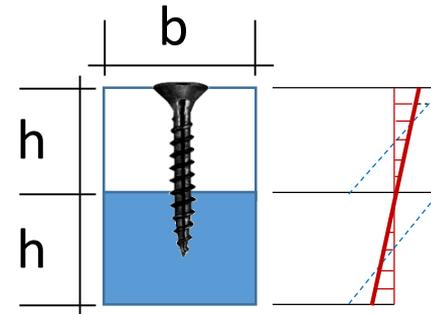
La connessione deve essere molto rigida per essere efficace

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

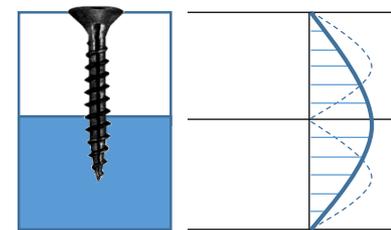
Funzionamento della trave con connessione rigida e resistente



$$\delta_{\max} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} = \frac{5}{256} \frac{qL^4}{Ebh^3}$$



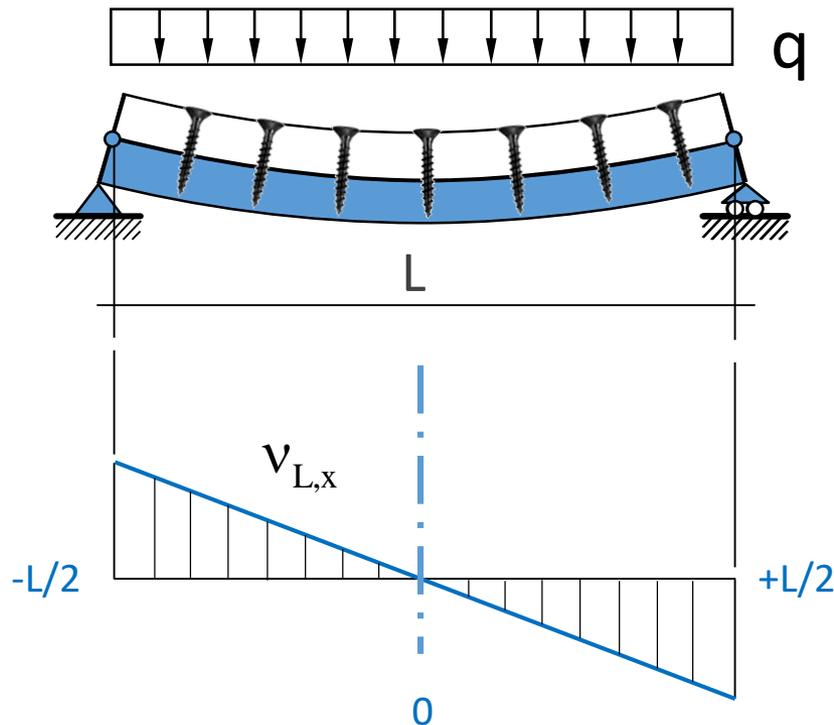
$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I} = \frac{qL^2}{8} \frac{12}{8bh^3} h = \frac{3}{16} \frac{qL^2}{bh^2}$$



$$\tau_{\max} = \frac{3qL}{8bh}$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Funzionamento della trave con connessione rigida e resistente



La connessione deve resistere ad un taglio longitudinale v_L per unità di lunghezza, detto *sforzo di scorrimento*

Nota !

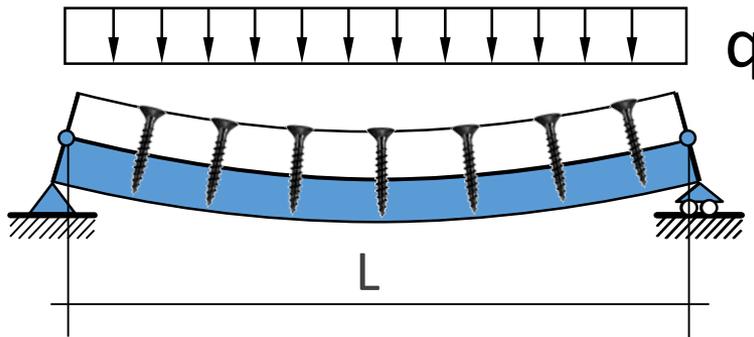
Se si ipotizza un comportamento elastico lineare,

lo sforzo di scorrimento unitario aumenta man mano che ci si sposta dalla mezzeria della trave all'appoggio ed è proporzionale all'ascissa considerata.

$$\text{In questo esempio : } v_{L,x} = \tau_{\max} b = \frac{3qx}{4h}$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Funzionamento della trave con connessione rigida e resistente



Lo sforzo di scorrimento corrispondente a metà campata è ottenuto per integrazione :

$$\int_0^{L/2} v_{L,x} dx = \frac{3qL^2}{32h}$$

Se si assume che il rapporto $L/2h=20$:

$$\int_0^{L/2} v_{L,x} dx = 3.75qL$$

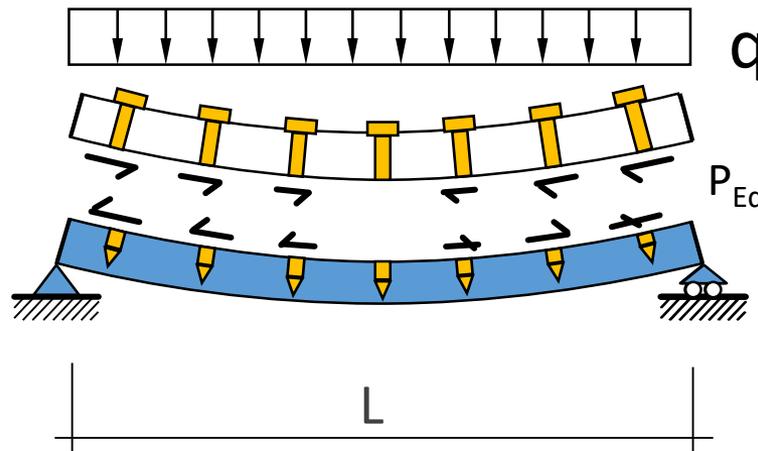
La connessione deve essere molto resistente per essere efficace



ovvero lo sforzo di scorrimento lungo metà campata è circa 4 volte il carico totale sulla trave

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Funzionamento della trave con connessione

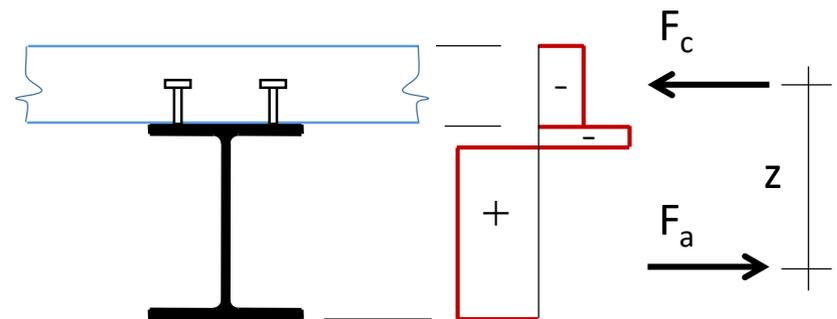


— Forza di scorrimento

Il momento resistente M_{Rd}
dipende dallo sforzo di
compressione F_c nella soletta
... e quindi dallo sforzo P_{Ed}
trasmesso dai connettori



Sezione trasversale



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Sforzi normali di trazione nei connettori

I connettori possono essere sollecitati da sforzi normali di trazione provocati da:

- Carichi applicati all'intradosso di travi composte
- Sollecitazioni torsionali
- Travi a sezione variabile

Quasi tutti i connettori utilizzati nella pratica sono conformati in modo tale da opporre resistenza allo sfilamento per azioni normali. Le forze di sfilamento sono normalmente di gran lunga inferiori a quelle di taglio e non è normalmente necessario tenerne conto in fase di progetto.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

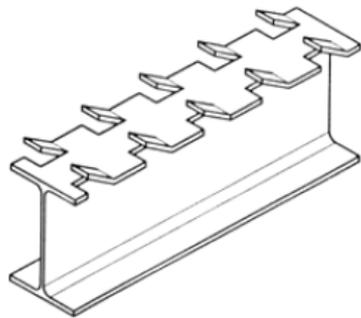
Tipi di connettori

I connettori possono essere catalogati secondo le seguenti categorie :

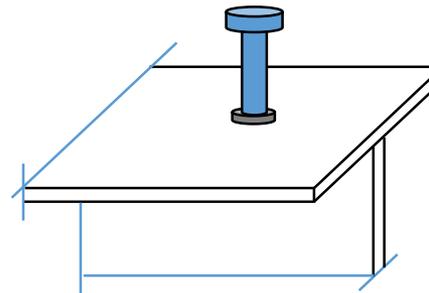
- Connessioni a taglio
- Connessioni a staffa
- Connessioni composte da connettori a taglio e a staffa
- Connessioni ad attrito

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

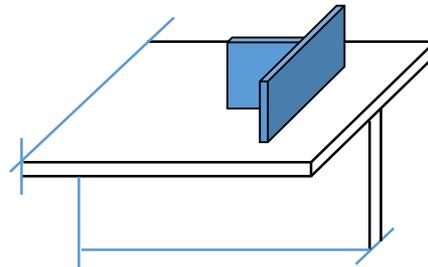
Connessioni a taglio



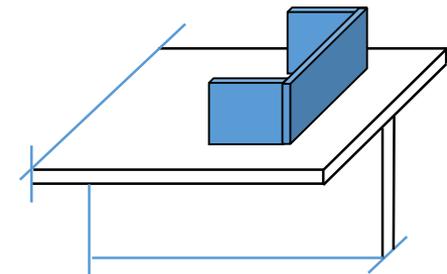
Julius Kahn, 1903



Connettore a piolo



Connettore a
pressione

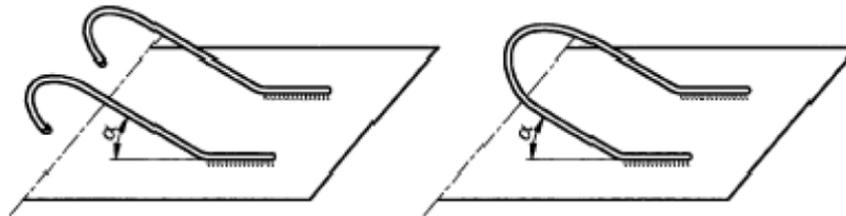


Connettore a
pressione

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Connessioni a staffa

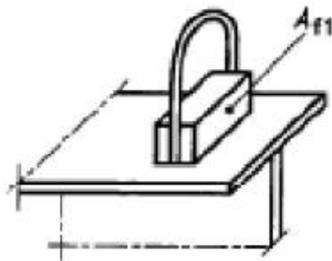
(si usano in presenza di solette piene)



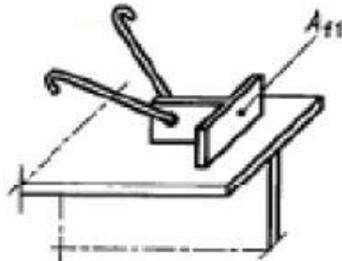
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Connessioni miste

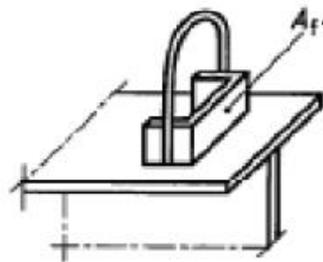
Posizione raccomandata per i connettori
in relazione alla direzione di spinta



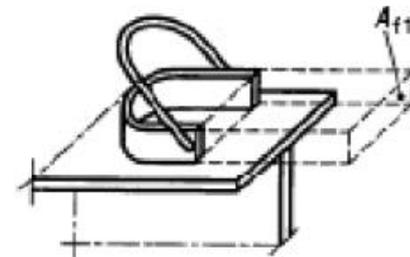
Connettore a barra



Connettore a T



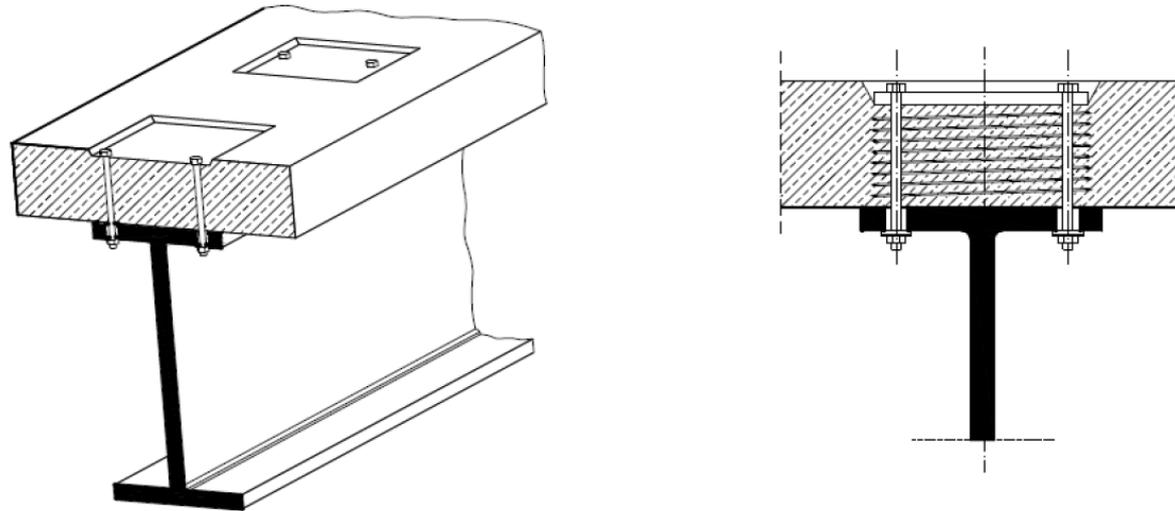
Connettore a C



Connettore a
ferro di cavallo

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

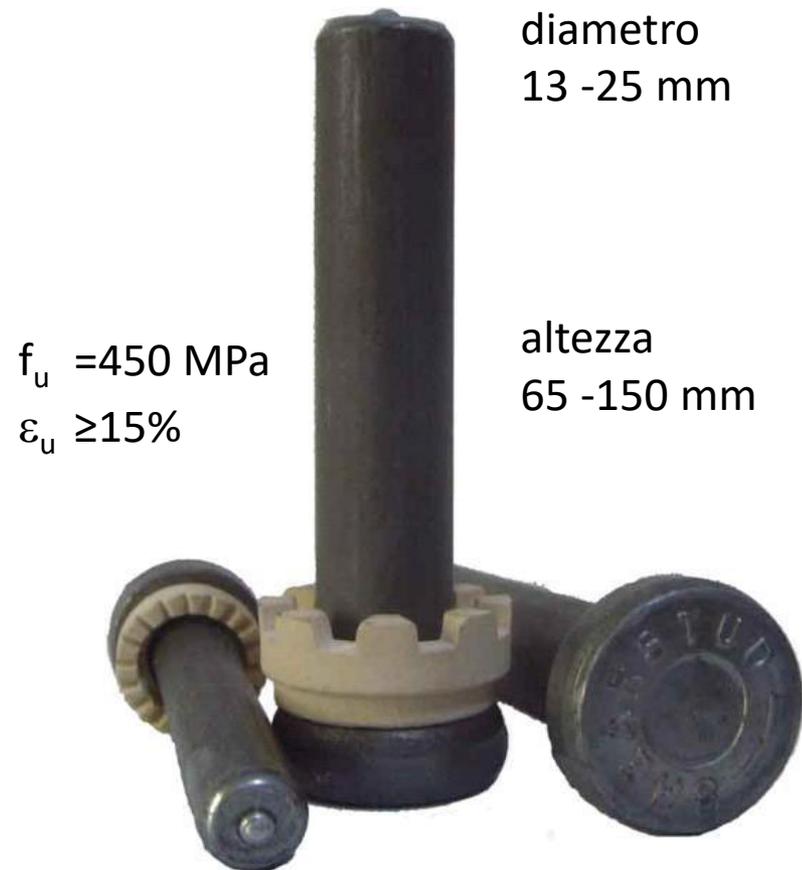
Connessioni ad attrito



Si utilizzano in genere in presenza di solette prefabbricate

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Connettore a piolo



Piolo a saldatura ultimata

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Connettore a piolo



La pistola è
posizionata
opportunamente

Il grilletto è
premuta e il
piolo è sollevato
dalla piastra.

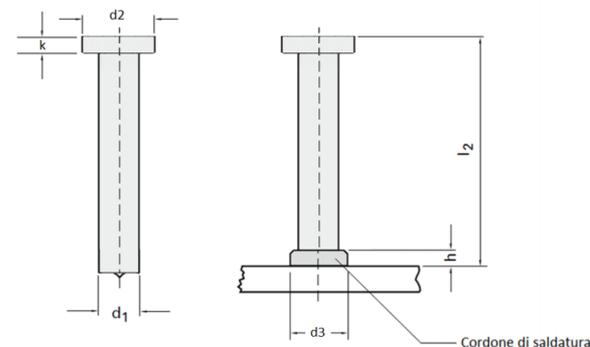
Un arco fonde il
piolo e il materiale
della piastra

Una volta che la
fusione è completa
il piolo è spinto nel
materiale di fusione

La pistola è rimossa
e il materiale ceramico
è rotto e eliminato

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Connettore a piolo



Materiale: S235 J2 + C450

∅	l2	Codice	Quantità per barile	Peso (kg/100)	d1	d2	d3	k	h	Tipo di ferula	Mandrino	Porta ferula	Piastra di base
5/8" (16)	35	15-28-02	2.000	9,2	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-98-00	NS 20: 36-06-00
5/8" (16)	50	15-25-20	1.500	11,7	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-98-00	NS 40: 36-06-15
5/8" (16)	75	15-04-77	1.200	15,6	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-29-00	
5/8" (16)	100	15-04-78	900	19,5	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-29-00	
5/8" (16)	125	15-04-79	700	24,2	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-29-00	
5/8" (16)	150	15-04-80	900	27,2	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-29-00	
5/8" (16)	175	15-28-55	500	31,1	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-29-00	
5/8" (16)	200	15-15-01	400	35,8	15,87	31,7	21,0	8,0	7,0	KSN 16	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	50	15-04-88	1.250	16,1	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	NS 20: 36-06-00
3/4" (19)	60	15-04-89	1.100	17,6	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	75	15-04-90	950	21,0	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	80	15-04-91	850	22,1	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	100	15-04-92	700	26,6	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	125	15-04-93	600	32,2	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	150	15-04-94	500	37,8	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	175	15-17-95	400	43,4	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	
3/4" (19)	200	15-37-55	350	51,8	19,05	31,7	24,0	10,0	9,0	KSN 19	25-50-00	65-29-00	

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Saldatura di pioli Nelson



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

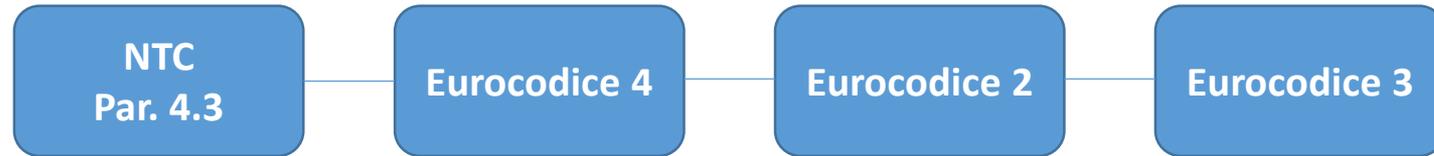
Connettore a piolo - vantaggi

- Il processo di saldatura del piolo è rapido
- I pioli ostacolano solo marginalmente il posizionamento delle armature nella soletta
- I pioli sono parimenti resistenti e rigidi in tutte le direzioni normali all'asse del piolo

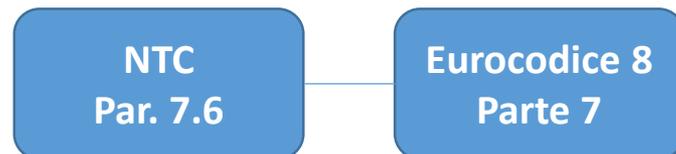
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Inquadramento normativo

Carichi verticali



Azioni sismiche



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Materiali

CALCESTRUZZO

Calcestruzzo ordinario

Classe di resistenza C20/25 ÷ C60/75

Calcestruzzo alleggerito

Classe di resistenza LC20/22 ÷ LC55/60

Densità $\geq 18 \text{ kN/m}^3$

ACCIAIO

Acciaio da cemento armato

Tipo B450A o B450C

Acciaio strutturale

Come da prescrizioni
per costruzioni in acciaio

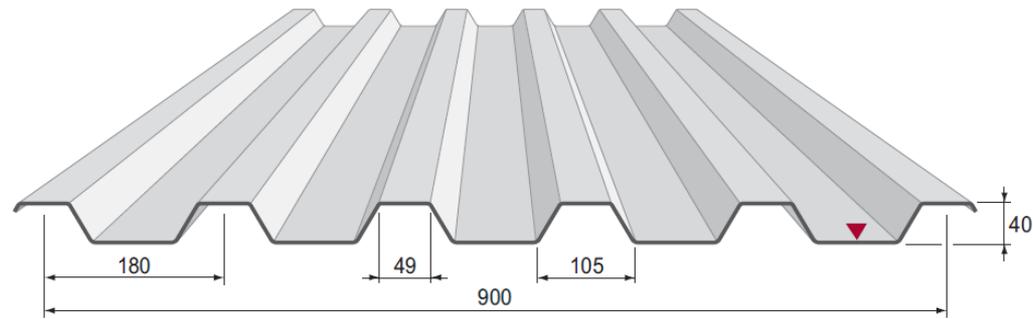
Membrature composte acciaio-clc

Solette

Le solette composte in acciaio e calcestruzzo sono realizzate mediante lamiera grecata

Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata



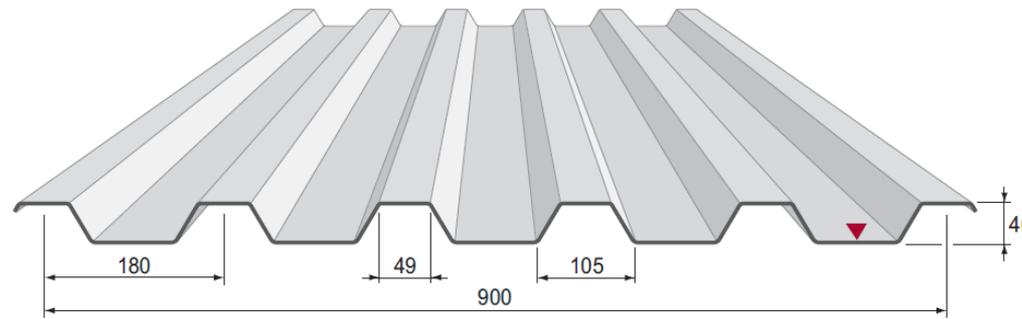
Esempio di lamiera grecata

Compiti della lamiera grecata

- Realizzazione della cassaforma
- Realizzazione dell'armatura inferiore della soletta

Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata



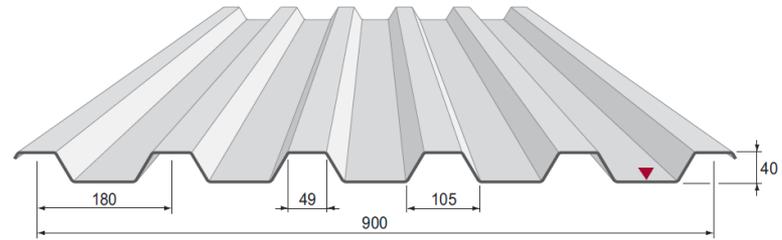
Esempio di lamiera grecata

Resistenza allo snervamento dell'acciaio	—————>	235 – 460 MPa
Profondità della lamiera	—————>	40 – 200 mm
Spessore della lamiera	—————>	0.8 – 1.5 mm
Larghezza della lamiera	—————>	circa 1.0 m
Lunghezza della lamiera	—————>	fino a 6.0 m

Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata

Al fine di essere rigida e resistente, la lamiera grecata è sempre dotata di costole di irrigidimento.



Ciò nonostante, essa è quasi sempre di classe 4.

... ovvero, l'instabilità locale riduce il momento di inerzia efficace della lamiera al di sotto del valore calcolato per la sezione lorda e il momento resistente della sezione non è quello corrispondente al comportamento plastico.

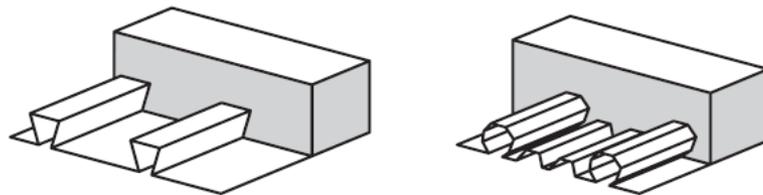
Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata

La trasmissione delle forze di scorrimento all'interfaccia tra lamiera e calcestruzzo non può essere affidata alla sola aderenza.

Si adottano provvedimenti volti a realizzare :

Ingranamento per attrito



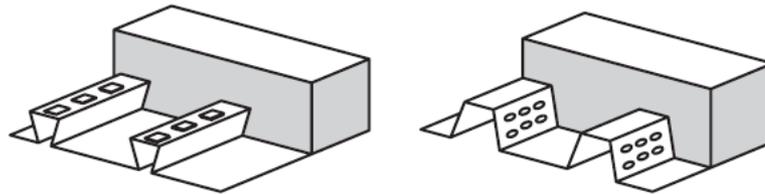
Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata

La trasmissione delle forze di scorrimento all'interfaccia tra lamiera e calcestruzzo non può essere affidata alla sola aderenza.

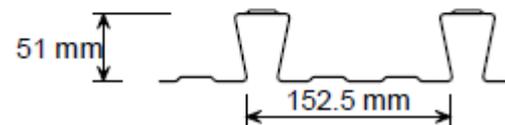
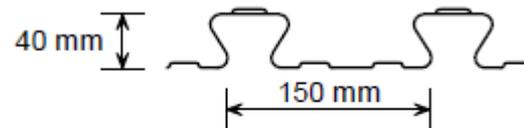
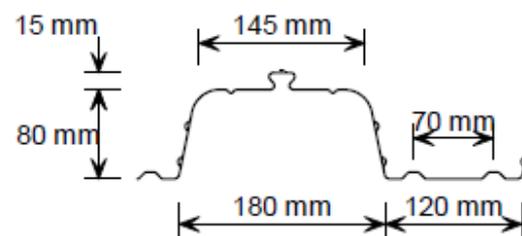
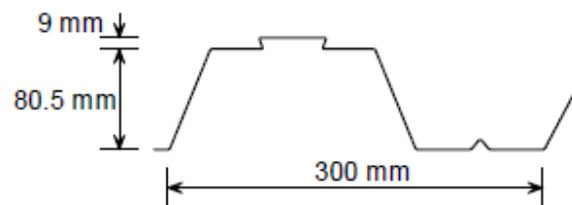
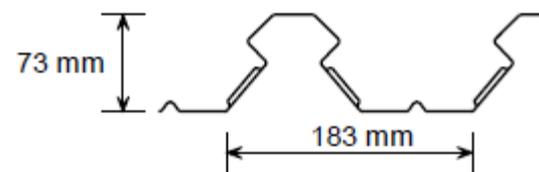
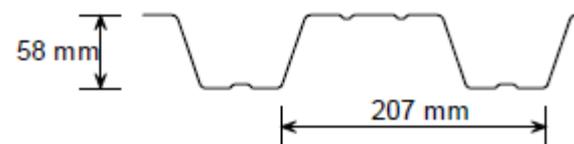
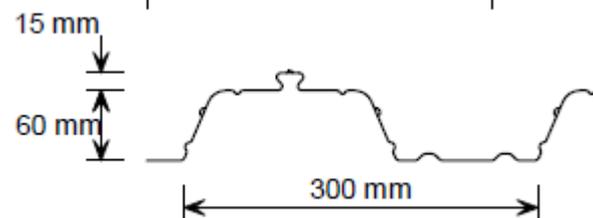
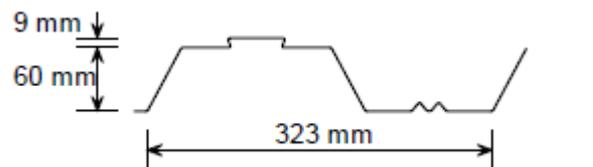
Si adottano provvedimenti volti a realizzare :

Ingranamento meccanico



Solette composte acciaio-calcestruzzo

Esempi di lamiera grecata



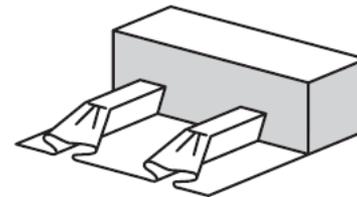
Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata

La trasmissione delle forze di scorrimento all'interfaccia tra lamiera e calcestruzzo non può essere affidata alla sola aderenza.

Si adottano provvedimenti volti a realizzare :

Ancoraggio di estremità



Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata

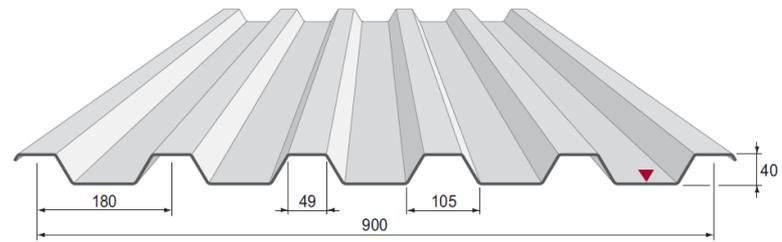
Tali provvedimenti non sono, tuttavia, pienamente efficaci nel resistere alle tensioni longitudinali.

Per questa ragione, i produttori di lamiere grecate eseguono prove su solette con lamiera grecata e forniscono tabelle con valori testati dei massimi momenti flettenti sopportabili dalle lamiere.

Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata in fase di getto

La verifica della lamiera grecata nella fase di getto deve essere eseguita in accordo alla norma UNI EN 1993-1-3 in materia di profilati sottili di acciaio formati a freddo.



Esempio di lamiera grecata

Nota !

La lamiera grecata deve sopportare non solo il calcestruzzo umido ma anche altri carichi che sono applicati durante la costruzione. Questi carichi possono includere ammassi di calcestruzzo e carichi da tubi di pompaggio.

Per i carichi di costruzione, la norma EN 1991-1-6 raccomanda un carico distribuito di circa 0.75-1.50 kN/m².

Solette composte acciaio-calcestruzzo

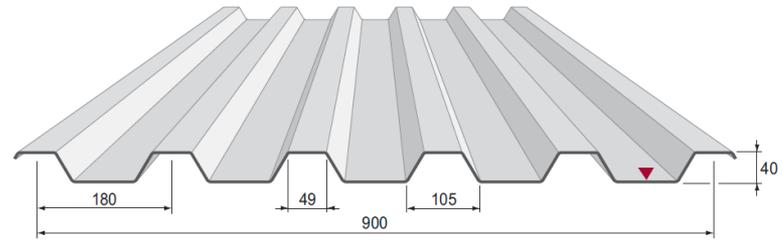
Lamiera grecata in fase di getto

L'inflessione δ della lamiera sotto il proprio peso ed il peso del calcestruzzo fresco, escludendo i carichi di costruzione, deve rispettare la condizione :

$$\delta \leq \min (L/180 ; 20 \text{ mm})$$

dove :

L la luce effettiva della campata fra due appoggi definitivi o provvisori



Esempio di lamiera grecata

Solette composte acciaio-calcestruzzo

Lamiera grecata a maturazione della soletta

Verifiche di resistenza allo stato limite ultimo :

- Resistenza a flessione
- Resistenza allo scorrimento
- Resistenza a punzonamento e a taglio

Verifiche allo stato limite di esercizio :

- Verifica a fessurazione
- Verifica di deformabilità

Solette composte acciaio-calcestruzzo

Spessori minimi di soletta con lamiera grecata

Spessore totale della soletta

$$h \geq 80 \text{ mm}$$

Spessore del calcestruzzo al di sopra delle nervature

$$h_c \geq 40 \text{ mm}$$

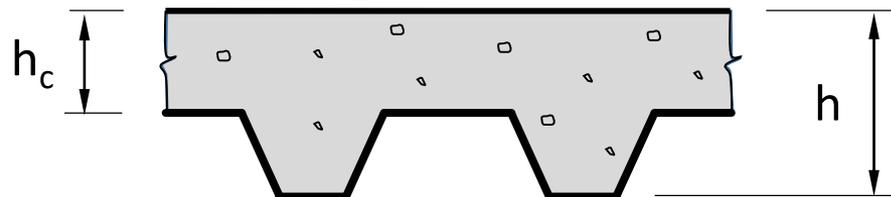
Lo spessore h_c è normalmente 60 mm o maggiore per garantire un sufficiente isolamento acustico e per fornire un'adeguata resistenza al fuoco e ai carichi concentrati

Se la soletta

realizza con la trave una membratura composta, oppure è utilizzata come diaframma orizzontale,

$$h \geq 90 \text{ mm}$$

$$h_c \geq 50 \text{ mm}$$



Solette composte acciaio-calcestruzzo

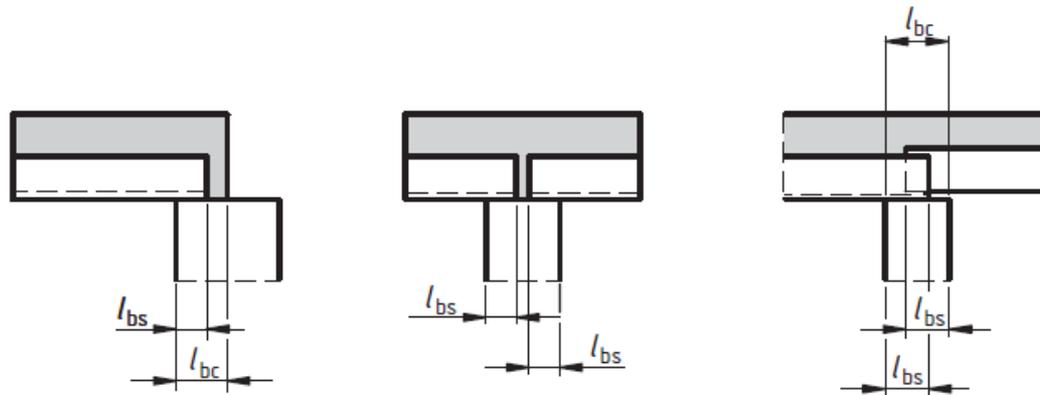
Spessori minimi di soletta con lamiera grecata

Le solette composte sostenute da elementi di acciaio o calcestruzzo devono avere :

- larghezza di appoggio $l_{bc} \geq 75$ mm
- larghezza di appoggio del bordo della lamiera $l_{bs} \geq 50$ mm

nel caso di lamiere sovrapposte o continue deve essere :

- larghezza di appoggio del bordo della lamiera $l_{bs} \geq 75$ mm



Solette composte acciaio-calcestruzzo

Tecnologia per solette

Lamiera grecata



Solette composte acciaio-calcestruzzo

Tecnologia per solette

Lastre prefabbricate tralicciate



CLASSIFICAZIONE DI SEZIONI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione

Una sezione composta dovrebbe essere classificata in funzione della classe meno favorevole tra quelle dei suoi elementi costituenti in acciaio in compressione.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione

Le sezioni sono divise in 4 classi,
in base all'effetto dell'instabilità locale sul loro comportamento

- **classe 1** – massima resistenza, massima duttilità
- **classe 2** – massima resistenza, limitata duttilità
- **classe 3** – resistenza limitata al raggiungimento della prima plasticizzazione
- **classe 4** – instabilità precoce che avviene prima dello snervamento

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione

La distribuzione delle tensioni deve essere :

- † plastica quando utile per verificare l'appartenenza alle classi 1 e 2
- † elastica quando utile per verificare l'appartenenza alle classi 3 e 4

La classificazione deve essere effettuata :

- † considerando i valori di progetto delle resistenze dei materiali (per classi 1 e 2)
- † considerando nulla la resistenza a trazione del calcestruzzo
- † considerando l'intera anima e il tratto efficace delle flange

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione

La classe di una sezione composta dipende anche dalla sequenza di costruzione e dagli effetti del ritiro e della viscosità.

Pertanto, la classificazione va effettuata per :

- † **progetto a breve termine**
- † **progetto a lungo termine**

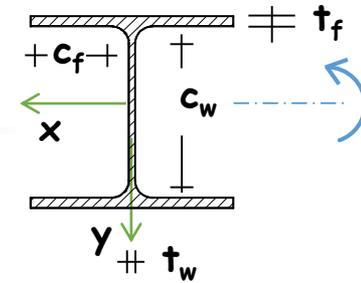
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione

- † **A breve termine**
(prima della maturazione del calcestruzzo della soletta),
la sezione resistente del ponte è costituita dalla sola parte in acciaio
e la classificazione va effettuata con riferimento a tale parte
- † **A lungo termine**
(a maturazione avvenuta del calcestruzzo della soletta),
la sezione resistente del ponte è costituita dalla sezione composta
acciaio-calcestruzzo e quindi
la classificazione va effettuata con riferimento alla sezione composta

Parti interne compresse

Classificazione sezioni in acciaio



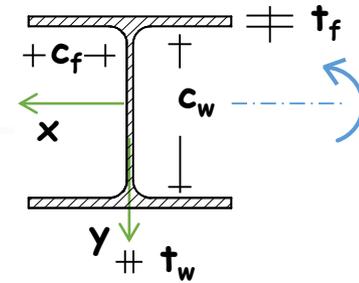
Classe	Parte soggetta a flessione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a compressione e flessione			
Distribuzione delle tensioni (compress. +)						
1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 33 \varepsilon$	$\alpha > 0.5 \quad c/t \leq 396\varepsilon/(13\alpha - 1)$ $\alpha \leq 0.5 \quad c/t \leq 36\varepsilon/\alpha$			
2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$	$\alpha > 0.5 \quad c/t \leq 456\varepsilon/(13\alpha - 1)$ $\alpha \leq 0.5 \quad c/t \leq 41.5\varepsilon/\alpha$			
Distribuzione delle tensioni (compress. +)						
3	$c/t \leq 124 \varepsilon$	$c/t \leq 42 \varepsilon$	$\psi > -1 \quad c/t \leq 42\varepsilon/(0.67 + 0.33\psi)$ $\psi \leq -1 \quad c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71

* $\psi \leq -1$ si applica se la tensione $\sigma \leq f_{yk}$ o la deformazione a trazione $\varepsilon_y > f_{yk}/E$

NTC18, tab. 4.2.I

Parti esterne compresse

Classificazione sezioni in acciaio



Classe	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a compressione e flessione				
		Fine in compressione		Fine in trazione		
Distribuzione delle tensioni (compress. +)						
1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq 9 \varepsilon/\alpha$		$c/t \leq 9\varepsilon/\alpha\sqrt{\alpha}$		
2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq 10 \varepsilon/\alpha$		$c/t \leq 9\varepsilon/\alpha\sqrt{\alpha}$		
Distribuzione delle tensioni (compress. +)						
3	$c/t \leq 14 \varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_e}$				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione

Attenzione

Nelle sezioni miste acciaio-calcestruzzo

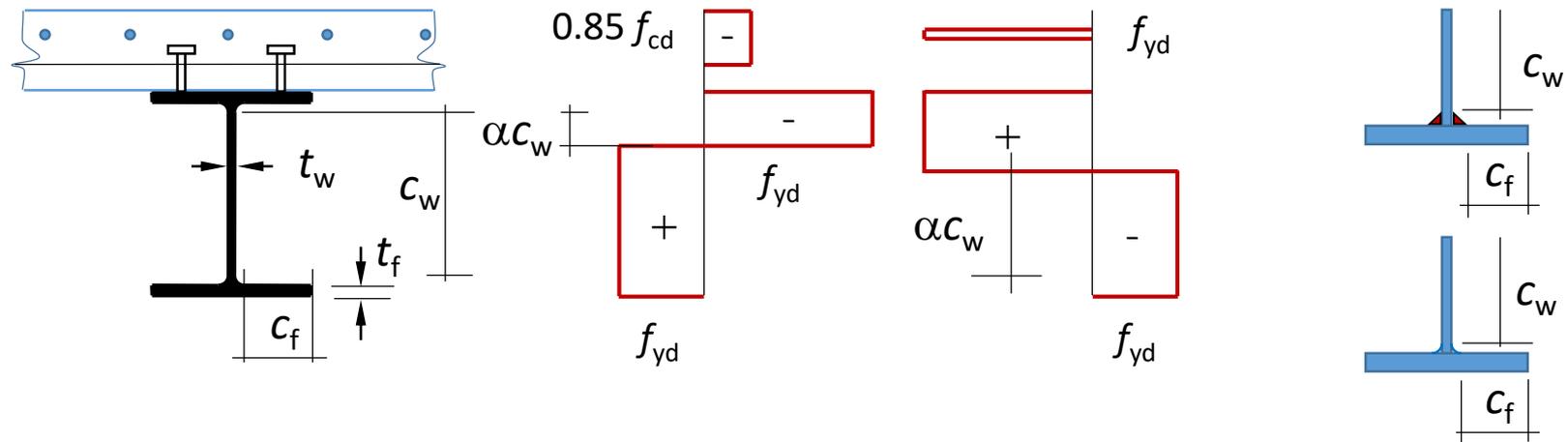
il valore di progetto

della resistenza a compressione del calcestruzzo vale

$$0.85 f_{cd}$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione



Classe 1

$$\text{anima} \begin{cases} \frac{c_w}{t_w} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha} & \text{per } \alpha \leq 0.5 \\ \frac{c_w}{t_w} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} & \text{per } \alpha > 0.5 \end{cases}$$

$$\text{flangia} \quad c_f/t_f \leq 9\varepsilon$$

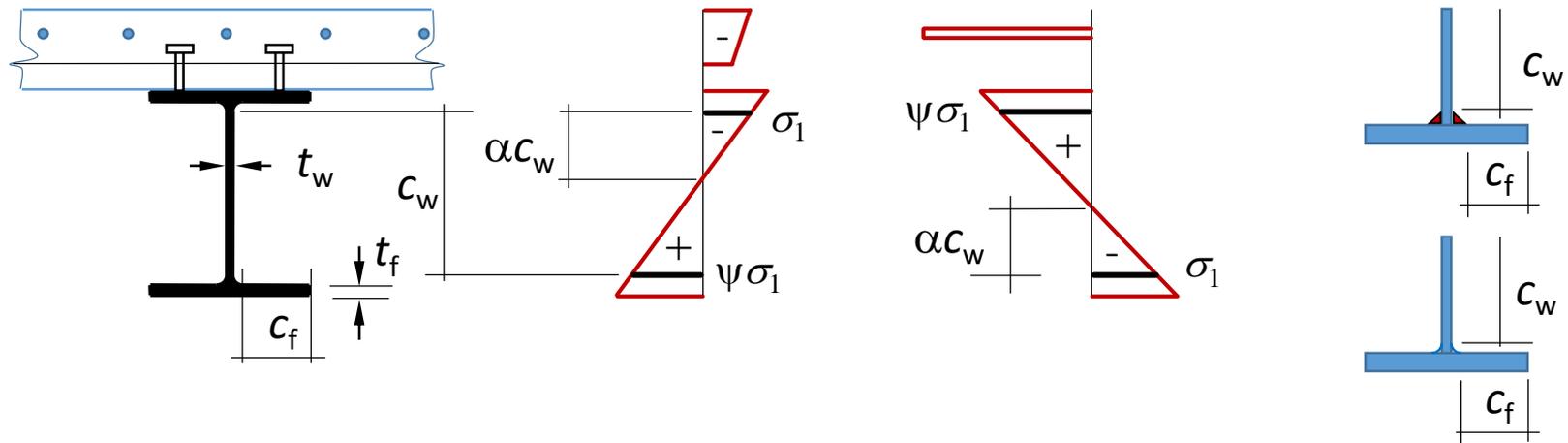
Classe 2

$$\text{anima} \begin{cases} \frac{c_w}{t_w} \leq \frac{41.5\varepsilon}{\alpha} & \text{per } \alpha \leq 0.5 \\ \frac{c_w}{t_w} \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1} & \text{per } \alpha > 0.5 \end{cases}$$

$$\text{flangia} \quad c_f/t_f \leq 10\varepsilon$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione



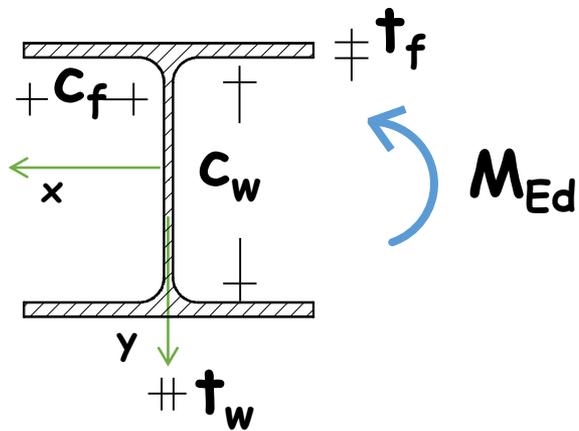
Classe 3

$$\text{anima} \left\{ \begin{array}{l} \frac{c_w}{t_w} \leq \frac{42\varepsilon}{0.67 + 0.33\psi} \quad \text{per } \psi > -1.0 \\ \frac{c_w}{t_w} \leq 0.62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi} \quad \text{per } \psi \leq -1.0 \end{array} \right.$$

$$\text{flangia} \quad c_f/t_f \leq 14\varepsilon$$

Sezioni in acciaio

Eccezioni alle regole classiche di classificazione



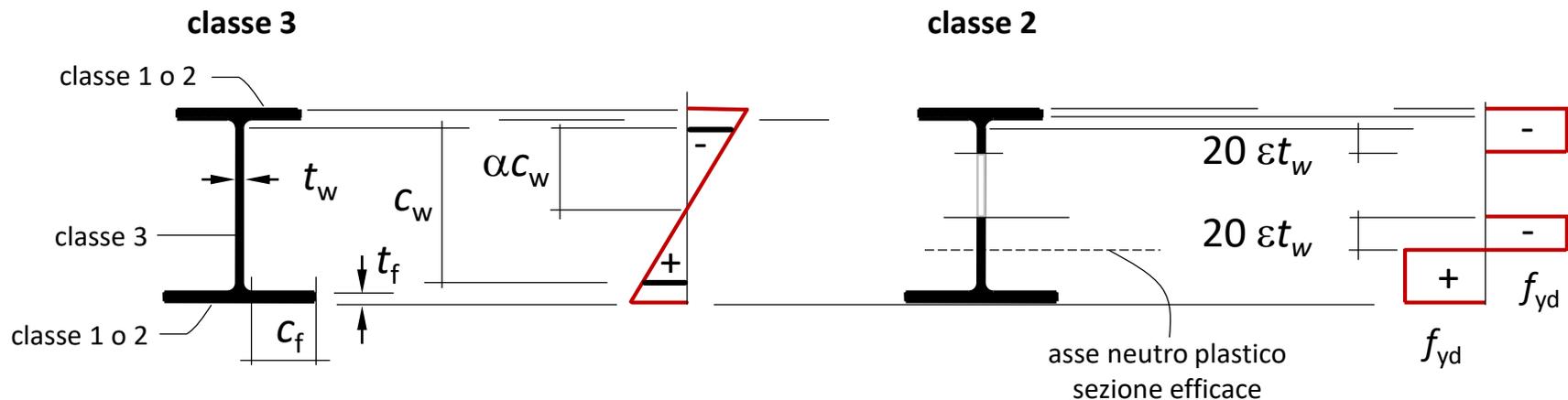
ECCEZIONE 1

La sezione di classe 4 può essere classificata come di classe 3

se le verifiche all'instabilità locale sono eseguite con il *metodo delle tensioni ridotte*

Sezioni in acciaio

Eccezioni alle regole classiche di classificazione



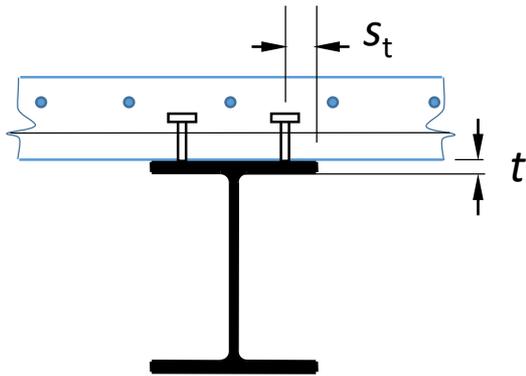
ECCEZIONE 2

La sezione con flange di classe 1 o 2 e anime di classe 3 può essere classificata come di classe 2 se le verifiche sono eseguite con riferimento alla sola parte efficace dell'anima,

La parte efficace dell'anima in compressione è distante non più di $20\epsilon t_w$ dall'asse neutro plastico della sezione efficace e non più di $20\epsilon t_w$ dal raccordo della flangia in compressione

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Eccezioni alle regole classiche di classificazione



ECCEZIONE 3

Una flangia in compressione, vincolata all'instabilità dal collegamento all'impalcato mediante connettori, può essere assunta di classe 1 se sono soddisfatte le condizioni:

† $s_t \leq 9 \varepsilon t$

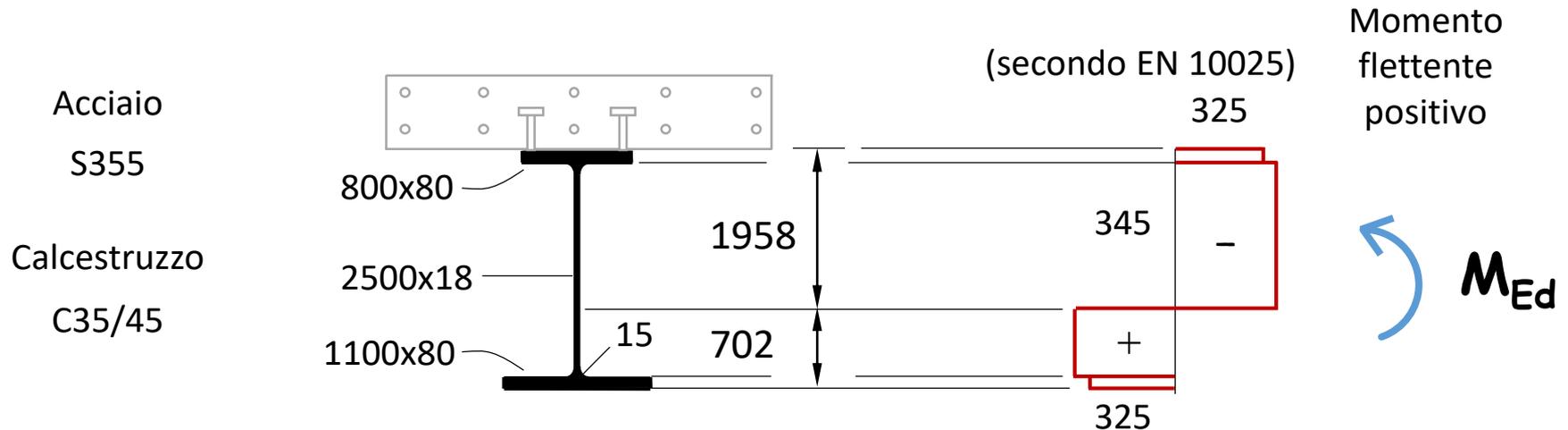
† La spaziatura longitudinale dei connettori è non maggiore di :

- $22 \varepsilon t$ per impalcati che sono in contatto con la flangia in acciaio per tutta la sua lunghezza
- $15 \varepsilon t$ per impalcati che non sono in contatto con la flangia in acciaio per tutta la sua lunghezza (impalcati con lamiera grecata)

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta

Situazione di progetto transitoria



Flangia superiore

$$c_f/t_f = 376/80 = 4.7 < 9 \cdot 0.85 = 7.65$$

$$(c_f/t_f \leq 9\varepsilon)$$

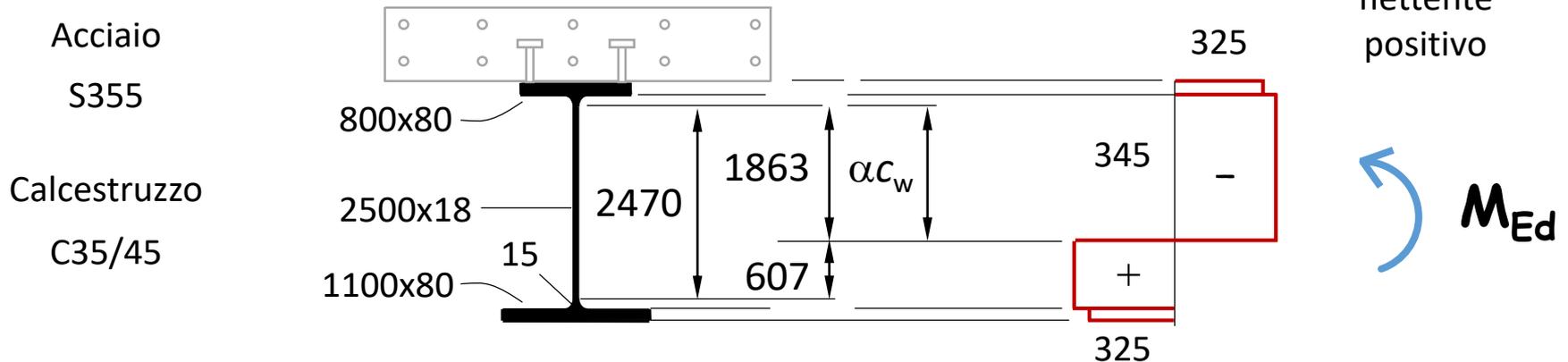
$$(\varepsilon = \sqrt{235/325} = 0.85)$$

La flangia superiore è di classe 1

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta

Situazione di progetto transitoria



Anima

$$\alpha = 1863/2470 = 0.75 > 0.50$$

$$c_w/t_w = 2470/18 = 137.22 > \frac{456 \cdot 0.825}{13 \cdot 0.75 - 1} = 42.99$$

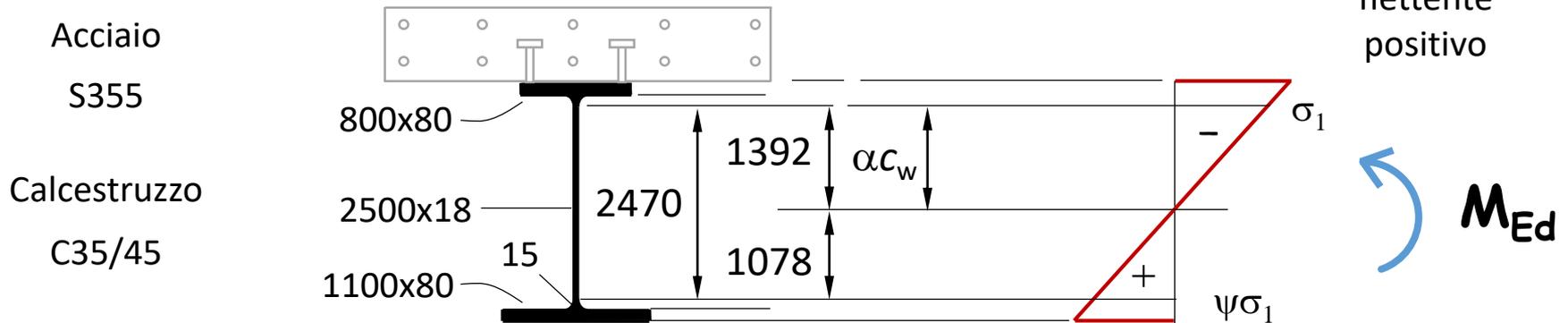
$$\left(\frac{c_w}{t_w} \leq \frac{456 \varepsilon}{13 \alpha - 1} \right) (\varepsilon = \sqrt{235/345} = 0.825)$$

L'anima
non è di classe né 1 né 2

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta

Situazione di progetto transitoria



Anima

$$\psi = -1078/1392 = -0.77 > -1$$

$$c_w/t_w = 2470/18 = 137.22 > \frac{42 \cdot 0.825}{0.67 + 0.33 \cdot (-0.77)} = 83.31 \quad \left(\frac{c_w}{t_w} \leq \frac{42 \varepsilon}{0.67 + 0.33 \psi} \right)$$

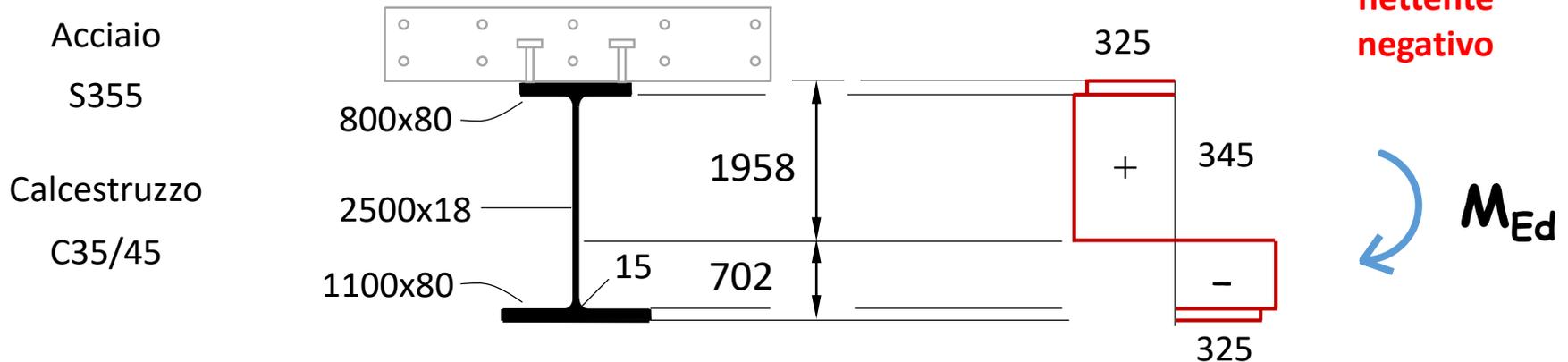
L'anima non è di classe 3 e pertanto è di classe 4

La sezione è di classe 4

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta

Situazione di progetto transitoria



Flangia inferiore

$$c_f/t_f = 526/80 = 6.58 < 9 \cdot 0.85 = 7.65$$

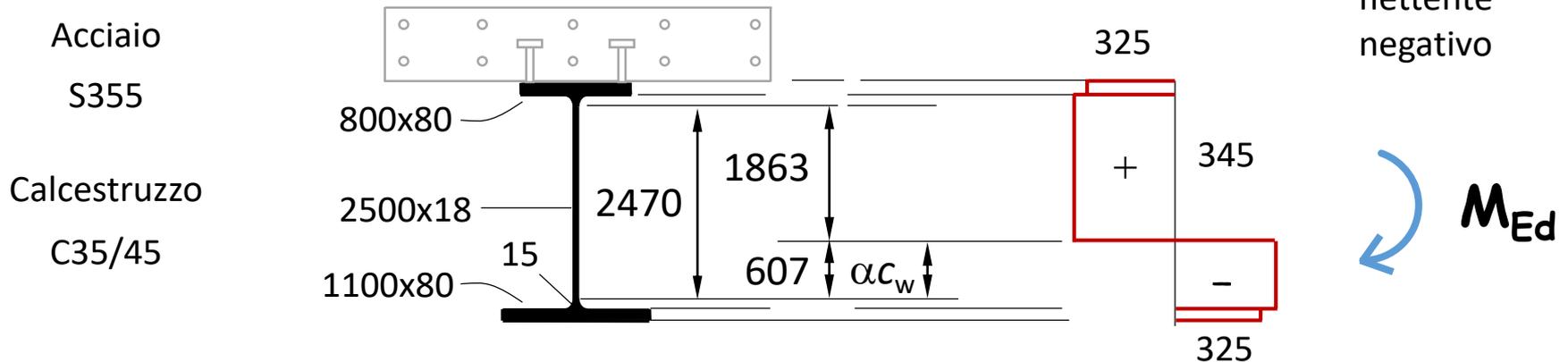
$$(\varepsilon = \sqrt{235/325} = 0.85)$$

La flangia inferiore è di classe 1

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta

Situazione di progetto transitoria



Anima

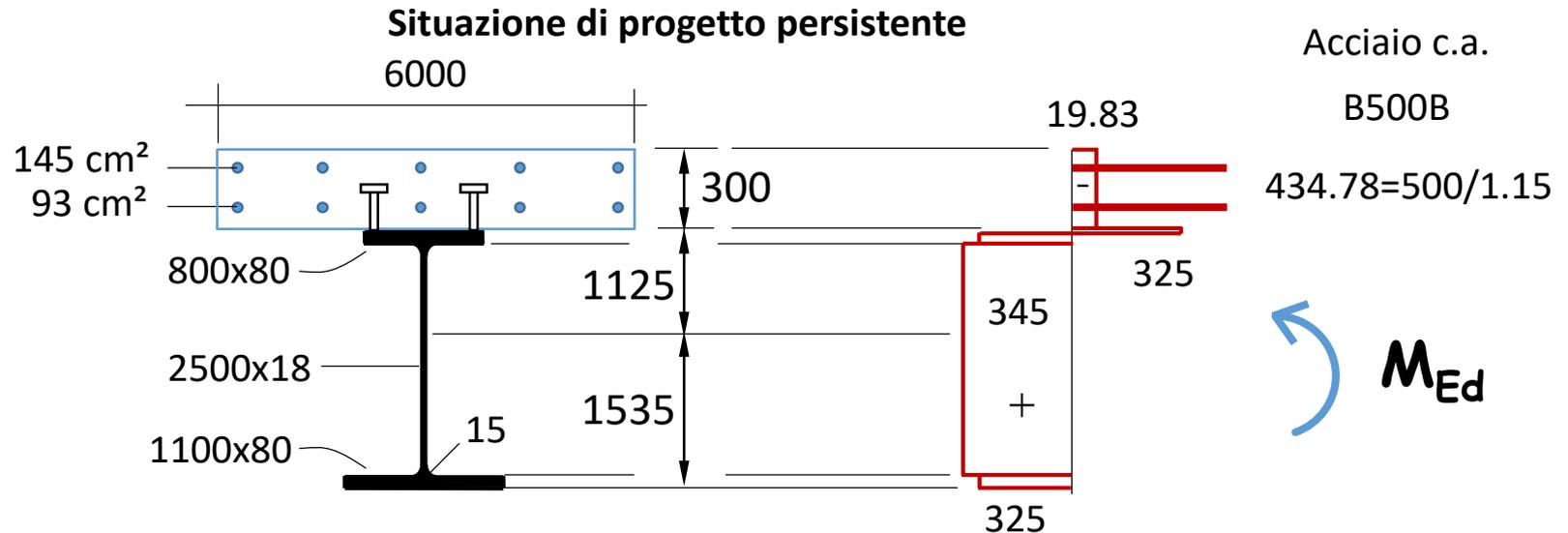
$$\alpha = 607/2470 = 0.245 < 0.50$$

$$c_w/t_w = 2470/18 = 137.22 > 36 \cdot 0.825/0.245 = 121.22 \quad \text{L'anima non è di classe 1}$$

$$c_w/t_w = 2470/18 = 137.22 < 41.5 \cdot 0.825/0.245 = 139.74 \quad \text{L'anima e la sezione sono di classe 2}$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta



La flangia superiore è protetta dall'instabilità locale per mezzo della connessione e pertanto è di classe 1.

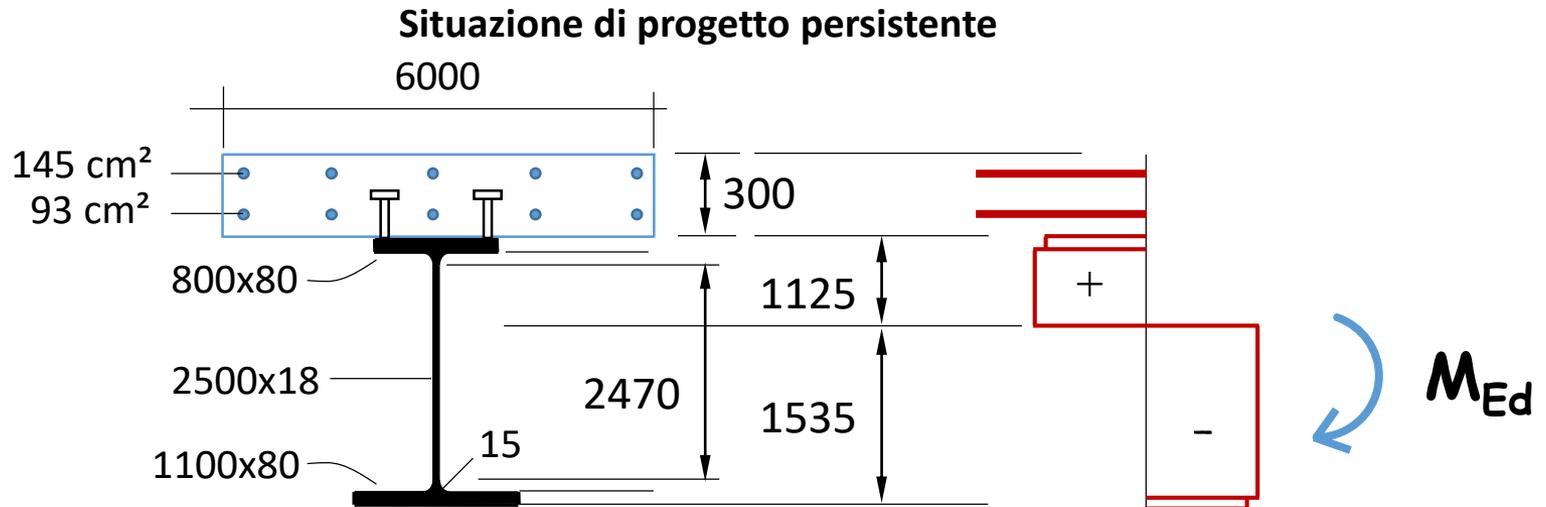
L'anima è tutta tesa.

Attenzione ai coeff. parziali di sicurezza dei materiali della normativa italiana

La sezione è di classe 1

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta



Anima

$$\alpha = 1440/2470 = 0.58 > 0.50$$

$$c_w/t_w = 2470/18 = 137.22 > \frac{456 \cdot 0.825}{13 \cdot 0.58 - 1} = 57.72$$

L'anima non è di classe 2

$$\left(\frac{c_w}{t_w} \leq \frac{456 \varepsilon}{13 \alpha - 1} \right) (\varepsilon = \sqrt{235/345} = 0.825)$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Esempio di classificazione di sezione composta



Anima

$$\psi = -1223/1247 = -0.98 > -1$$

$$c_w/t_w = 2470/18 = 137.22 > \frac{42 \cdot 0.825}{0.67 + 0.33 \cdot (-0.98)} = 99.97 \quad \left(\frac{c_w}{t_w} \leq \frac{42 \varepsilon}{0.67 + 0.33 \psi} \right)$$

L'anima non è di classe 3
e pertanto è di classe 4

La sezione è di classe 4

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Classificazione e metodo di verifica

Sezione	Flangia sup	Flangia inf	Anima	Metodo di verifica	Sezione
Sezione aperta	1 o 2	1 o 2	1 o 2	-	1 o 2
	1 o 2	1 o 2	3	-	2 con anima efficace
	1 o 2	1 o 2	3	-	3
	1 o 2	1 o 2	4	tensioni ridotte	trattata come classe 3
	1 o 2	1 o 2	4	larghezza efficace	4
Sezione scatolare	1 o 2	3	3	-	3
	1 o 2	4	3 o 4	tensioni ridotte	trattata come classe 3
	1 o 2	4	3 o 4	larghezza efficace	4

ANALISI STRUTTURALI

Analisi strutturali

Analisi globali e sezionali

Si possono eseguire i seguenti tipi di analisi :

┆ **Analisi globali**

Sono eseguite per determinare le sollecitazioni di calcolo sulle membrature

┆ **Analisi sezionali**

Sono eseguite per determinare le tensioni sulle sezioni e le caratteristiche resistenti delle sezioni

Membrature composte acciaio-clc

Analisi globali

Si possono eseguire i seguenti tipi di analisi globali :

- ┆ Analisi lineare
- ┆ Analisi plastica
- ┆ Analisi non lineare

Membrature composte acciaio-clc

Analisi globale plastica

L'analisi globale plastica può essere utilizzata per eseguire le verifiche allo SLU quando :

- tutti gli elementi sono in acciaio o composti acciaio-calcestruzzo
- quando i materiali soddisfano i requisiti indicati nella norma (§ 4.3.3.1)
- quando le sezioni sono di classe 1
- quando i collegamenti trave-colonna sono a completo ripristino di resistenza plastica e sono dotati di adeguata capacità di rotazione o sovrarresistenza

Inoltre, nelle zone in cui è supposto lo sviluppo delle deformazioni plastiche (cerniere plastiche), è necessario :

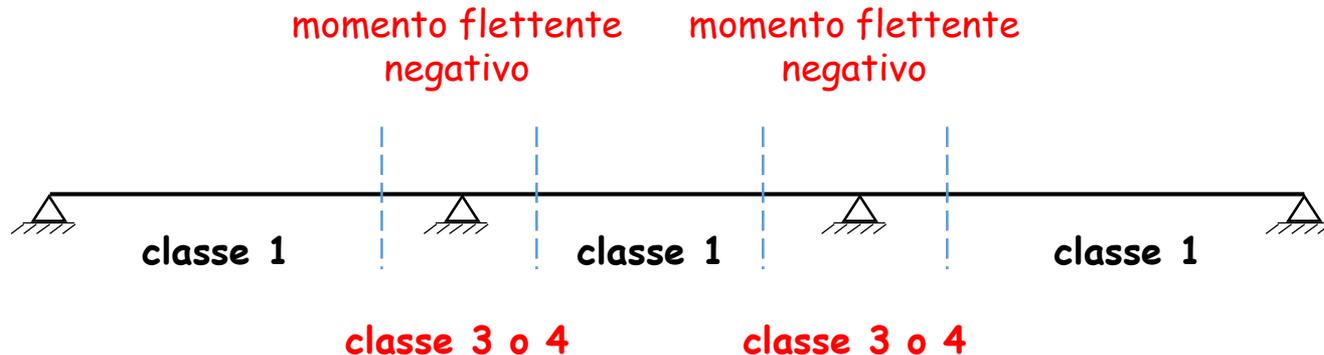
- che i profili in acciaio siano simmetrici rispetto al piano dell'anima
- che la piattabanda compressa sia opportunamente vincolata
- che la capacità rotazionale della cerniera plastica sia sufficiente

Membrature composte acciaio-clc

Analisi globale per ponti

Attenzione: nel caso di ponti a struttura mista calcestruzzo-acciaio, la classe delle sezioni è generalmente diversa lungo l'asse del ponte.

In particolare, la classe è 1 in campata o in prossimità degli appoggi di estremità, ma 3 o 4 in prossimità degli appoggi interni.



Ciò impone l'uso dell'analisi globale elastica o nonlineare

Membrature composte acciaio-clt

Analisi globale elastica

L'analisi globale elastica

dovrebbe essere utilizzata per la verifica di :

- stato limite di esercizio
- stato limite di fatica

ma può essere utilizzata anche per la verifica di :

- stati limiti ultimi

Membrature composte acciaio-clc

Analisi globale elastica

Il momento sollecitante non dovrebbe eccedere $0.9 M_{pl,Rd}$ in nessuna sezione di Classe 1 o 2 soggetta a momento flettente positivo con soletta in compressione, se entrambe le condizioni sono verificate :

- la sezione soggetta a momento flettente negativo agli appoggi o vicino agli appoggi adiacenti è in classe 3 o 4;
- il rapporto tra le lunghezze delle campate adiacenti al supporto (minore/maggiore) è minore di 0.6.

In alternativa, si dovrebbe considerare un'analisi globale che tenga conto del comportamento inelastico.

Membrature composte acciaio-clc

Analisi globale elastica

Nell'analisi globale elastica
si devono considerare i seguenti fenomeni :

- fessurazione
- ritiro
- viscosità
- shear lag
- stabilità locale
- campi di temperatura
- fasi costruttive

Analisi globale elastica

Effetto della fessurazione

L'effetto della fessurazione sulla risposta strutturale può essere valutato mediante due metodi :

- † **Metodo 1** (senza restrizioni)
- † **Metodo 2** (da applicarsi solo in casi particolari)

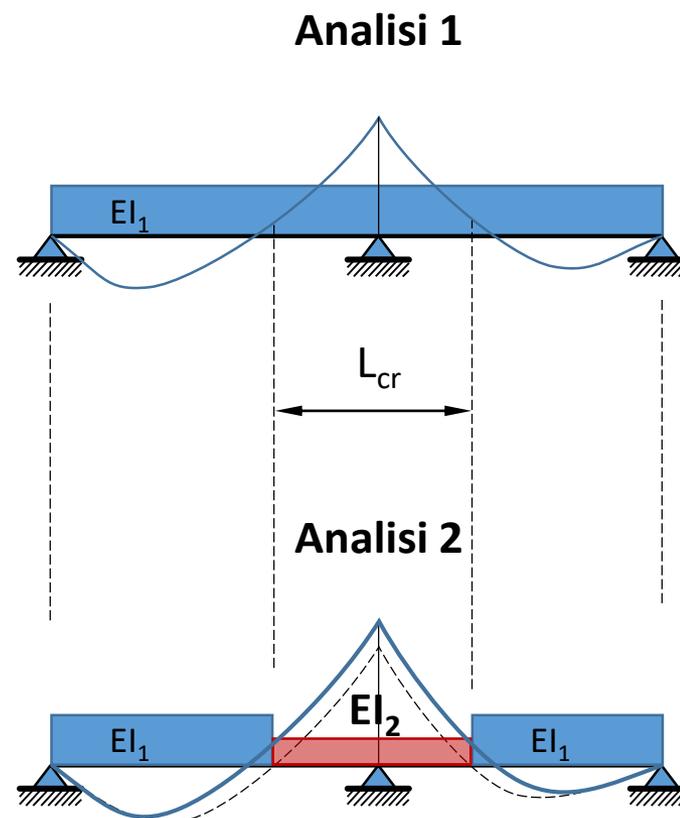
Analisi globale elastica

Effetto della fessurazione – metodo 1

E' valutato prima l'involuppo delle sollecitazioni corrispondenti a combinazioni caratteristiche dei carichi, inclusi gli effetti a lungo termine, e ad una rigidezza ovunque pari a quella della sezione interamente reagente (EI_1). Si individuano quindi le zone (L_{cr}) dell'elemento in cui la massima tensione di trazione nel calcestruzzo superiori di almeno due volte la resistenza f_{ctm} .

Le analisi definitive si eseguono considerando la rigidezza fessurata (EI_2) nella lunghezza L_{cr} e la rigidezza EI_1 altrove.

Questa distribuzione di rigidezze può essere adoperata sia per verifiche allo stato limite ultimo che per quelle di esercizio.



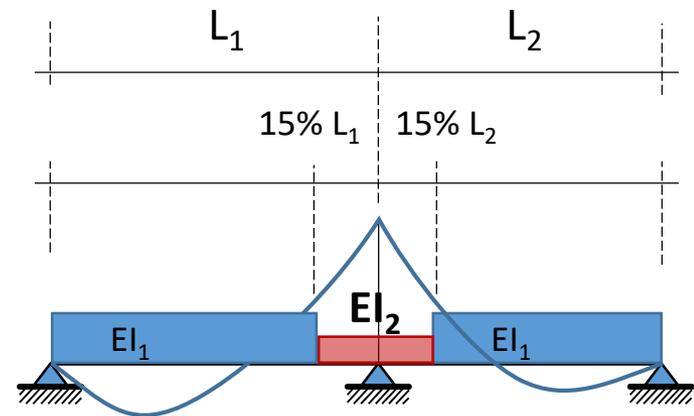
Analisi globale elastica

Effetto della fessurazione – metodo 2

E' applicabile alle travi continue (con soletta in c.a. non precompressa) in cui i rapporti tra luci di campate adiacenti (minore/maggiore) non risultino minori di 0.6.

In tali casi si può considerare :

- la rigidezza EI_2 applicata su entrambi i lati di ogni appoggio interno, su una lunghezza pari al 15% della luce
- la rigidezza EI_1 applicata a tutte le altre zone



Analisi globale elastica

Ritiro primario e secondario

Si possono distinguere i seguenti tipi di effetti da ritiro :

┆ Ritiro primario

Effetti del ritiro su trave isostatica
(o iperstatica in cui non è considerata la compatibilità delle deformazioni)

┆ Ritiro secondario

Effetti addizionali in strutture iperstatiche
conseguenti al ripristino della congruenza

Ritiro del calcestruzzo

Effetto primario del ritiro

Per restituire alla soletta la lunghezza che aveva prima del ritiro, occorre applicare al calcestruzzo una tensione di trazione pari a :

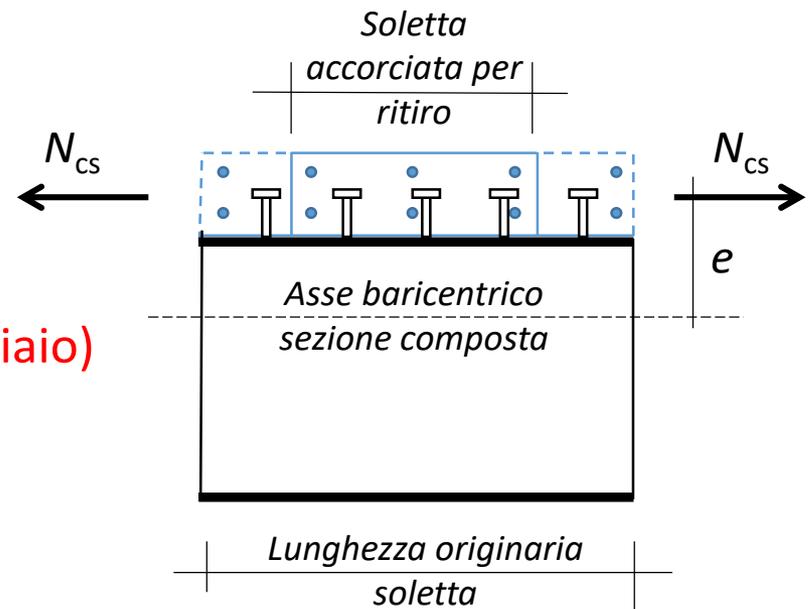
$$\sigma = \varepsilon_{cs} E_a / n_L \quad (\text{att. si omogeneizza ad acciaio})$$

e quindi uno sforzo normale pari a :

$$N_{cs} = \sigma \cdot A$$

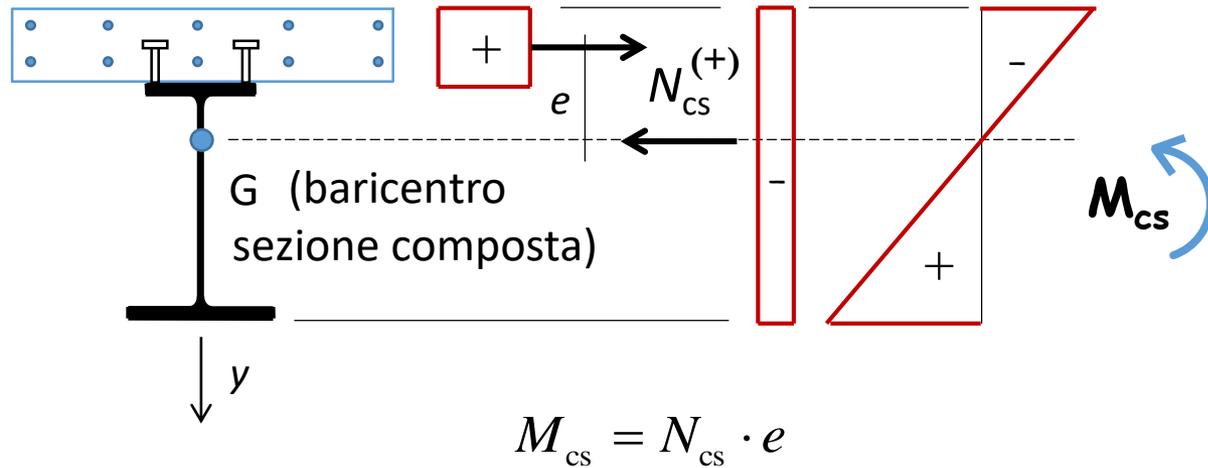
Per poter riequilibrare il sistema, occorrerà applicare uno sforzo di compressione sull'intera sezione composta di intensità pari ad N_{cs} ed un momento flettente.

Nota: il ritiro primario può essere trascurato nelle regioni dove la soletta è assunta fessurata. EC4 parte 1.1 - 6.2.1.5(5)



Ritiro del calcestruzzo

Effetto primario del ritiro



Tensione nel
calcestruzzo

$$\sigma_c = + \frac{N_{cs}}{A_c} - \frac{N_{cs}^{(+)}}{A_{id} \cdot n_L} + \frac{M_{cs}}{I_{id} \cdot n_L} y$$

Tensione
nell'acciaio

$$\sigma_s = - \frac{N_{cs}}{A_{id}} + \frac{M_{cs}}{I_{id}} y$$

Ritiro del calcestruzzo

Effetto secondario del ritiro

Gli effetti secondari da ritiro sono quelli che, in strutture iperstatiche, servono a ripristinare la congruenza violata nel calcolo degli effetti primari.

Un modo semplice per calcolare gli effetti secondari prevede l'applicazione di una variazione di temperatura equivalente, lineare nello spessore della trave.

$$\frac{M_{cs}}{E_a I_1} = \frac{\alpha_T \Delta T_{MP}}{h} \quad \Rightarrow \quad \Delta T_{MP} = \frac{M_{cs}}{E_a I_1} \cdot \frac{h}{\alpha_T}$$

dove :

h altezza totale della trave

I_1 momento d'inerzia della sezione composta

α_T coefficiente d'espansione termica dell'acciaio

**Nota: la variazione termica può essere trascurata in regioni dove la soletta è assunta fessurata
EC4 5.4.2.2 (8)**

Analisi globale elastica

Effetto della viscosità

Per costruzioni non suscettibili di problemi di stabilità globale, è possibile tenere conto della viscosità sostituendo l'area di calcestruzzo con aree equivalenti ridotte in ragione del coefficiente di omogeneizzazione calcolato per breve e lungo termine.

Il coefficiente di omogeneizzazione n_L è calcolato tramite la relazione:

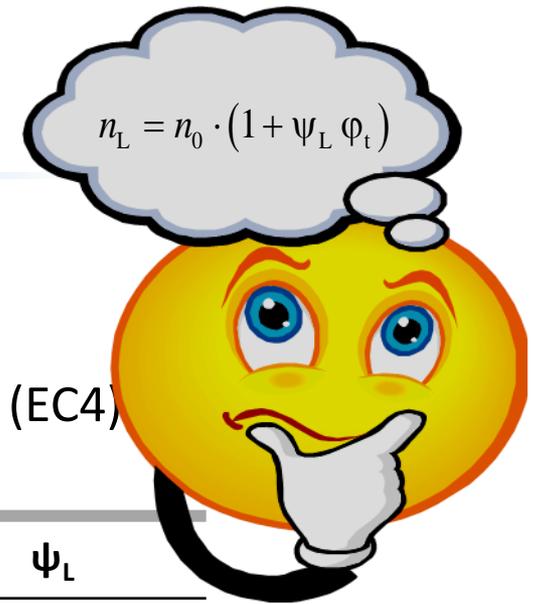
$$n_L = n_0 \cdot (1 + \psi_L \varphi_t)$$

dove:

n_0 rapporto modulare usato per carico di breve durata;
 ψ_L coefficiente correttivo dipendente dal tipo di azione considerata;
 $\varphi_t = \varphi_t(t, t_0)$ valore del coefficiente di viscosità dipendente dall'istante di applicazione del carico t_0 e dall'istante finale di analisi t . L'istante t_0 di applicazione del carico può essere assunto pari a 28 giorni, tranne nel caso del ritiro per il quale deve essere assunto pari ad 1 giorno.

Analisi globale elastica

Effetto della viscosità



I valori di ψ_L sono definiti in funzione del tipo di azione (EC4)

Azioni	ψ_L
Carichi permanenti	1.1
Effetti da ritiro	0.55
Presollecitazione da deformazioni imposte	1.5

Attenzione !

Gli effetti della viscosità vanno valutati con riferimento ai soli carichi permanenti o temporaneamente permanenti (ad esempio, ritiro o presollecitazione da deformazioni imposte).

Analisi globale elastica

Effetto della viscosità

Per i carichi permanenti su strutture composte gettate in più riprese, un tempo medio t_0 può essere usato per la determinazione del coefficiente di viscosità.

Analisi globale elastica

Effetto della viscosità in travi isostatiche

Nelle travi isostatiche (appoggiate-appoggiate), la riduzione di rigidità dovuta alla viscosità ha luogo in tutta la lunghezza della trave.

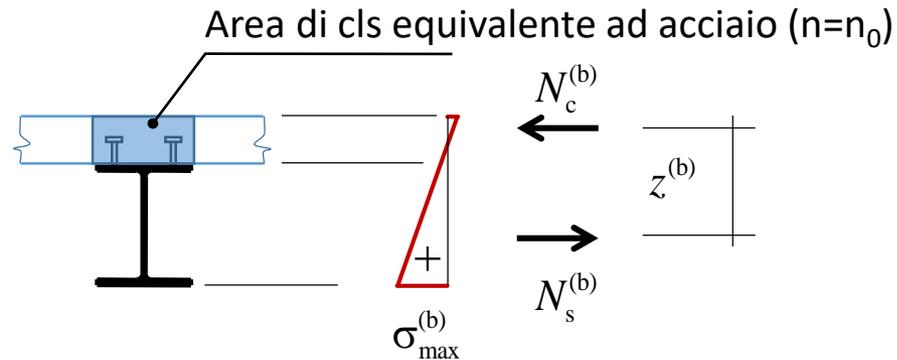
Pertanto, nelle travi isostatiche (appoggiate-appoggiate), la viscosità provoca :

- Incremento di inflessioni
- Nessun cambiamento nei diagrammi dei momenti flettenti e dei tagli
- Redistribuzione delle tensioni nelle sezioni, con aumento delle tensioni dell'acciaio e riduzione di quelle del calcestruzzo.

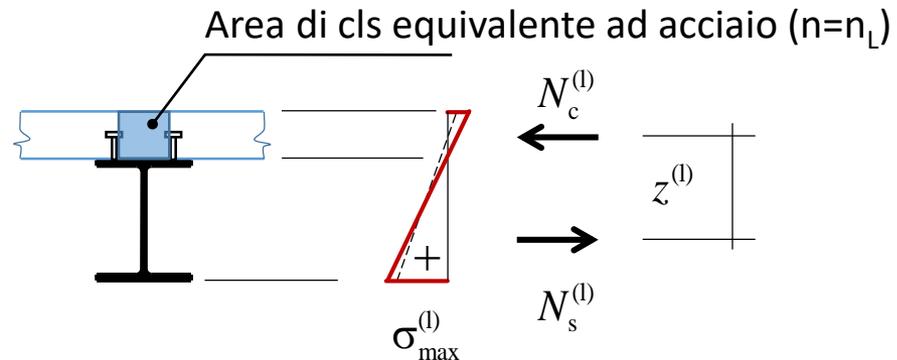
Analisi globale elastica

Redistribuzione delle tensioni per viscosità

Breve termine



Lungo termine



Attenzione: nelle strutture composte acciaio-calcestruzzo è prassi omogeneizzare ad acciaio

Analisi globale elastica

Effetto della viscosità in travi iperstatiche

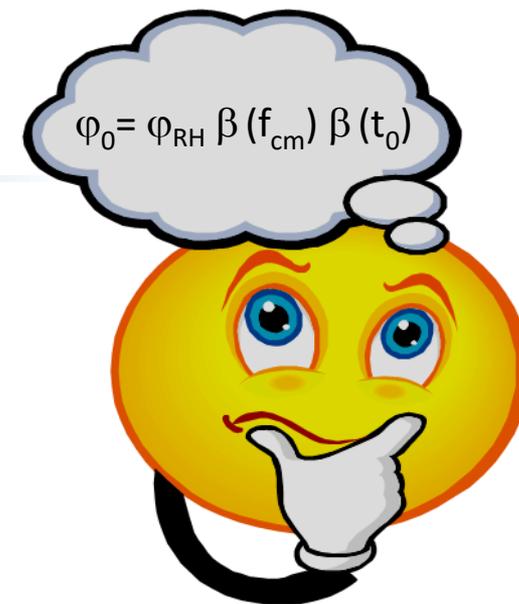
Nelle travi iperstatiche, la riduzione di rigidezza dovuta alla viscosità ha luogo solo nelle zone non fessurate (ovvero in campata). Ciò significa che la rigidezza flessionale delle zone di appoggio aumenta in relazione a quella delle zone di campata.

Pertanto, nelle travi iperstatiche, la viscosità provoca :

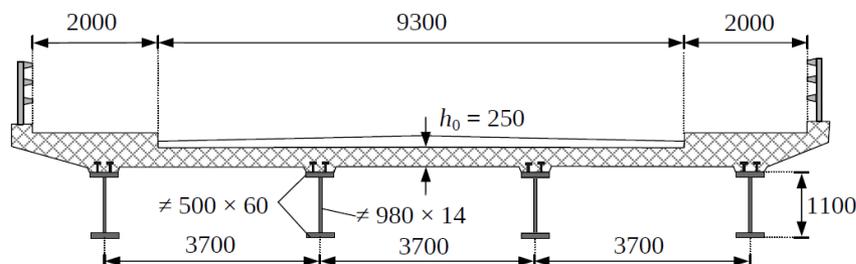
- Incremento di inflessioni
- Modifica dei diagrammi dei momenti flettenti con aumento all'appoggio e riduzione in campata
- Forze di scorrimento all'interfaccia calcestruzzo-acciaio
- Redistribuzione delle tensioni nelle sezioni con momento flettente positivo, con aumento delle tensioni dell'acciaio e riduzione di quelle del calcestruzzo.

Viscosità del calcestruzzo

Esempio



travi appoggiate-appoggiate



Classe del calcestruzzo C40/50

Tipo di cemento: N

RH=70%

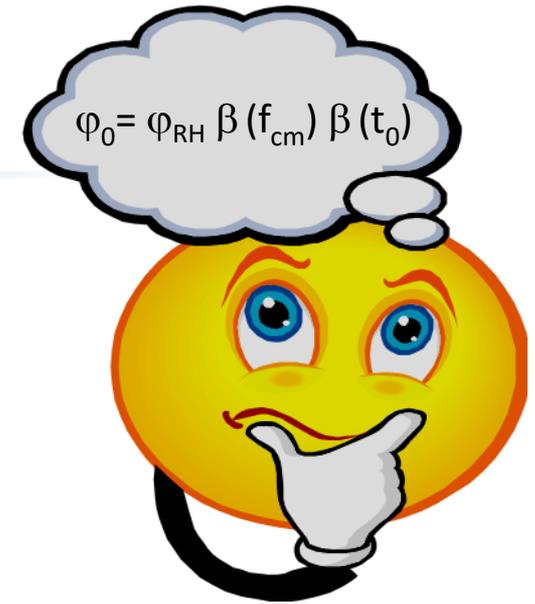
$h_0=160$ mm

Per la valutazione del coefficiente di omogeneizzazione, il fattore di viscosità $[\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)]$ relativo all'azione di ritiro è calcolato per carico di lunga durata con età di primo carico assunta pari a 1 giorno :

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right)^\alpha = 1 \left(\frac{9}{2 + 1^{1.2}} + 1 \right)^0 = 1 \geq 0.5 \quad \beta(t_0) = \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.20})} = \frac{1}{(0.1 + 1^{0.20})} = 0.91$$

Viscosità del calcestruzzo

Esempio



$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0.10 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - 70/100}{0.10 \cdot \sqrt[3]{160}} 0.802 \right] 0.939 = 1.298$$

essendo :

$$\alpha_1 = (35/f_{cm})^{0.7} = (35/48)^{0.7} = 0.802$$

$$\alpha_2 = (35/f_{cm})^{0.2} = (35/48)^{0.2} = 0.939$$

Quindi :

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) = 1.298 \cdot 2.42 \cdot 0.91 = 2.86$$

essendo :

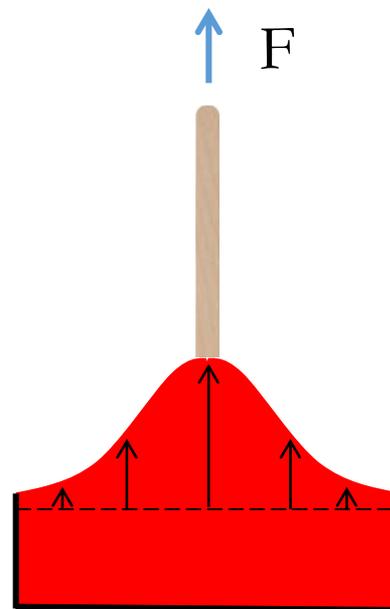
$$\beta(f_{cm}) = 16.8/\sqrt{f_{cm}} = 16.8/\sqrt{40} = 2.42$$

Il coefficiente di omogeneizzazione vale : $n_L = n_0 \cdot (1 + \psi_L \varphi_t) = 6 \cdot (1 + 0.55 \cdot 2.86) = 15.4$

Analisi globale elastica

Effetto dello «shear lag»

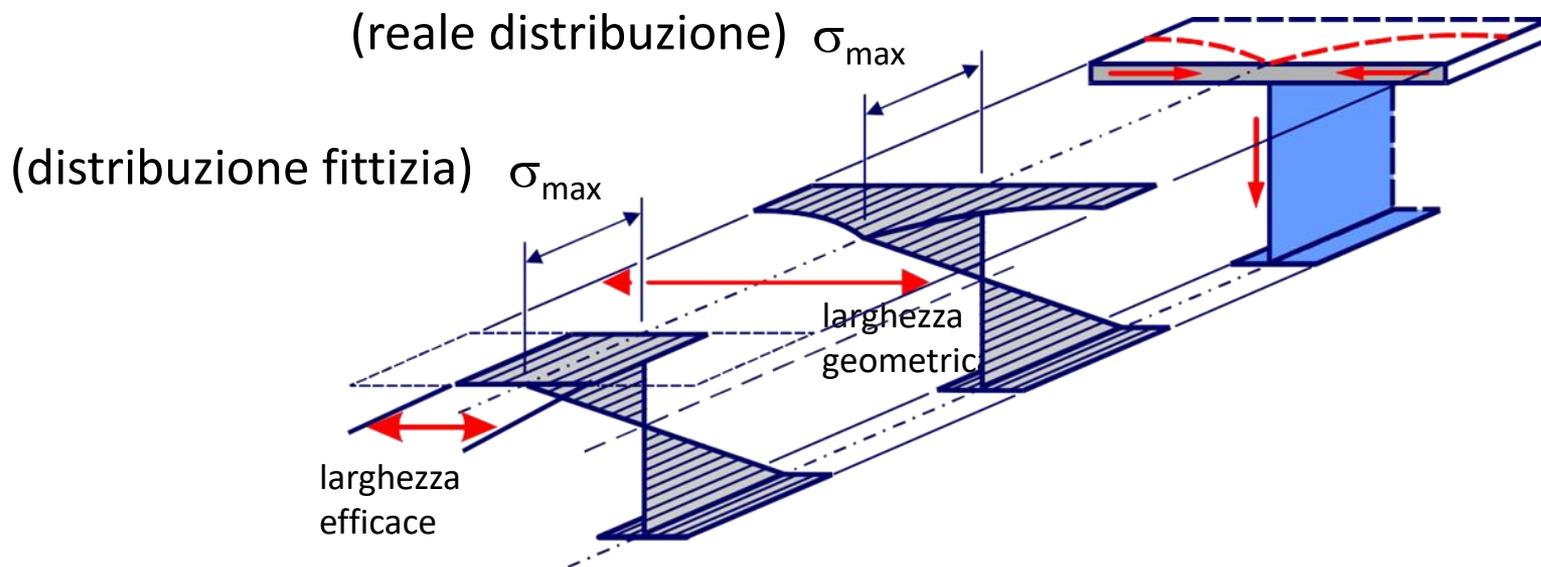
Per «shear lag» si intende la graduale diminuzione della tensione longitudinale all'aumentare della distanza trasversale dall'asse longitudinale dell'elemento resistente.



Analisi globale elastica

Effetto dello «shear lag»

Usualmente per simulare lo shear lag si considera una larghezza della flangia della trave, detta *larghezza efficace* (b_{eff}), minore rispetto alla larghezza geometrica della trave (b) e tale da soddisfare un criterio di equivalenza tra le tensioni costanti sulla larghezza efficace e l'integrale delle tensioni sulla larghezza geometrica.



Analisi globale elastica

Effetto dello «shear lag»

Sebbene ci siano differenze significative tra le larghezze efficaci nelle zone degli appoggi e in mezzera delle travi, è possibile trascurare tutto ciò nell'analisi elastica globale (dato che lo «*shear lag*» ha un'influenza limitata sui risultati dell'analisi globale) ed assumere un valore unico della larghezza efficace per l'intera luce di trave e per l'intero sbalzo.

Attenzione: tale semplificazione è possibile solo per determinare le sollecitazioni sulla trave, non per eseguire le verifiche delle sezioni !

Il valore (unico) della larghezza efficace b_{eff} può essere valutato in mezzera delle singole campate e all'incastro di sbalzi

Analisi globale elastica

Effetto dello «shear lag»

La larghezza efficace della soletta (unico per luce di trave)
è calcolata mediante la relazione :

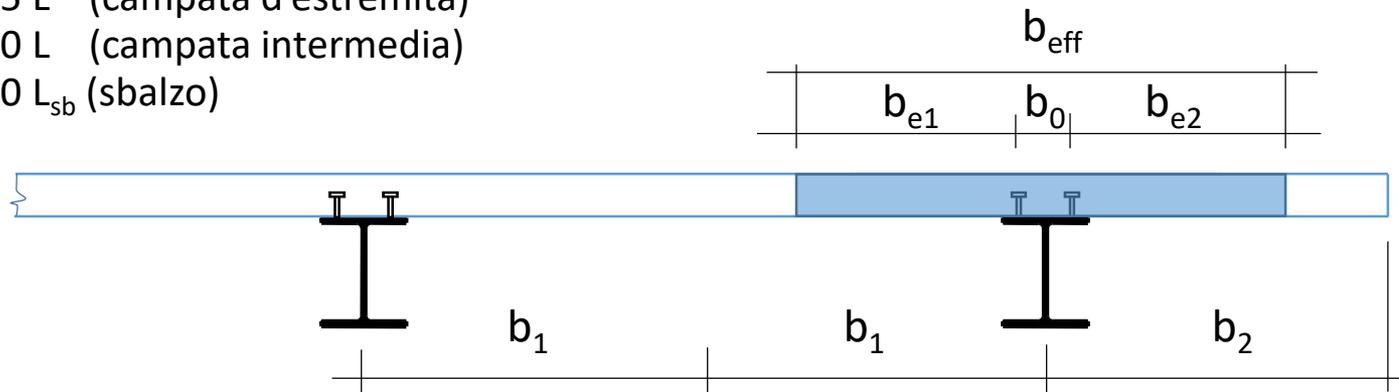
$$b_{\text{eff}} = b_0 + b_{e1} + b_{e2}$$

dove :

b_{e1} b_{e2} larghezza collaborante da ciascun
lato della sezione composta
 $= \min(L_e/8, b_i - b_0/2)$

b_0 distanza trasversale
tra gli assi dei connettori

L_e = 0.85 L (campata d'estremità)
= 0.70 L (campata intermedia)
= 2.00 L_{sb} (sbalzo)



Analisi globale elastica

Effetto dell'instabilità locale

L'effetto dell'instabilità locale nell'analisi globale elastica può essere considerato per mezzo dell'area efficace della sezione trasversale.

L'effetto dell'instabilità locale sulla rigidezza può essere ignorato quando l'area efficace della sezione trasversale di un elemento in compressione è maggiore di ρ_{\min} volte l'area lorda della sezione trasversale dell'elemento.

Il valore raccomandato di ρ_{\min} è 0.5

Analisi globale elastica

Effetto dei campi di temperatura

Gli effetti della temperatura devono essere considerati nel calcolo quando influenti.

Tali effetti possono essere solitamente trascurati nella verifica allo stato limite ultimo (ad eccezione della verifica di fatica), quando sono soddisfatte le condizioni :

- gli elementi strutturali sono in classe 1 o 2
- non vi sono pericoli di instabilità flessione-torsionale.

Analisi globale elastica

Effetto delle fasi di costruzione

Allo studio statico della sezione occorre premettere la considerazione che nelle travi sono possibili diversi approcci costruttivi :

- ┆ Costruzione delle solette con travi metalliche integralmente puntellate
- ┆ Costruzione delle solette con travi metalliche parzialmente puntellate
- ┆ Costruzione delle solette con travi metalliche non puntellate

Analisi globale elastica

Effetto delle fasi di costruzione – trave puntellata con continuità

Fase 1:

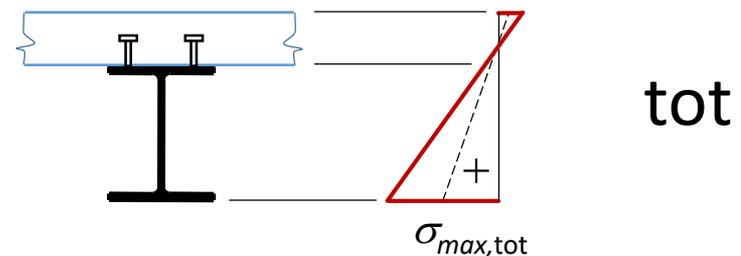
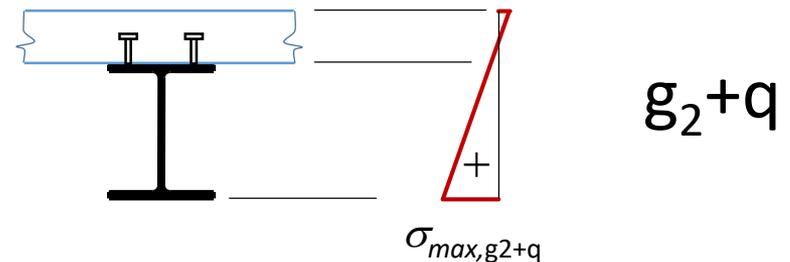
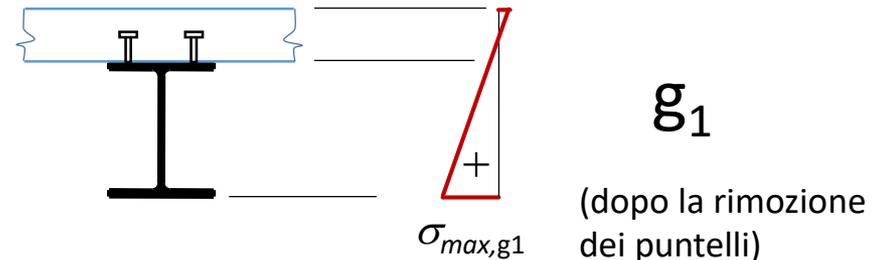
i puntelli sono collocati in numero elevato e a distanza ridotta (la trave è appoggiata con continuità su tutta la sua lunghezza)

I pesi propri della soletta (non ancora maturata) e della trave in acciaio (g_1) scaricano sui puntelli.

Fase 2:

Raggiunta la maturazione della soletta, i puntelli vengono rimossi.

Tutti i carichi verticali (g_1+g_2+q) sono portati dalla struttura mista acciaio-calcestruzzo.



Analisi globale elastica

Effetto delle fasi di costruzione – trave puntellata

Fase 1:

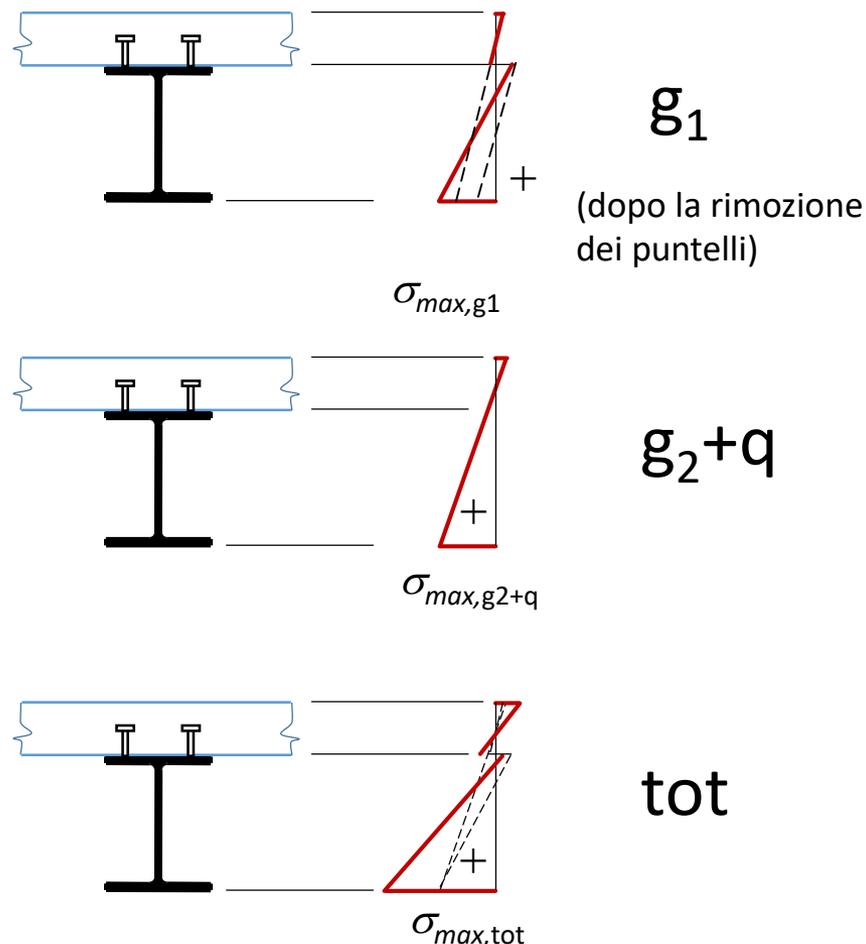
i puntelli sono collocati in numero limitato e lo schema statico della trave composta diventa di trave continua su più appoggi.

I pesi propri scaricano sui puntelli e sugli appoggi laterali.

Fase 2:

Raggiunta la maturazione della soletta, i puntelli vengono rimossi.

I carichi variabili e i carichi puntuali costituiti dalle reazioni vincolari dei sostegni (applicate con lo stesso modulo e segno contrario) sono portati dalla sezione composta.



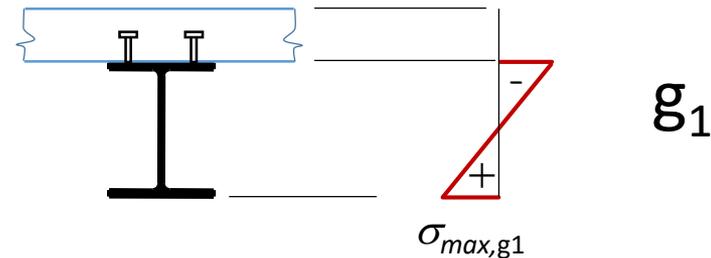
Analisi globale elastica

Effetto delle fasi di costruzione – trave non puntellata

Fase 1:

non sono collocati puntelli.

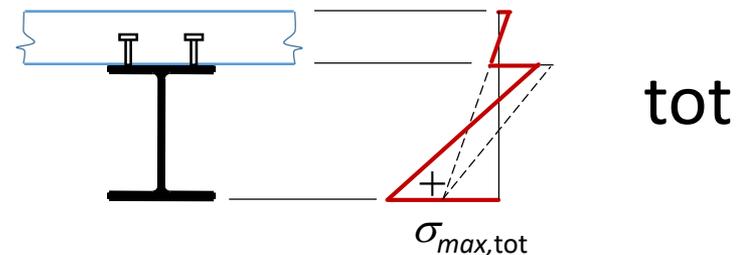
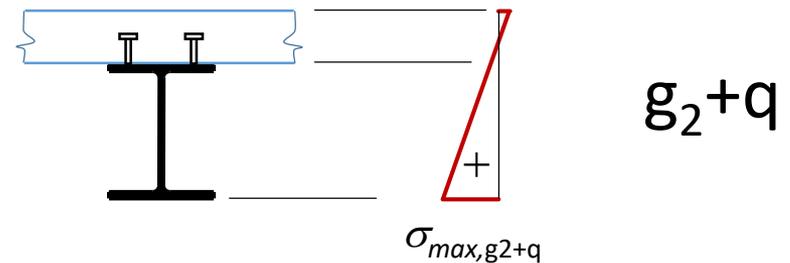
Il carico costituito dal peso della struttura in acciaio e della soletta in calcestruzzo (g_1) è portato dalla sola struttura in acciaio.



Fase 2:

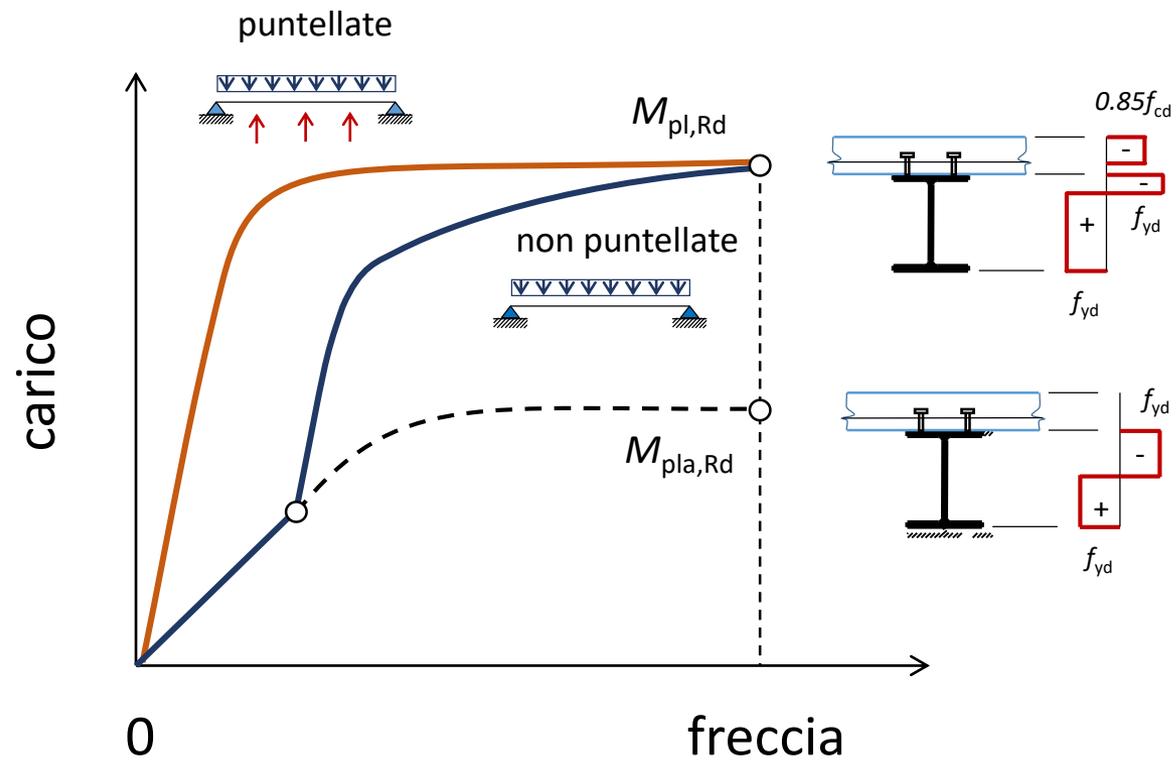
Raggiunta la maturazione della soletta, i puntelli vengono rimossi.

I pesi permanenti ed i carichi variabili (g_2+q) sono portati dalla struttura mista acciaio-calcestruzzo.



Analisi globale elastica

Effetto delle fasi di costruzione



Analisi globale elastica

Sovrapposizione degli effetti

Quando si vogliono ottenere i risultati di combinazioni di carico ad una determinata ascissa della membratura, ... e le singole condizioni di carico agiscono (a tale ascissa) su sezioni resistenti diverse,

(ad esempio, perché le sezione resistenti corrispondenti ai singoli carichi sono diverse nella geometria – solo acciaio o composta – oppure nei coefficienti di omogeneizzazione)

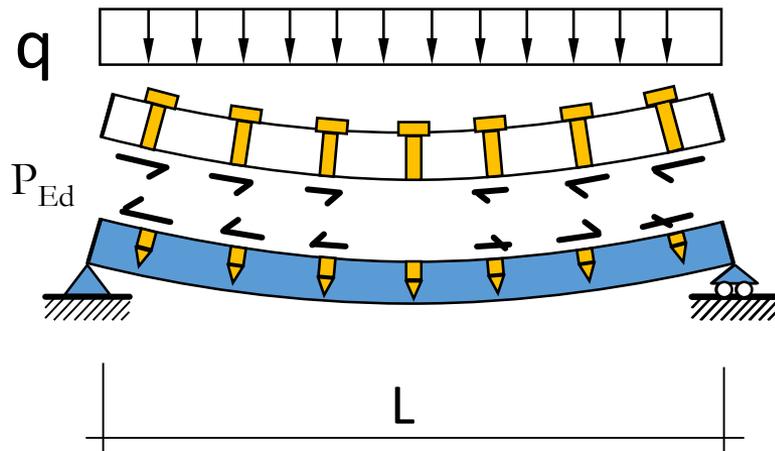
non è possibile sovrapporre gli effetti in termini di sollecitazioni interne ma occorre sovrapporre gli stati di tensione corrispondenti alle singole condizioni di carico.

Attenzione: non è necessario considerare le fasi di carico per verifiche agli stati limite ultimi se le sezioni sono tutte di classe 1 o 2.

CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA CONNESSIONE

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

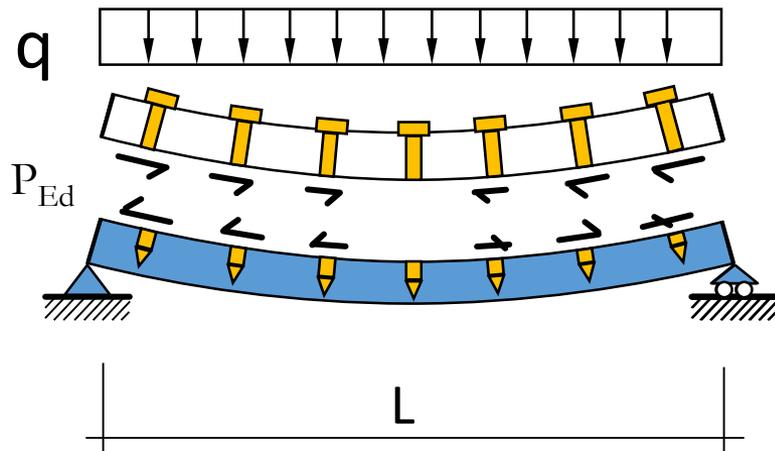
Grado di connessione



I concetti di «completa connessione» e «parziale connessione» si applicano alle travi in cui è utilizzata la teoria plastica per il calcolo delle resistenze flessionali delle sezioni critiche.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Grado di connessione



$N_{c,f}$ = forza a cui i connettori tra la posizione di massimo momento positivo e l'estremità libera devono resistere, se si vuole garantire lo sviluppo della piena resistenza della trave

n_f = numero dei connettori, di eguali caratteristiche meccaniche, necessari a resistere a $N_{c,f}$

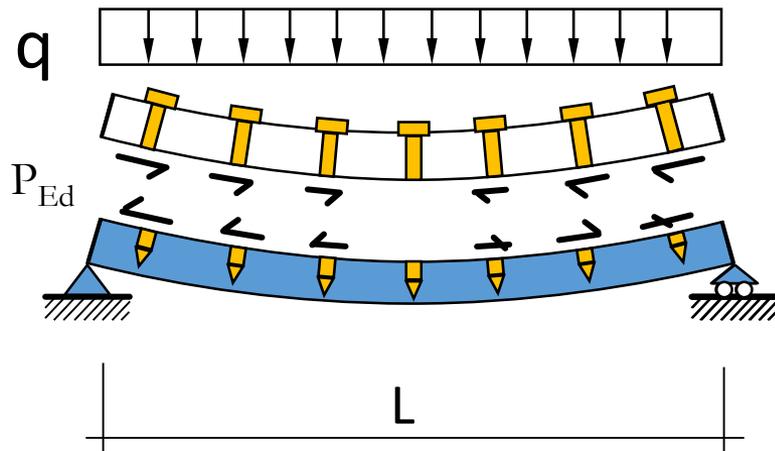
Se N_c è la forza che i connettori riescono a trasmettere nella luce di taglio ed n è il loro numero in tale luce,

il loro grado di connessione è

$$\eta = n/n_f = N_c/N_{c,f}$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Completa o parziale connessione



$N_{c,f}$ = forza a cui i connettori tra la posizione di massimo momento positivo e l'estremità libera devono resistere, se si vuole garantire lo sviluppo della piena resistenza della trave

n_f = numero dei connettori, di eguali caratteristiche meccaniche, necessari a resistere a $N_{c,f}$

Una trave è dotata di **completa connessione** quando un aumento del numero dei connettori non incrementerebbe la resistenza flessionale della trave.

In caso contrario, la trave è dotata di **parziale connessione** a taglio.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Connessione con pioli - considerazioni

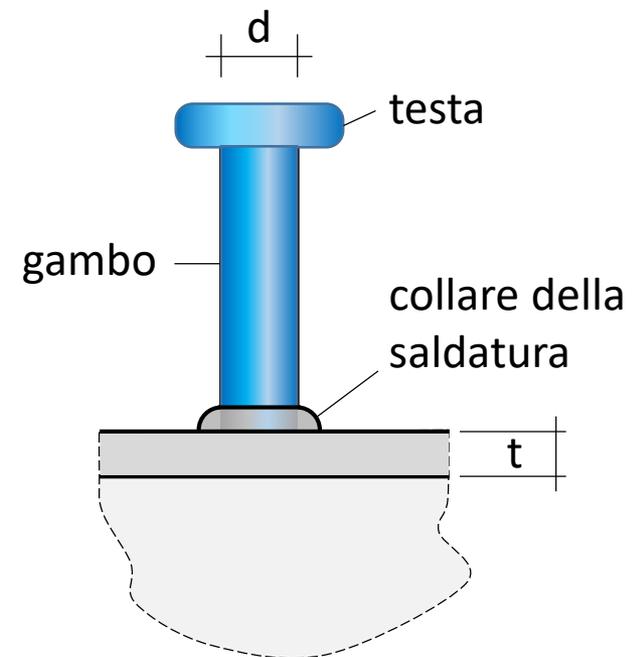
- Il processo di saldatura diventa molto costoso e difficile per diametri del piolo superiori a 20 mm. Pertanto :

$$d \leq 20 \text{ mm}$$

- Perché il piolo possa sviluppare la sua piena resistenza statica occorre che il rapporto tra il diametro del piolo e lo spessore della flangia cui è saldato sia minore di 2.5.

Pertanto :

$$d/t < 2.5$$



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Duttilità dei pioli

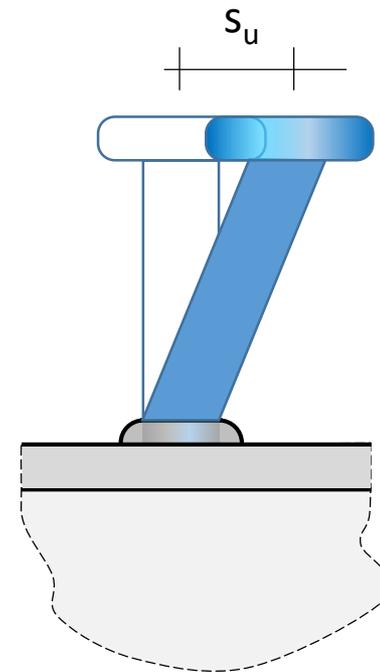
I pioli sono duttili se hanno una capacità deformativa a taglio superiore a 6 mm, ovvero :

$$s_u \geq 6 \text{ mm}$$

Tale valore deve essere convalidato da apposite prove o comunque certificato dal produttore.

Nota !

Tale requisito è imprescindibile quando si adotti il calcolo plastico per il calcolo del momento resistente della trave

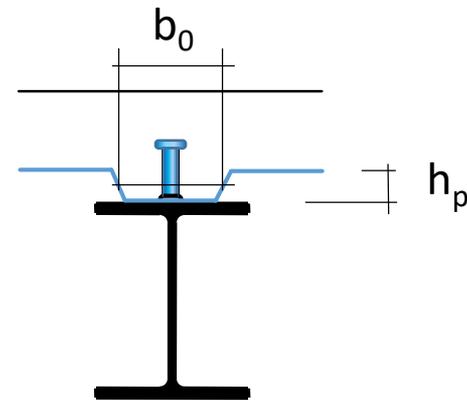


Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Duttibilità dei pioli

In alternativa, i pioli sono duttili se sono rispettate le condizioni :

- i pioli hanno una altezza minima dopo la saldatura pari a 76 mm ed un diametro pari a 19 mm
- la sezione in acciaio ad I o H è laminata a caldo
- la lamiera grecata (se presente) è continua sulla trave
- in ogni greca è disposto un unico piolo
- la lamiera grecata soddisfa le limitazioni $b_0/h_p \geq 2$ e $h_p \leq 60$ mm



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Duttilità dei pioli

Inoltre :

- la forza agente in soletta è calcolata utilizzando il metodo per il calcolo del momento plastico
- il grado di connessione η soddisfa le limitazioni :

$$\eta \geq \max \left[1 - \frac{355}{f_y} (1 - 0.04 L_e); 0.4 \right] \quad \text{per } L_e \leq 25 \text{ m}$$

$$\eta \geq 1 \quad \text{per } L_e > 25 \text{ m}$$

dove :

L_e distanza tra i punti di momento nullo
nella parte di trave soggetta a momento positivo

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Duttilità dei pioli

In alternativa, possono essere considerati duttili i pioli se sono rispettate le condizioni :

- l'altezza dei pioli è non inferiore a 4 volte il loro diametro
- il diametro del gambo del piolo è compreso tra 16 e 25 mm
- la saldatura è eseguita su un profilo a piattabande uguali
- il grado di connessione η soddisfa le condizioni :

$$\eta \geq \max \left[1 - \frac{355}{f_y} (0.75 - 0.03 L_e); 0.4 \right] \quad \text{per } L_e \leq 25 \text{ m}$$

$$\eta \geq 1 \quad \text{per } L_e > 25 \text{ m}$$

VERIFICA DELLE MEMBRATURE

Aste composte acciaio-calcestruzzo

Modalità di collasso

- ┆ Crisi per flessione
- ┆ Crisi per taglio verticale
- ┆ Crisi per taglio longitudinale
- ┆ Crisi per azioni trasversali sull'anima
- ┆ Crisi per instabilità dell'anima
- ┆ Crisi per instabilità latero torsionale

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica flessionale

La distribuzione delle tensioni normali deve essere determinata mediante una analisi rigorosa o mediante la larghezza efficace della soletta.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Larghezza efficace

La larghezza efficace della soletta è calcolata mediante la relazione :

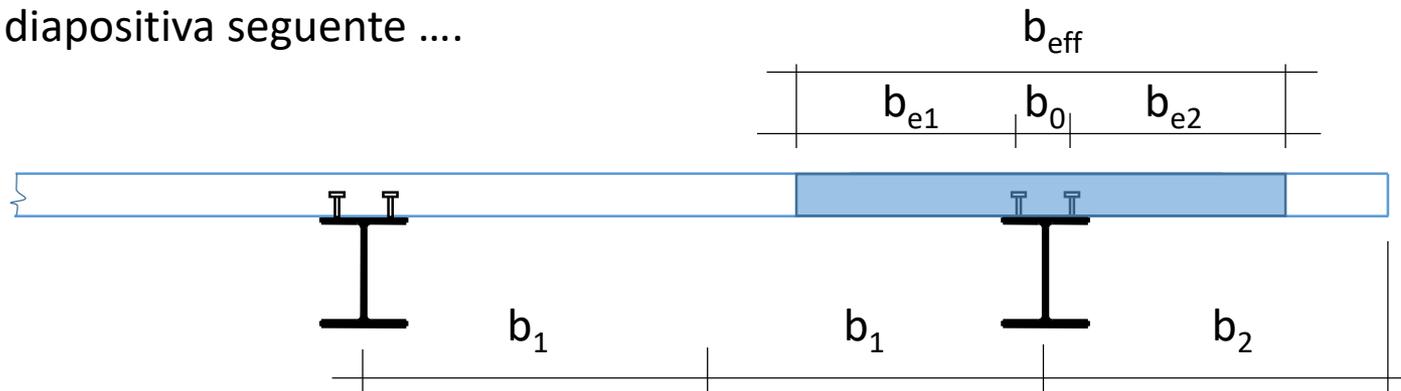
$$b_{\text{eff}} = b_0 + b_{e1} + b_{e2}$$

dove :

b_{e1} b_{e2} larghezza collaborante da
ciascun lato della sezione
composta = $\min(L_e/8, b_i - b_0/2)$

b_0 distanza trasversale
tra gli assi dei connettori

L_e vedi diapositiva seguente



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Larghezza efficace

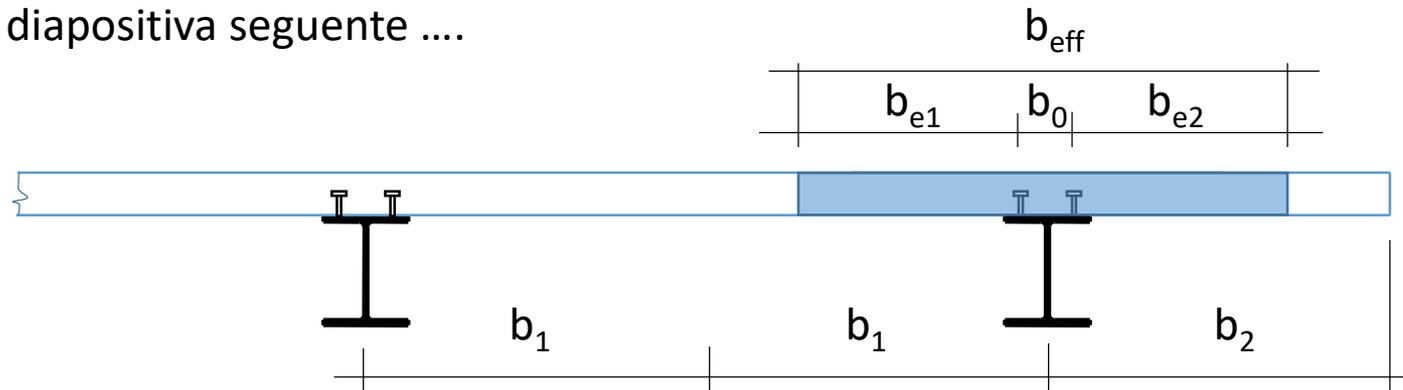
Per gli appoggi di estremità la larghezza efficace della soletta vale :

$$b_{\text{eff}} = b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2}$$

dove :

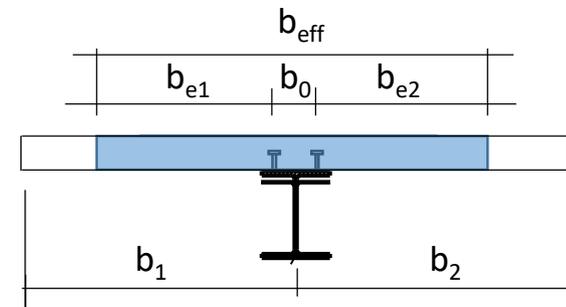
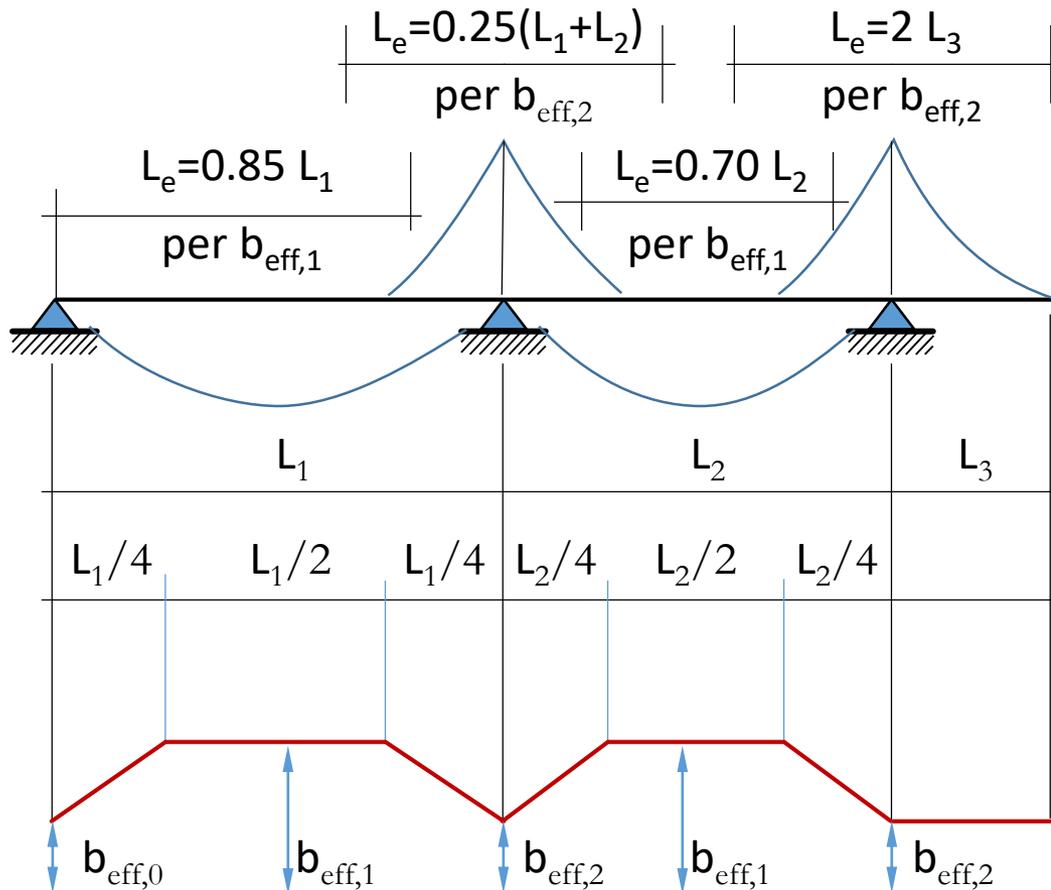
$$\beta_i = \left(0.55 + 0.025 \frac{L_e}{b_{ei}} \right) \leq 1.0$$

L_e vedi diapositiva seguente



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Distribuzione della larghezza efficace



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Distribuzione della larghezza efficace delle flange in acciaio

Lo «shear lag» può essere trascurato se $b_0 < L_e/50$ dove b_0 è la larghezza della sporgenza della flangia o metà della larghezza di un elemento intermedio e L_e è la lunghezza tra i punti di momento flettente nullo.

Dove il limite per b_0 è ecceduto, gli effetti dello shear lag delle flange dovrebbero essere considerati allo stato limite d'esercizio e per le verifiche di fatica per mezzo di una larghezza efficace. Per lo stato limite ultimo può essere considerata un'area efficace.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Analisi sezionale per flessione

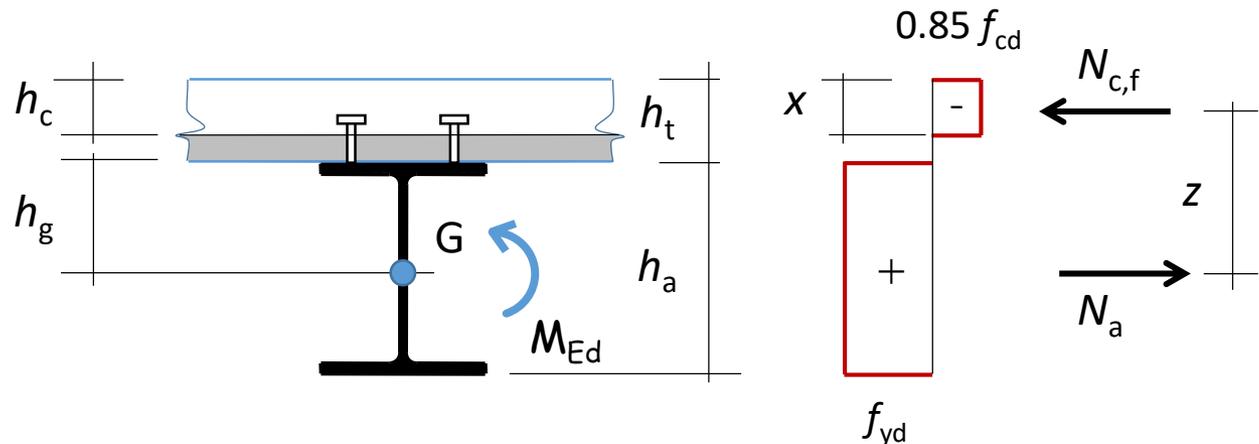
- † **Analisi plastica** ————— solo se
le sezioni sono di classe 1 o 2
e le connessioni a taglio sono duttili
- † **Analisi non lineare** ————— in ogni caso
- † **Analisi elastica** —————

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione – asse neutro nella soletta

analisi plastica

se ...
 $x \leq h_c$



$$N_{c,f} = A_a f_{yd} = b_{\text{eff}} x (0.85 f_{cd}) \quad \Rightarrow \quad x = \frac{A_a f_{yd}}{b_{\text{eff}} (0.85 f_{cd})}$$

$$M_{\text{pl,Rd}} = A_a f_{yd} \left(h_g + h_t - x/2 \right)$$

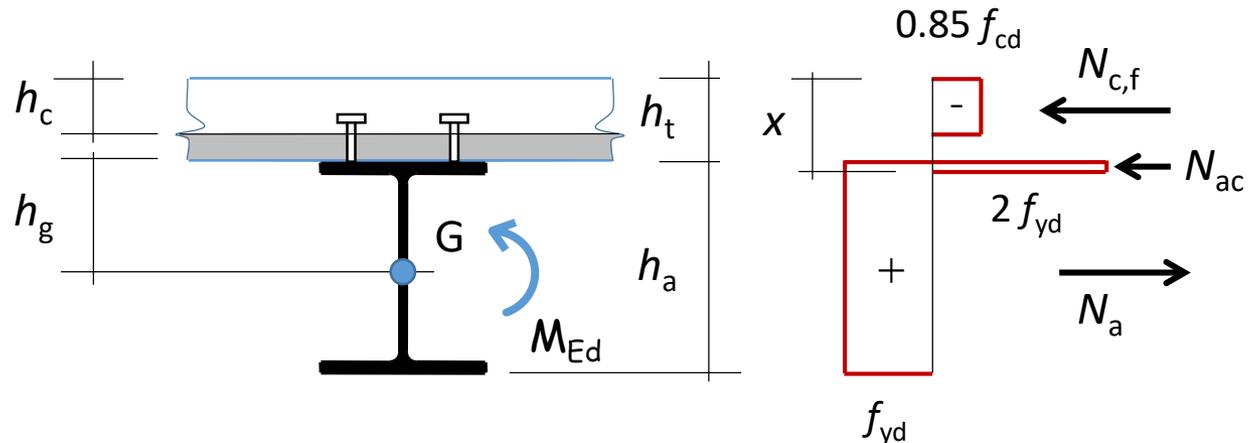
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione – asse neutro nella flangia superiore

analisi plastica

se ...

$$h_c < x \leq h_t + t_f$$



$$N_{ac} = A_a f_{yd} - b_{eff} h_c (0.85 f_{cd})$$

$$N_{ac} = b(x - h_t) 2 f_{yd}$$



$$x = \frac{A_a f_{yd} - b_{eff} h_c (0.85 f_{cd}) + b h_t 2 f_{yd}}{2 f_{yd} b}$$

$$M_{pl,Rd} = A_a f_{yd} \left(h_g + h_t - h_c / 2 \right) - N_{ac} (x - h_c + h_t) / 2$$

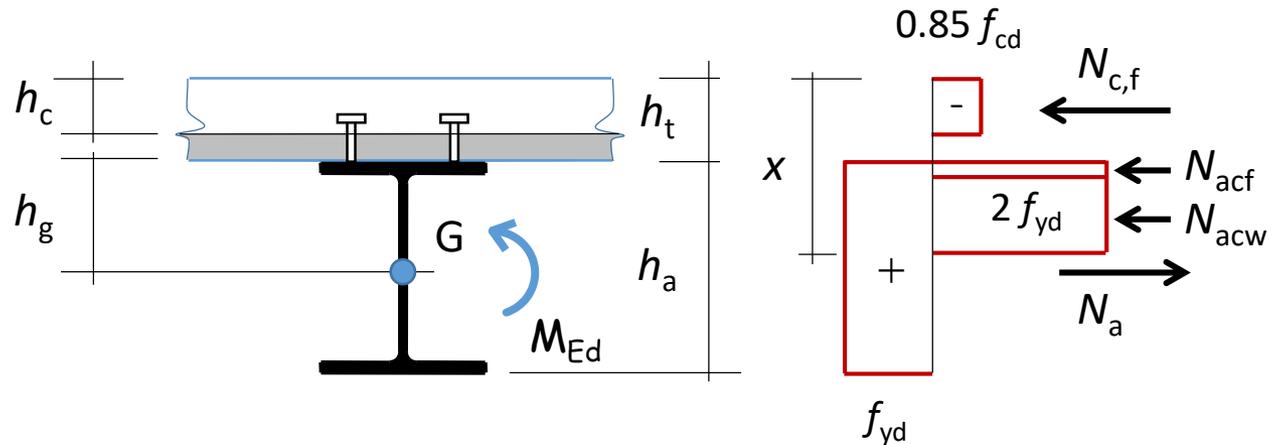
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione – asse neutro sotto flangia superiore

analisi plastica

se ...

$$h_t + t_f < x \leq h_t + h_a$$

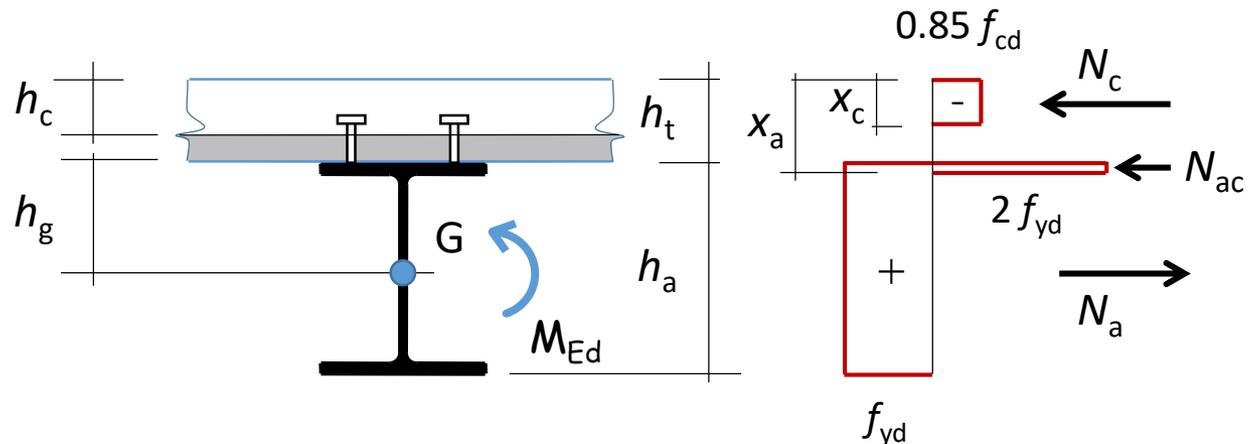


Il momento resistente può essere trovato in modo simile a quanto fatto precedentemente

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione – parziale connessione

analisi plastica - se ... $h_c < x \leq h_t + t_f$



$$N_c = b_{\text{eff}} x_c (0.85 f_{cd})$$

$$N_{ac} = A_a f_{yd} - N_c$$

$$N_{ac} = b(x_a - h_t) 2 f_{yd}$$



$$x_c = N_c / (0.85 f_{cd} b_{\text{eff}})$$

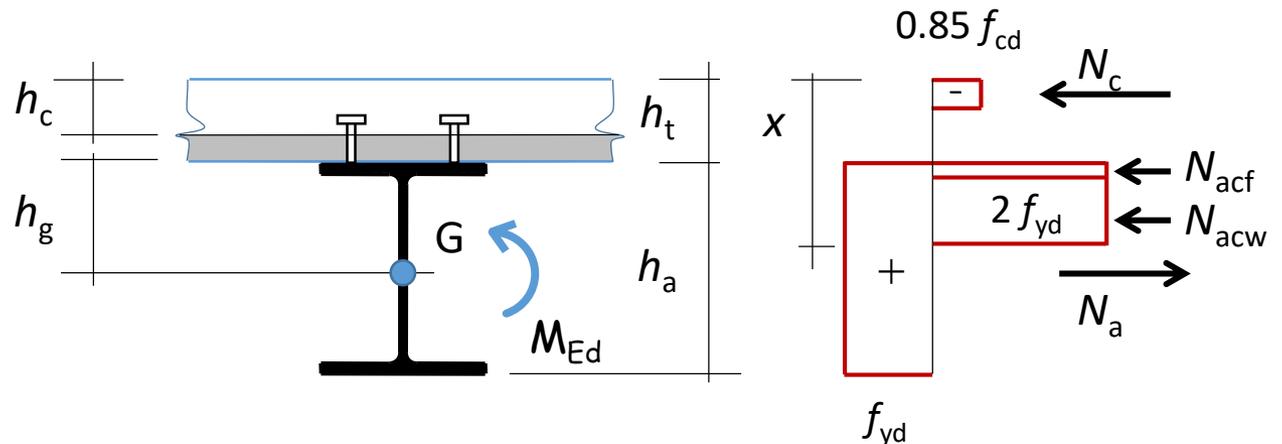
$$x_a = h_t + N_{ac} / (2 f_{yd} b_f)$$

$$M_{pl,Rd} = A_a f_{yd} (h_g + h_t - x_c / 2) - N_{ac} (x_a - x_c + h_t) / 2$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione – parziale connessione

analisi plastica - se ... $h_t + t_f < x \leq h_t + h_a$



Il momento resistente può essere trovato in modo simile a quanto fatto precedentemente

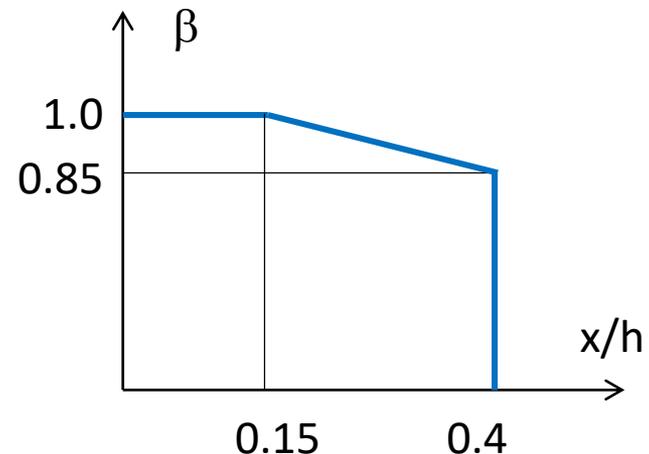
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione – parziale connessione

Per sezioni composte con acciaio strutturale tipo S420 o S460, se la profondità dell'asse neutro supera il 15% dell'altezza della sezione composta,

il momento resistente

$$M_{pl,Rd} = \beta M_{pl,Rd}$$

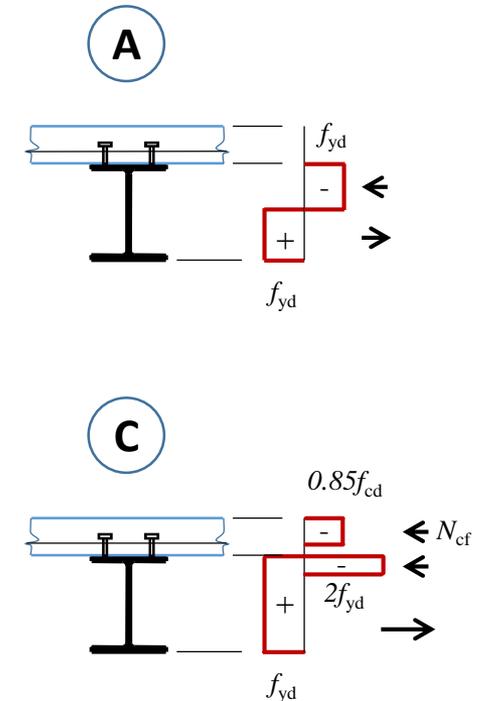
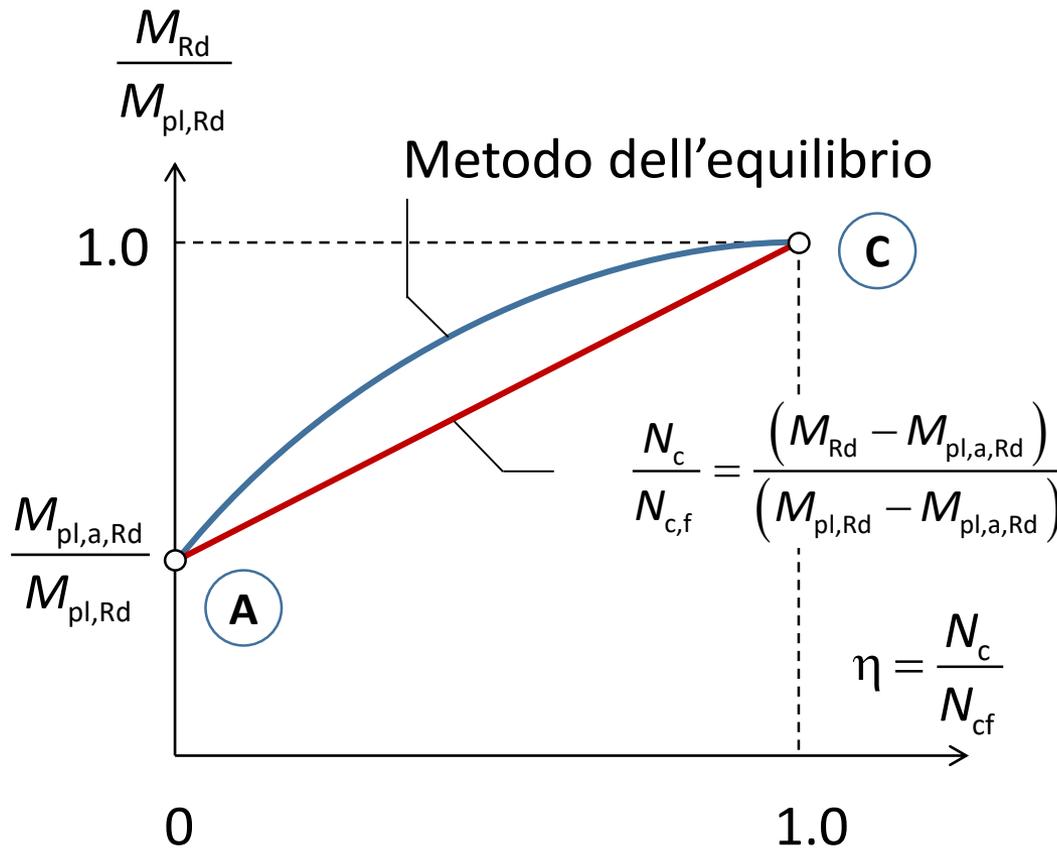


Nota !

Se la profondità dell'asse neutro supera il 40% dell'altezza della sezione composta, il momento resistente andrà calcolato con il metodo elastico o nonlineare.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a flessione

Se il momento resistente è determinato secondo l'approccio plastico, l'area d'armatura tesa A_s deve soddisfare la relazione :

$$A_s \geq A_c \delta \frac{f_{yk}}{235} \frac{f_{ctm}}{f_{sk}} \sqrt{k_c} \quad \text{con} \quad k_c = 0.3 + \frac{1}{1 + h_c / (2z_0)} \leq 1.0$$

dove :

A_c area collaborante della soletta

δ = 1 per sezioni di classe 2 e 1.1 per sezioni di classe 1 sede di cerniere plastiche

f_{ctm} valore medio della resistenza a trazione del calcestruzzo

f_{sk} valore caratteristico della tensione di snervamento dell'armatura

f_{yk} valore caratteristico della tensione di snervamento dell'acciaio strutturale

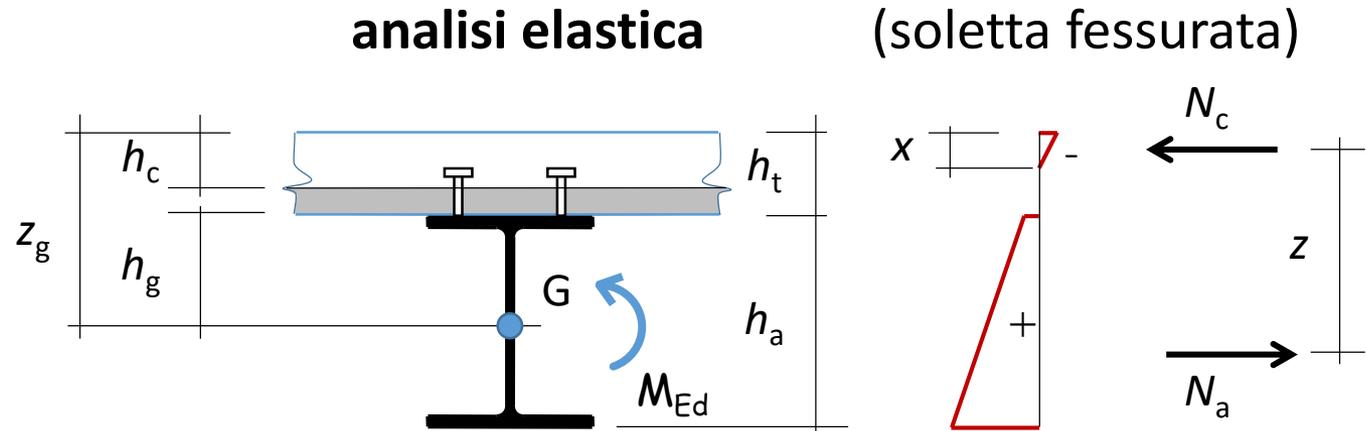
h_c altezza della soletta, escludendo nervature o ispessimenti locali

z_0 distanza tra il baricentro della soletta non fessurata e il baricentro della sezione composta considerata tutta reagente (coeff. di omogeneizzazione riferito a breve termine)

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica elastica a flessione - asse neutro nella soletta

se ...
 $x \leq h_c$



$$(S_n = 0) \quad A_a (z_g - x) = b_{\text{eff}} x^2 / (2n) \quad \Rightarrow \quad x = \frac{-A_a + \sqrt{A_a^2 - 2 \frac{b_{\text{eff}}}{n} A_a z_g}}{b_{\text{eff}} / n}$$

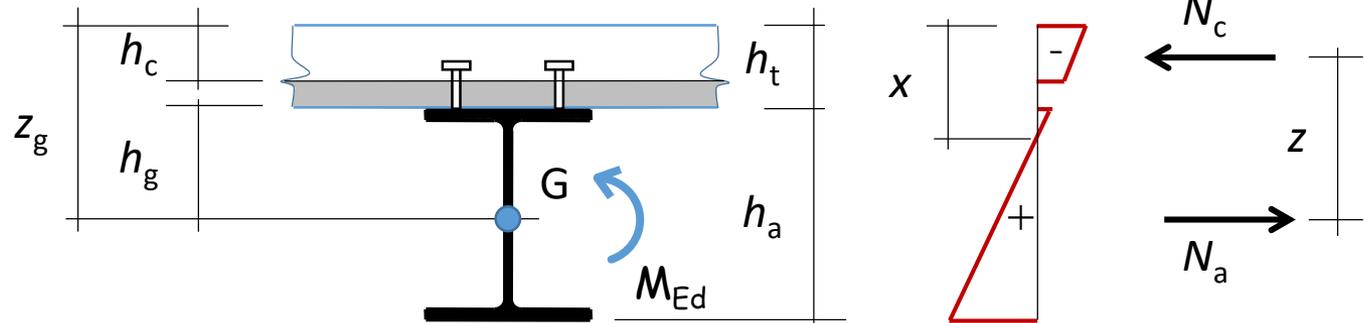
$$I = I_a + A_a (z_g - x)^2 + b_{\text{eff}} x^3 / (3n)$$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica elastica a flessione - asse neutro sotto la soletta

analisi elastica

se ...
 $x > h_c$



$$(S_n = 0) \quad A_a (z_g - x) = b_{\text{eff}} h_c (x - h_c/2) / n$$



$$x = \frac{A_a z_g + \frac{b_{\text{eff}} h_c^2}{2n}}{\frac{b_{\text{eff}} h_c}{n} + A_a}$$

$$I = I_a + A_a (z_g - x)^2 + (b_{\text{eff}} h_c / n) \left[\frac{h_c^2}{12} + (x - h_c/2)^2 \right]$$

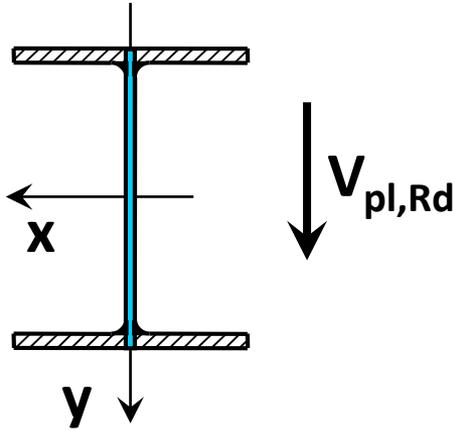
Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica di resistenza a taglio verticale

Si suppone che
il taglio verticale sia sopportato unicamente dal profilo in acciaio.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica plastica a taglio verticale



Per profili a doppio T
si plasticizza tutta l'anima
ed i raccordi circolari

Taglio resistente secondo l'Eurocodice 3

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$$

A_v area resistente a taglio

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Area resistente a taglio verticale

L'Eurocodice suggerisce formule dettagliate per profilati ad I o H laminati a caldo (caricati nel piano dell'anima)

$$A_v = A - 2 b t_f + (t_w + 2 r) t_f$$

dove :

A area della sezione trasversale

b larghezza dell'ala

t_f spessore dell'ala

t_w spessore dell'anima

r raggio di raccordo

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Area resistente a taglio verticale

L'Eurocodice suggerisce formule dettagliate per profilati saldati ad I, H o scatolari (caricati nel piano dell'anima)

$$A_v = \eta \sum h_w t_w$$

dove :

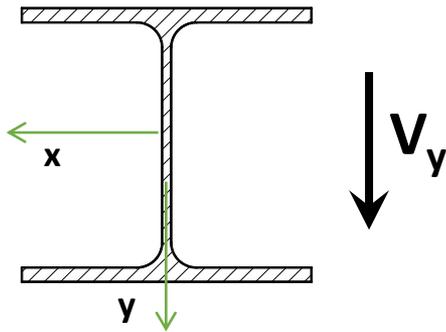
η =1.20 per acciai fino a S460 incluso [Eurocodice 3-5 (5.1)]
=1.00 per acciai di grado superiore

h_w altezza dell'anima

t_w spessore dell'anima

Verifica di resistenza a taglio verticale

Esempio



Sezione HEA 120

(S235)

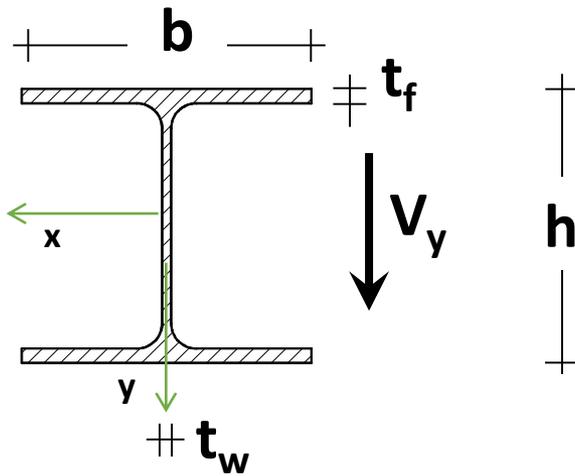
$$V_{Ed} = 10 \text{ kN}$$

Procedura

1. Si determina l'area resistente a taglio A_V
2. Si calcola il taglio resistente $V_{pl,Rd}$.
3. Si verifica che $V_{Ed} < V_{pl,Rd}$.

Verifica di resistenza a taglio verticale

Esempio



Sezione HEA 120

(S235)

$$V_{Ed} = 10 \text{ kN}$$

1. Area resistente a taglio A_v

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$b = 120 \text{ mm}$$

$$t_f = 8 \text{ mm}$$

$$h = 114 \text{ mm}$$

$$t_w = 5 \text{ mm}$$

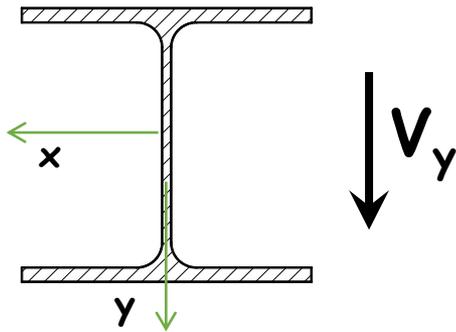
$$r = 12 \text{ mm}$$

$$A = 2534 \text{ mm}^2$$

$$A_v = 2534 - 2 \times 120 \times 8 + (5 + 2 \times 12) \times 8 = 846 \text{ mm}^2$$

Verifica di resistenza a taglio verticale

Esempio



Sezione HEA 120

(S235)

$$V_{Ed} = 10 \text{ kN}$$

2. e 3. Taglio resistente e verifica

$$V_{pl,Rd} = A_v \left(f_y / \sqrt{3} \right) / \gamma_{M0}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{846 \times 235 / \sqrt{3}}{1.05} \times 10^{-3} = 109.3 \text{ kN}$$

Sezione verificata

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica ad instabilità dell'anima per taglio verticale

La resistenza all'instabilità dell'anima $V_{b,Rd}$

è determinata in accordo alla norma EN 1993-1-5

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica a taglio verticale e momento flettente

Se $V_{Ed} > 0.5 V_{pl,Rd}$ o se $V_{Ed} > 0.5 V_{b,Rd}$
si deve tenere conto dell'interazione tra taglio e momento flettente

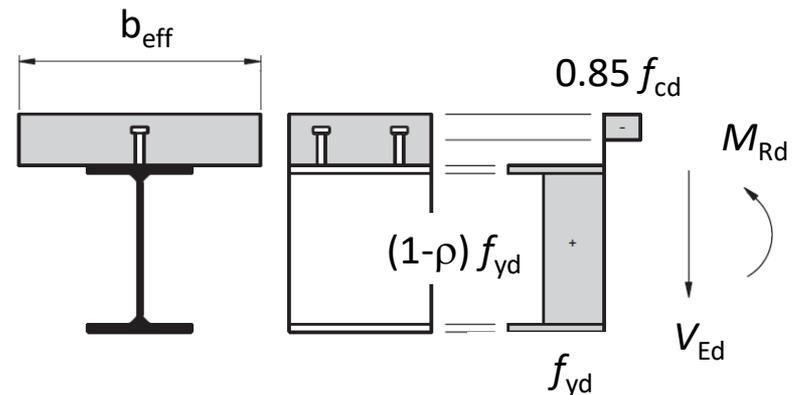
- Per sezioni di classe 1 o 2,
l'influenza del taglio verticale può essere considerata riducendo la resistenza di progetto dell'acciaio dell'anima secondo il fattore

$$\rho = (2 V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2$$

dove

$$V_{Rd} = \min(V_{pl,Rd}; V_{b,Rd})$$

- Per sezioni di classe 3 o 4
è applicabile la EN 1993-1-5 (7.1)



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica a taglio longitudinale

Per consentire il trasferimento della forza di taglio longitudinale tra il calcestruzzo della soletta e l'acciaio della trave dovranno essere disposti :

- † **connettori a taglio**
- † **armature trasversali**

ignorando l'effetto di aderenza naturale tra i due materiali.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica a taglio longitudinale dei connettori

Il progetto dei connettori si differenzia a seconda del tipo di analisi sezionale eseguita.

┆ **Analisi sezionale elastica**



il calcolo dei connettori è basato sullo scorrimento che localmente si produce tra trave metallica e soletta.

┆ **Analisi sezionale plastica**



il calcolo dei connettori deve assicurare il trasferimento alla soletta degli sforzi necessari all'equilibrio in condizioni di meccanismo delle sezioni critiche.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Progetto della connessione a taglio

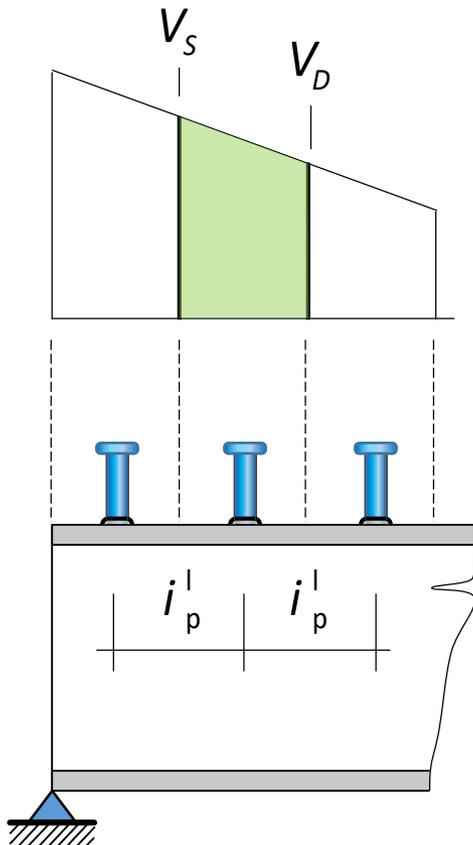
Nota !

Per la verifica degli stati limite ultimi, la dimensione e la spaziatura dei connettori a taglio può essere mantenuta costante su tratti dove :

- └ il taglio longitudinale di progetto per unità di lunghezza non eccede la resistenza a taglio di più del 10%.
- └ la forza totale di taglio longitudinale non eccede la resistenza totale a taglio.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo elastico della forza di scorrimento



Analisi sezionale elastica

La forza di scorrimento su ogni fila di connettori vale :

$$F_c = \tau b i_p^l = \frac{(V_S + V_D)}{2} \frac{S}{I} i_p^l$$

dove :

- S momento statico della parte di sezione al di sopra del piano di connessione rispetto al baricentro della sezione reagente omogenizzata
- I momento d'inertia della sezione rispetto al baricentro della sezione reagente omogenizzata

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo elastico della forza di scorrimento

Analisi sezionale elastica

Nota ! La forza di scorrimento non deve essere calcolata sulla base del diagramma del taglio risultante da una combinazione di carichi.

La forza di scorrimento va calcolata come combinazione (**attenzione ai segni dei contributi**) delle forze di scorrimento risultanti dalle singole condizioni di carico

Motivi :

- Il coefficiente di omogeneizzazione è diverso per le diverse condizioni di carico
- Negli schemi statici con sola trave in acciaio (cls della soletta non indurito) esiste il taglio verticale nella trave ma non il taglio longitudinale tra soletta e trave in acciaio

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo elastico della forza di scorrimento

Analisi sezionale elastica

Nota ! La forza di scorrimento va calcolata con riferimento alle proprietà elastiche della sezione non fessurata, anche laddove è stata considerata la fessurazione del calcestruzzo nell'analisi globale.

Nota ! La forza di scorrimento va calcolata su conci della trave di limitata lunghezza se la trave è a sezione variabile.

(ovvero, se la trave è a sezione variabile il diagramma del taglio non è proporzionale a quello della forza di scorrimento)

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo plastico della forza di scorrimento

Analisi sezionale plastica e connessioni a taglio complete,

la forza di scorrimento (a metro lineare) con cui progettare la connessione tra la sezione di massimo momento positivo e un appoggio di estremità è :

$$V_{ld} = \min \left\{ \frac{f_{yk} A_a}{\gamma_a} ; \frac{0.85 f_{ck} A_c}{\gamma_c} + \frac{A_{se} f_{sk}}{\gamma_s} \right\}$$

dove :

A_a area del profilo in acciaio

A_c area della soletta di calcestruzzo

A_{se} area dell'armatura compressa

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo plastico della forza di scorrimento

Analisi sezionale plastica e connessioni a taglio complete,

la forza di scorrimento (a metro lineare) tra la sezione di minimo momento negativo e quella di massimo momento flettente (appoggio intermedio e campata) vale :

$$V_{ld} = \min \left\{ \frac{f_{yk} A_a}{\gamma_a}; \frac{0.85 f_{ck} A_c}{\gamma_c} + \frac{A_{se} f_{sk}}{\gamma_s} \right\} + \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_s} + \frac{A_{ap} f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

dove :

A_a area del profilo in acciaio

A_c area della soletta di calcestruzzo

A_{se} area dell'armatura compressa

A_{ap} area della lamiera grecata

(solo se è dimostrata la sua efficacia)

A_s area dell'armatura in soletta

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo plastico della forza di scorrimento

Analisi sezionale plastica e connessioni a taglio parziali,

la forza di scorrimento (a metro lineare) tra la sezione di massimo momento positivo e un appoggio di estremità è :

$$V_{ld} = \frac{(M_{Ed} - M_{a,pl,Rd})}{(M_{pl,Rd} - M_{a,pl,Rd})} \cdot \min \left\{ \frac{f_{yk} A_a}{\gamma_a}; \frac{0.85 f_{ck} A_c}{\gamma_c} + \frac{A_{se} f_{sk}}{\gamma_s} \right\}$$

dove :

A_a area del profilo in acciaio

A_c area della soletta di calcestruzzo

A_{se} area dell'armatura compressa

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Calcolo plastico della forza di scorrimento

Analisi sezionale plastica e connessioni a taglio parziali,

la forza di scorrimento (a metro lineare) tra la sezione di minimo momento negativo e quella di massimo momento flettente è :

$$V_{ld} = \frac{(M_{Ed} - M_{a,pl,Rd})}{(M_{pl,Rd} - M_{a,pl,Rd})} \cdot \min \left\{ \frac{f_{yk} A_a}{\gamma_a}; \frac{0.85 f_{ck} A_c}{\gamma_c} + \frac{A_{se} f_{sk}}{\gamma_s} \right\} + \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_s} + \frac{A_{ap} f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

dove :

A_a area del profilo in acciaio

A_{ap} area della lamiera grecata

A_c area della soletta di calcestruzzo

(solo se è dimostrata la sua efficacia)

A_{se} area dell'armatura compressa

A_s area dell'armatura in soletta

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

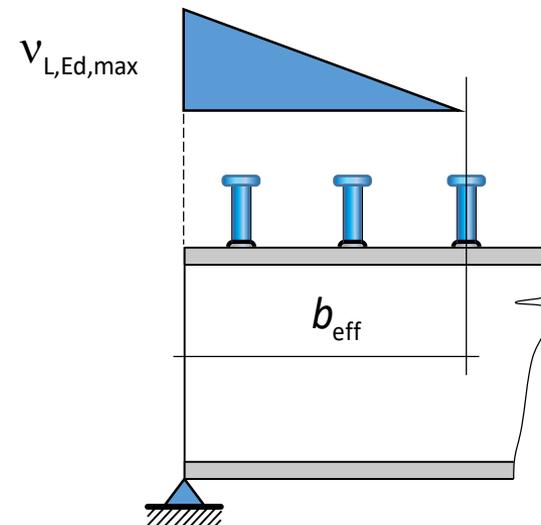
Effetti locali

Quando gli effetti primari da temperatura e ritiro causano una forza di taglio longitudinale $V_{L,Ed}$ da trasferirsi all'interfaccia tra acciaio e calcestruzzo ad un'estremità libera della membratura,

la distribuzione di tali forze di taglio può essere assunta triangolare, con massima forza di taglio longit. per unità di lunghezza $v_{L,Ed,max}$:

$$v_{L,Ed,max} = \frac{2V_{L,Ed}}{b_{eff}}$$

Nota: se si utilizzano pioli tipo Nelson, la distribuzione di tali forze di taglio allo stato limite ultimo può essere anche assunta rettangolare.



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenza dei pioli in soletta piena

La resistenza ultima di calcolo a taglio (SLU)
è pari al minimo tra i seguenti valori :

$$P_{Rd,a} = 0.8 f_t (\pi d^2 / 4) / \gamma_v$$

$$P_{Rd,c} = 0.29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_c} / \gamma_v$$

dove :

d diametro del gambo del piolo ($16 \leq d \leq 25$ mm)

γ_v = 1.25 fattore parziale di sicurezza del materiale

f_t ≤ 500 MPa resistenza a rottura dell'acciaio del piolo

α 0.2 ($h_{sc}/d+1$) per $3 \leq h_{sc}/d \leq 4$

1.0 per $h_{sc}/d > 4$

h_{sc} altezza del piolo dopo la saldatura ≥ 3 volte il diametro del gambo

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenza dei pioli in soletta piena

Resistenza ultima di calcolo (SLU) P_{Rd} (kN)

Diametro piolo d (mm)	Altezza minima h_{sc} (mm)	$f_u=450$ MPa e da C30/37 a C60/75 (crisi gambo)	$f_u=500$ MPa	
			C30/37 (crisi calcestruzzo)	da C35/45 a C60/75 (crisi gambo)
25	100	141.30	144.27	157.00
22	88	109.42	111.73	121.58
19	76	81.61	83.33	90.68
16	64	57.88	59.09	64.31

Nota: la tabella vale per $h_{sc}/d \geq 4$

Nota !

La resistenza di calcolo a taglio (SLE) $P_{Rd,ser}$ è uguale a $0.60 P_{Rd}$

Nota : la modalità di rottura è meno duttile nel caso di calcestruzzo di classe di resistenza bassa (vedi tabella)

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

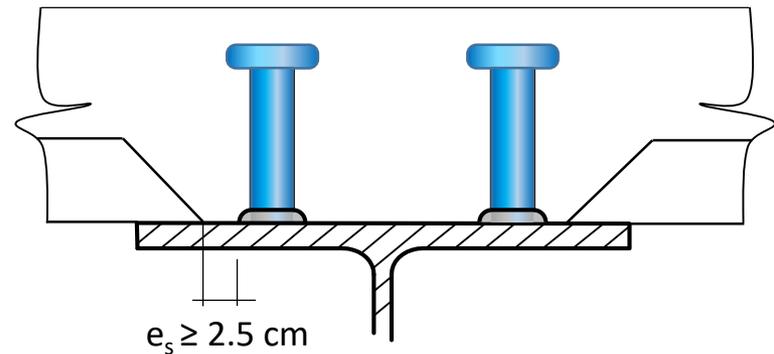
Resistenza dei pioli in soletta parzialmente prefabbricata

Se la forza di trazione sul piolo è inferiore al 10% della sua resistenza a taglio, la forza di trazione può essere ignorata.

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

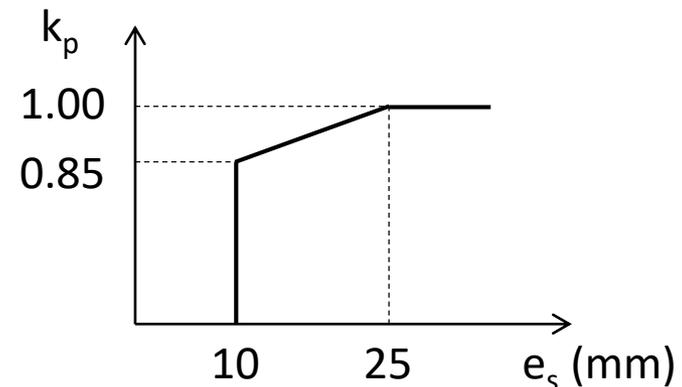
Resistenza dei pioli in soletta parzialmente prefabbricata

In caso di solette parzialmente prefabbricate, la distanza tra connettori e lastre prefabbricate deve essere tale da consentire al calcestruzzo di avvolgere appieno i connettori.



Se tale distanza è inferiore a 2.5 cm, è opportuno introdurre un coefficiente riduttivo k_p nel calcolo della resistenza della connessione :

$$P_{Rd} = k_p \cdot \min \{ P_{Rd,a}; P_{Rd,c} \}$$



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenza dei pioli in soletta con lamiera grecata

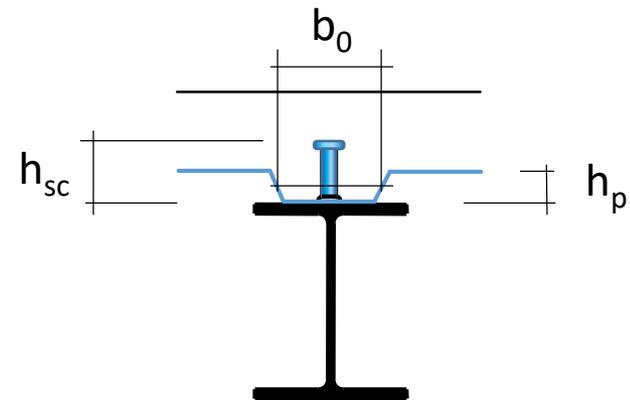
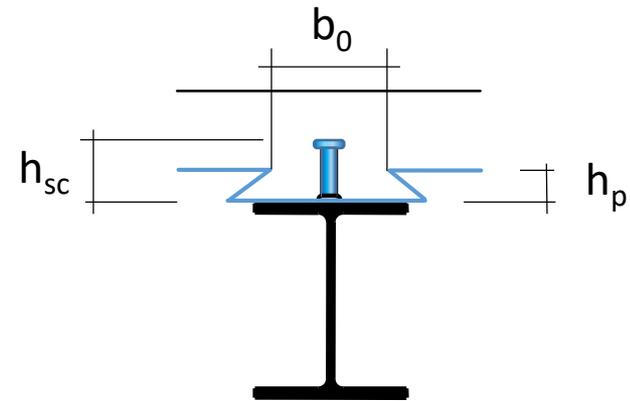
Per lamiera disposta con le greche parallelamente all'asse del profilo, la resistenza di calcolo a taglio è moltiplicata per il valore :

$$k_1 = 0.6 \frac{b_0 (h_{sc} - h_p)}{h_p^2} \leq 1.0$$

dove :

h_{sc} altezza del piolo dopo la saldatura
< $h_p + 75$ mm

h_p altezza lamiera grecata



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenza dei pioli in soletta con lamiera grecata

Per lamiera disposta con le greche ortogonalmente all'asse del profilo, la resistenza di calcolo a taglio è moltiplicata per il valore :

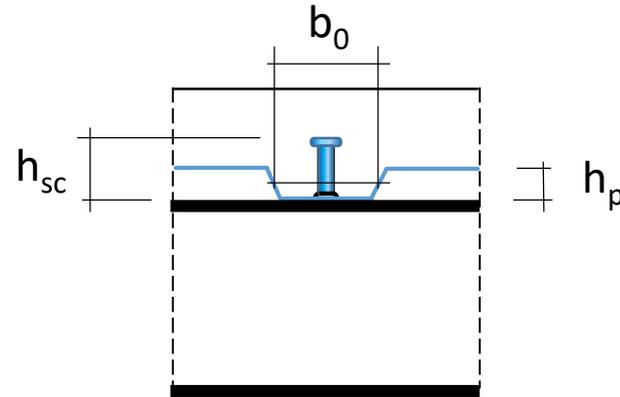
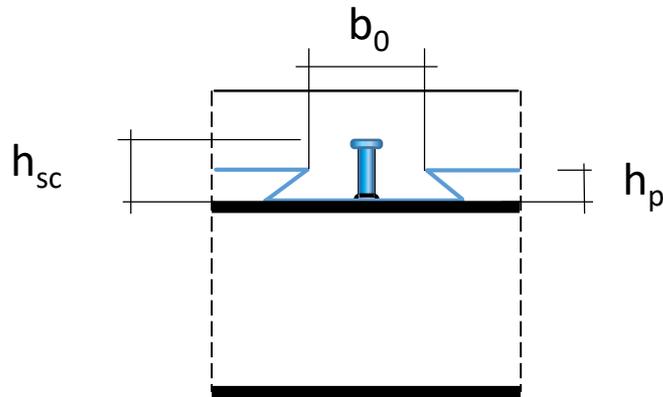
$$k_t = 0.7 \frac{b_0 (h_{sc} - h_p)}{h_p^2} \frac{1}{\sqrt{n_r}}$$

Valido se : $h_p \leq 85 \text{ mm}$ e $b_0 \leq h_p$

Connettori di diametro massimo pari a 20 mm nel caso di saldatura attraverso la lamiera e pari a 22 mm nel caso di lamiera forata

dove :

n_r numero dei pioli posti dentro ogni greca



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenza dei pioli in soletta con lamiera grecata

Per lamiera disposta con le greche ortogonalmente all'asse del profilo, la resistenza di calcolo a taglio è moltiplicata per il valore :

$$k_t = 0.7 \frac{b_0 (h_{sc} - h_p)}{h_p^2} \frac{1}{\sqrt{n_r}}$$

Limiti superiori del coefficiente k_t

n_r	Spessore della lamiera	Connettori con $\phi \leq 20$ e saldati attraverso la lamiera	Lamiera con fori e pioli saldati sul profilo – $\phi = 19$ o 22 mm
1	≤ 1.0	0.85	0.75
	> 1.0	1.00	0.75
2	≤ 1.0	0.70	0.60
	> 1.0	0.80	0.60

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenza dei pioli in soletta con lamiera grecata

Quando i connettori a taglio sono simultaneamente considerati efficaci per due elementi ortogonali si deve considerare la combinazione delle forze di connessione provenienti dai due elementi strutturali

$$\frac{F_l^2}{P_{l,Rd}^2} + \frac{F_t^2}{P_{t,Rd}^2} \leq 1.0$$

dove :

F_l azione longitudinale di progetto derivante dall'elemento principale

F_t azione trasversale di progetto derivante dall'elemento secondario

$P_{l,Rd}$ resistenza a taglio del connettore nella direzione longitudinale

$P_{t,Rd}$ resistenza a taglio del connettore nella direzione trasversale

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Spaziatura minima dei pioli

In direzione parallela
alla forza di scorrimento,
l'interasse minimo $i_{p,min}^l$ dei pioli
deve essere :

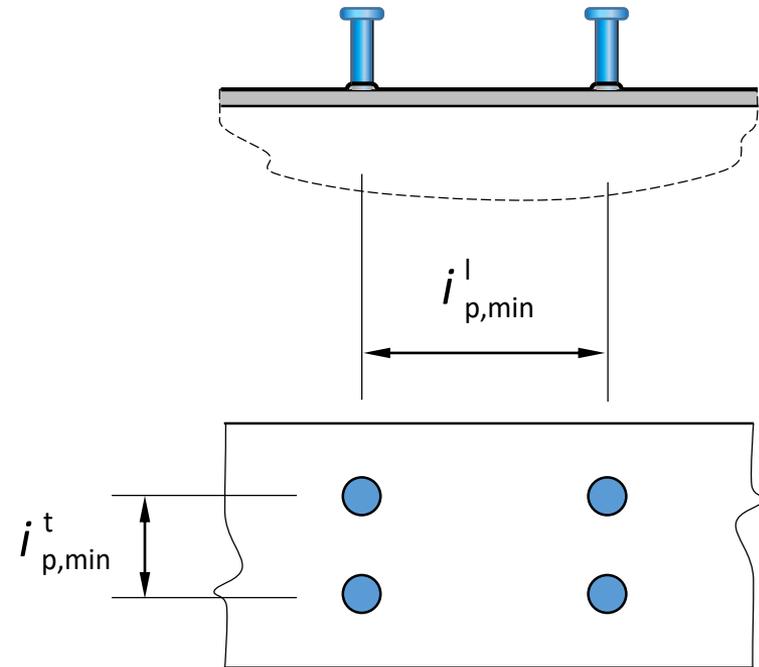
$$i_{p,min}^l \geq 5.0d$$

(d=diametro del gambo del connettore)

In direzione ortogonale
alla forza di scorrimento,
l'interasse minimo $i_{p,min}^t$ dei pioli
deve essere :

$$i_{p,min}^t \geq 2.5d \quad (\text{solette in cls piene})$$

$$\geq 4.0d \quad (\text{altri tipi di soletta})$$



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Spaziatura massima dei pioli

La spaziatura massima $i_{p,max}$ dei pioli deve essere pari a :

$$22 t_f \sqrt{235/f_{yk}}$$

travi collaboranti con solette piene
o gettate su lamiera con greche parallele all'asse della trave

$$15 t_f \sqrt{235/f_{yk}}$$

travi collaboranti con solette gettate su lamiera
con greche ortogonali all'asse della trave

dove :

t_f spessore della piattabanda del profilo

f_{yk} tensione di snervamento della piattabanda del profilo

In ogni caso, la spaziatura massima $i_{p,max}$ dei pioli deve essere :

- ≤ 800 mm
- ≤ 4 volte lo spessore della soletta

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

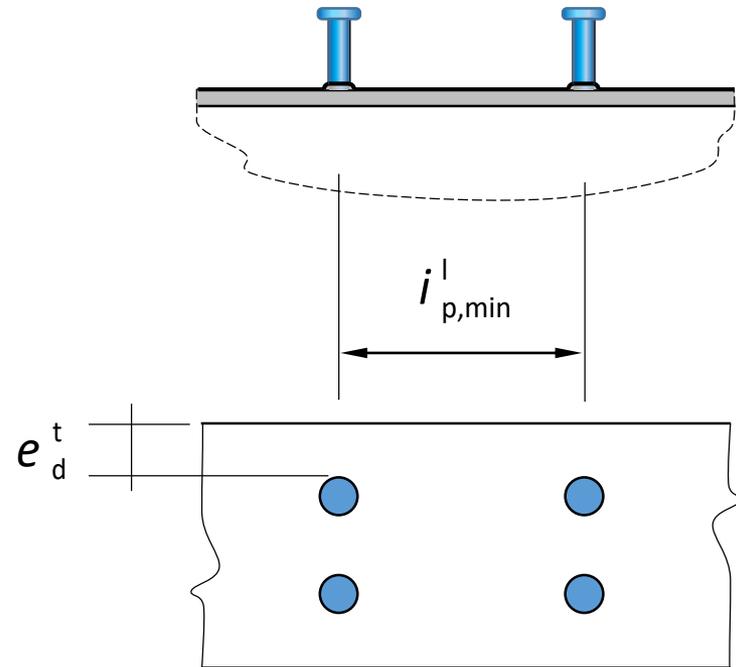
Distanza dei pioli dai bordi della flangia

La distanza minima $e_{d,min}^t$
tra il bordo dei pioli e il bordo della
flangia deve essere :

$$e_{d,min}^t \geq 2.0\text{cm} \quad (2.5\text{ cm nei ponti})$$

La distanza massima $e_{d,max}^t$
tra il bordo dei pioli e il bordo della
flangia deve essere :

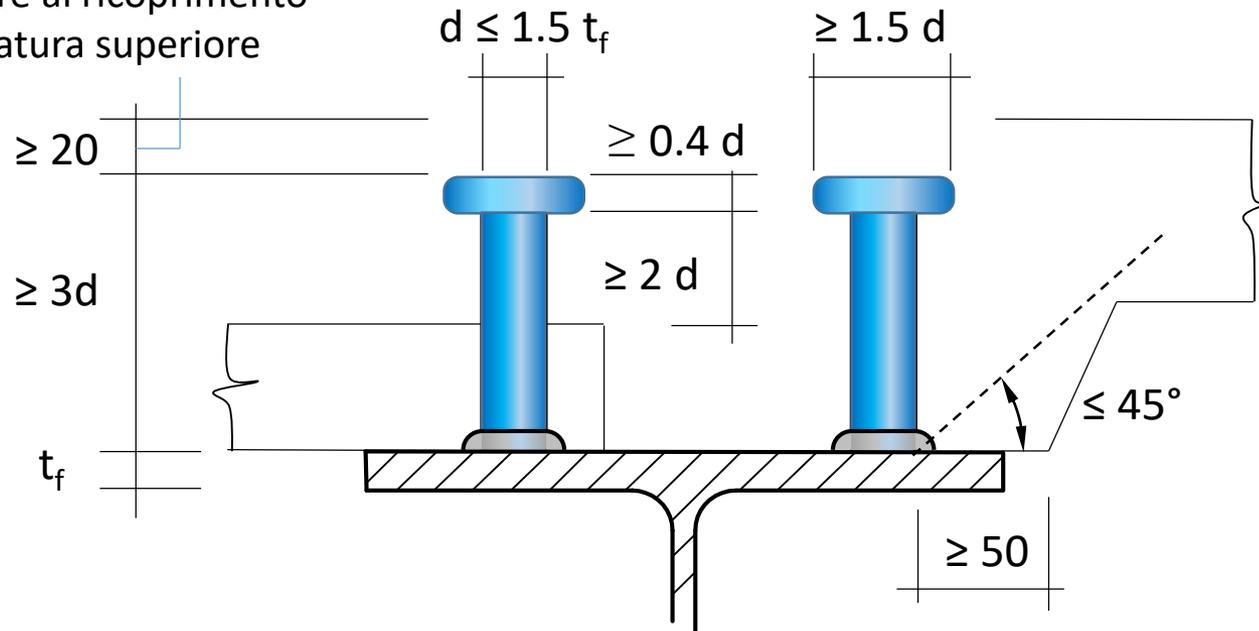
$$e_{d,max}^t \leq 9t_f \sqrt{235/f_y}$$



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

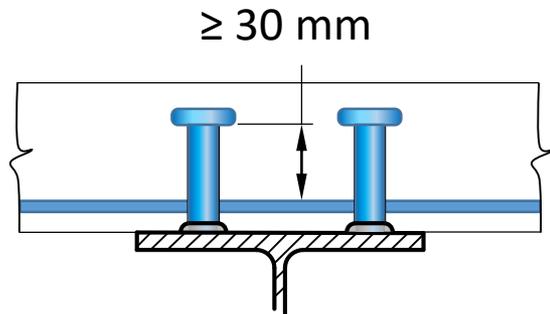
Dettagli costruttivi della connessione

non inferiore al ricoprimento
dell'armatura superiore

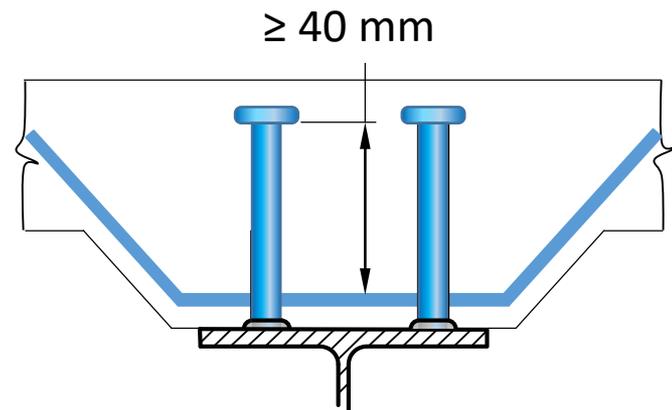


Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Dettagli costruttivi della connessione



Soletta piana



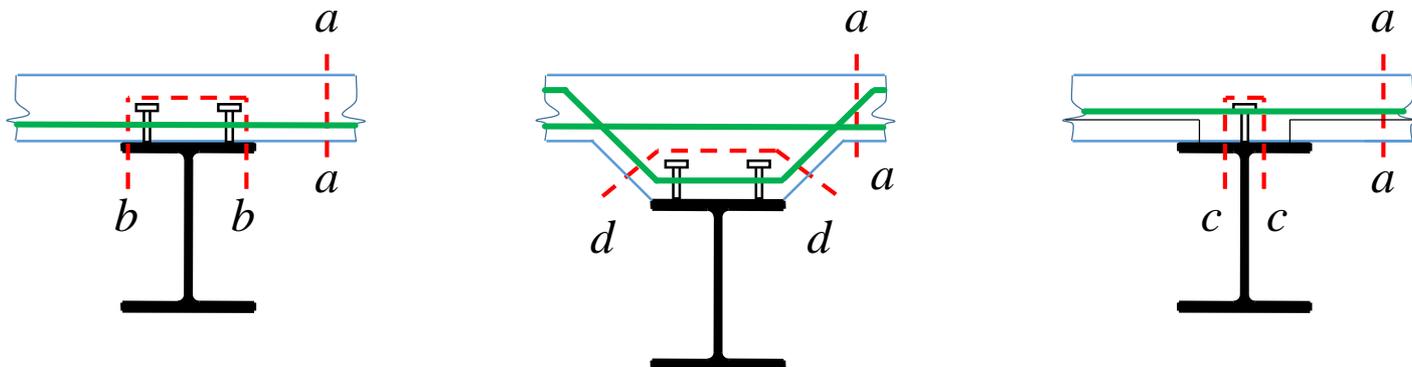
Soletta con svaso

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Verifica a taglio longitudinale

L'armatura trasversale deve essere progettata in modo tale da prevenire la rottura prematura per scorrimento o fessurazione longitudinale della soletta di calcestruzzo.

Per ogni tipo di superficie di taglio considerata, il valore di calcolo della tensione di taglio longitudinale dovrebbe essere determinata dal taglio longitudinale per unità di lunghezza della trave, tenendo conto del numero di piani di taglio e della lunghezza delle superfici di taglio.



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

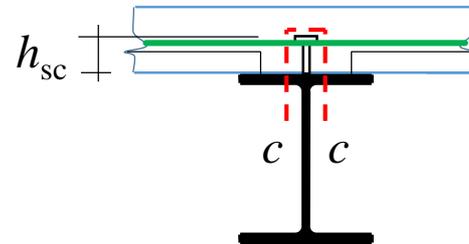
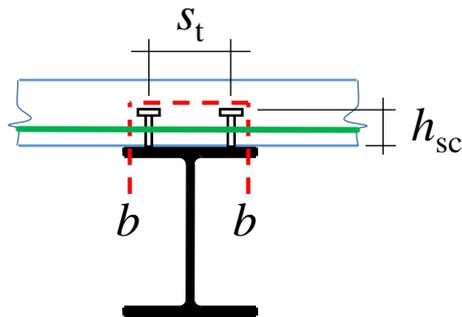
Verifica a taglio longitudinale

La lunghezza della superficie di taglio (b-b- e c-c- in figura) dovrebbe essere uguale a $2h_{sc}$ più il diametro della testa di un connettore se i connettori sono disposti su una singola fila longitudinale, o uguale a $(2h_{sc} + s_t)$ più il diametro di una testa di connettore se i connettori sono disposti su due file longitudinali,

essendo :

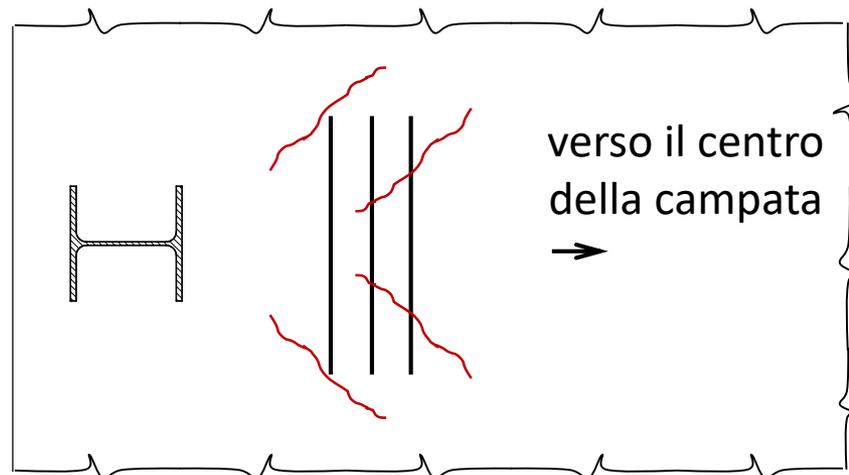
h_{sc} l'altezza del connettore

s_t la spaziatura trasversale dei connettori

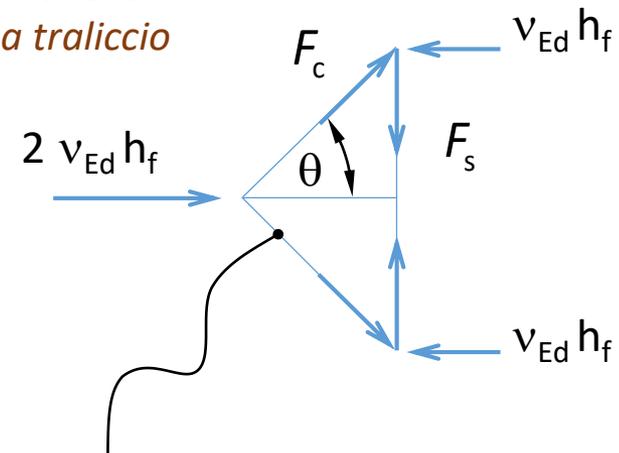


Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Armatura trasversale in solette piene



Modello
a traliccio



La larghezza del puntone per unità di lunghezza della trave è $\sin\theta$

dove :

$2 v_{Ed} h_f$ forza di scorrimento per unità di lunghezza della trave

F_c forza di compressione diagonale nel calcestruzzo $= F_v / \cos\theta = v_{Ed} h_f / \cos\theta$

F_s forza di trazione dell'armatura trasversale per unità di lunghezza della trave $= F_v \tan\theta = v_{Ed} h_f \tan\theta$

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Armatura trasversale in solette piene

Condizioni di crisi del meccanismo
di trasferimento della forza di scorrimento

Acciaio

$$\sigma_s = f_{yd} \quad \Rightarrow \quad F_{Rs} = f_{yd} \frac{A_{sf}}{s_f} = v_{Ed} h_f \tan \theta$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq f_{yd} \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta}$$

dove :

A_{sf}	area della singola barra trasversale	$1.0 \leq \cot \theta \leq 2.0$	solette compresse
s_f	passo delle barre trasversali	$1.0 \leq \cot \theta \leq 1.25$	solette tese
h_f	altezza della soletta		
v_{Ed}	tensione longitudinale		

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Armatura trasversale in solette piene

Condizioni di crisi del meccanismo
di trasferimento della forza di scorrimento

Calcestruzzo

$$\sigma_c = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \quad \Rightarrow \quad F_{Rc} = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} h_f \sin \theta = \frac{v_{Ed} h_f}{\cos \theta}$$

$$v_{Ed} \leq 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \sin \theta \cos \theta$$

dove :

f_{ck}	resist. caratt. a compressione del cls	$1.0 \leq \cot \theta \leq 2.0$	solette compresse
f_{cd}	resist. di progetto a compr. del cls	$1.0 \leq \cot \theta \leq 1.25$	solette tese
h_f	altezza della soletta		
v_{Ed}	tensione longitudinale		

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Armatura trasversale minima

Nel caso di taglio combinato a flessione trasversale, l'area delle barre in acciaio dovrebbe essere :

- maggiore di quella calcolata per taglio longitudinale oppure
- metà di quella calcolata per taglio longitudinale più quella richiesta per flessione trasversale.

Nota: Se la tensione di scorrimento v_{Ed} è minore di $0.4 f_{ctd}$, non è richiesta armatura aggiuntiva rispetto a quella per flessione trasversale

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Armatura trasversale in solette con lamiera grecata

Lamiera grecata parallela alla trave

- essa non può essere assunta efficace come armatura trasversale

Lamiera grecata ortogonale alla trave

- essa può essere assunta efficace come armatura trasversale se è continua sulla trave
- laddove questa non sia vero, l'area efficace della lamiera dipende da come essa è connessa alla flangia superiore della trave

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Armatura trasversale in solette con lamiera grecata

Se i connettori sono saldati attraverso la lamiera (non continua), la resistenza alla trazione trasversale è governata dalla plasticizzazione locale della lamiera attorno al connettore. In questo caso, lo scorrimento resistente è :

$$v_{L,Rds} = f_{yd} \frac{A_{sf}}{S_f} + P_{pb,Rd} / s$$

dove :

$$P_{pb,Rd} = k_{\varphi} d_{d0} t f_{yp,d}$$

essendo :

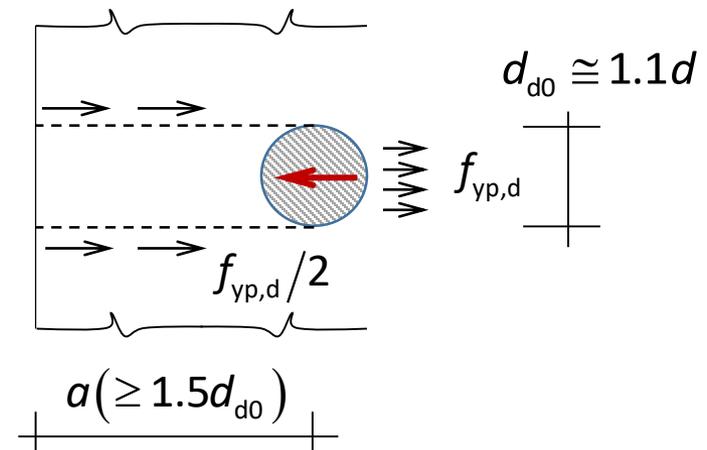
$$k_{\varphi} \quad 1 + a/d_{d0} \leq 6.0$$

d_{d0} diametro della saldatura

t spessore della lamiera

$f_{yp,d}$ tensione di snervamento della lamiera

s spaziatura longitudinale dei connettori



Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Stati limite di esercizio – limitazione delle tensioni

materiale	Combinazione	Limite di tensione	Valore raccomandato k
Acciaio strutt.	caratteristica	$\sigma_{Ed} \leq k_a f_{yk}$	$k_a = 1.00$
Barre acciaio	caratteristica	$\sigma_{Ed} \leq k_s f_{yk}$	$k_s = 0.80$
Calcestruzzo	caratteristica	$\sigma_{Ed} \leq k_c f_{ck}$	$k_c = 0.60$
Connettori	caratteristica	$P_{Ed} \leq k_s P_{Rd}$	$k_s = 0.75$

Principali riferimenti

- ❑ Norme Tecniche per le Costruzioni. D.M. 14 gennaio 2008 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30
- ❑ Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni. Circolare 2 febbraio 2009 pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009 - Suppl. Ordinario n. 27
- ❑ R.P. Johnson. Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns, and frames for buildings. Blackwell Publishing, 2004 (third edition). ISBN 1-4051-0035-4
- ❑ I. Vayas, A. Iliopoulos. Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes. CRC Press, 2013. ISBN 9781466557444

FINE