



TRAVI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO parte 1

Domenico Leone

fare sismica  **APPUNTI**

TRAVI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO parte 1

Domenico Leone

Il prof. Domenico Leone vanta un'esperienza più che trentennale nel campo della progettazione e realizzazione di strutture metalliche sia in campo industriale che infrastrutturale e civile ed è titolare del laboratorio di "Costruzione dell'Architettura" presso la facoltà di Architettura di Genova in qualità di professore a contratto.

E' consulente di azienda avendo occupato in precedenza il ruolo di Responsabile del settore di progettazione di opere in carpenteria metallica prima presso la Società Italimpianti S.p.A. e successivamente presso le Società SMSDemag e Paul-Wurth S.p.A.

Ha partecipato alla progettazione di grandi impianti industriali di produzione e trasformazione dell'acciaio e ne ha seguito la realizzazione con le imprese costruttrici e di montaggio acquisendo ampia esperienza in tutti i settori del ciclo di esecuzione delle opere metalliche.

Per il suo impegno in campo internazionale vanta ampia conoscenza delle norme di settore utilizzate in varie nazioni con particolare riguardo agli Eurocodici.

Ha esercitato ed esercita tuttora attività formativa in ambito Aziendale, Universitario, Pubblico, Privato e dell'Ordine Professionale.

È autore del libro "Eurocodice 3" edito da Sistemi Editoriali nonché di numerosi programmi di calcolo automatico dedicati sia alla progettazione di strutture in acciaio di impianti industriali che alla progettazione di componenti strutturali e di dettaglio proprie degli edifici civili e delle infrastrutture (pacchetto SAITU edito da STA DATA S.r.l.) in base agli Eurocodici ed alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

La presente pubblicazione è tutelata dalla legge sul diritto d'autore e non può essere divulgata senza il permesso scritto dell'autore.

S.T.A. DATA srl
Corso Raffaello, 12 - 10126 Torino
tel. 011 6699345 www.stadata.com

Indice

Parte I	TRAVI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO	4
----------------	--	----------

1 TRAVI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO

TRAVI COMPOSTE ACCIAIO-CALCESTRUZZO

INTRODUZIONE

In questo articolo viene presentato un esempio di calcolo eseguito passo-passo a mano ed in parallelo con il programma di calcolo automatico “TraveComp” di una trave di impalcato con soletta collaborante in base alla norma NTC 2008 ed alla norma europea EN 1994-1-1.

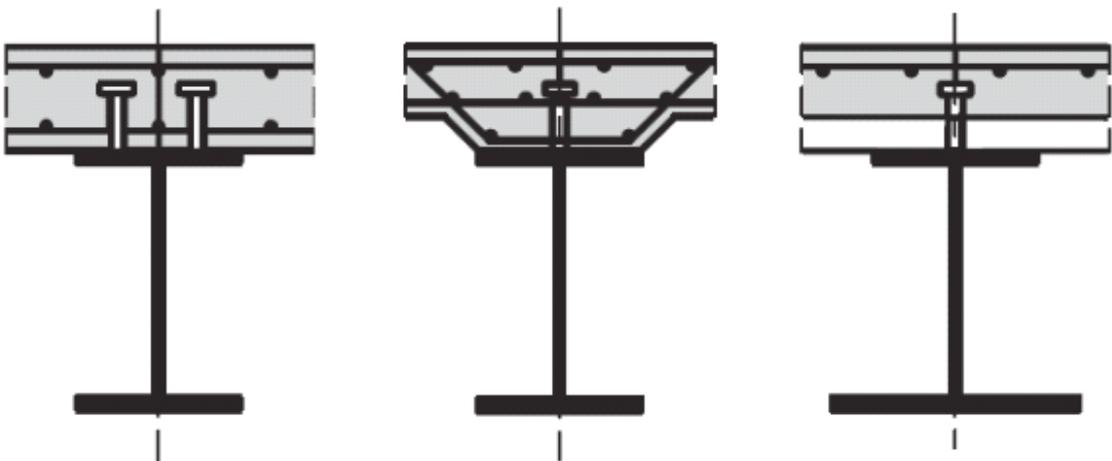
Diciamo subito che il quadro normativo di riferimento è più complesso poiché la stessa norma europea EN 1994-1-1 richiama altre norme per verifiche specifiche come la norma EN 1993-1-5 per le sezioni irrigidite di classe 4, la norma EN 1992-1-1 per le verifiche allo S.L.S., la norma EN 1991-1-6 per i carichi di progetto e più in generale la norma EN 1993-1-1 per le verifiche di resistenza e stabilità.

Progettare oggi strutture di questo tipo richiede quindi una vasta conoscenza del quadro normativo europeo poiché le fasi di realizzazione dell’opera richiedono il controllo primario della sola sezione di acciaio quando il calcestruzzo gettato non è ancora consolidato e successivamente il controllo della sezione composta sotto l’azione dei carichi permanenti e di esercizio.

Se inoltre fosse richiesta una verifica di resistenza al fuoco si dovrebbe fare riferimento anche alla norma EN 1994-1-2 ma non è il caso di questo esempio.

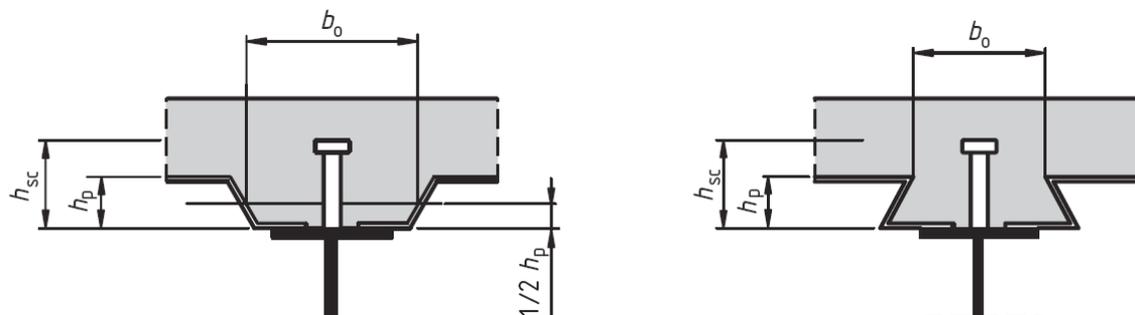
Alcuni cenni sul programma “TraveComp” da me realizzato ed edito da Stadata s.r.l.

Il programma esegue la verifica di resistenza e deformazione di elementi a sezione aperta mono-simmetrica, con anima irrigidita o no, inflessa nel piano principale, in base alle norme EN 1994-1-1 e NTC 2008 con richiami alle seguenti norme: EN 1993-1-5 ; EN 1993-1-1 ; EN 1992-1-1. La verifica di stabilità a presso-flessione e flessione-torsione, è eseguita solo per la fase iniziale di getto quando la soletta non è ancora solidarizzata alla trave. Il calcolo è eseguito nelle due fasi di costruzioni della trave ovvero nella fase di getto in cui la trave di acciaio sopporta il peso della soletta, del cassero collaborante o no e del carico di costruzione localizzato e nella fase consolidata in cui si ha la piena collaborazione trave-soletta. Le sollecitazioni sono calcolate automaticamente o possono essere fornite da input sia per combinazioni allo stato limite ultimo che per combinazioni allo stato limite di servizio nelle sezioni di momento massimo e di taglio massimo. Le sezioni tipiche sono di seguito rappresentate:



La soletta collaborante può essere a sezione piena con o senza rastremazione sulla

piattabanda della trave oppure realizzata con lamiera grecata solidale disposta sia longitudinalmente alla trave che trasversalmente. Il collegamento trave-soletta è realizzato per mezzo di pioli elettrosaldati disposti singolarmente oppure accoppiati o ancora in fila di 3 o più. Il passo è automaticamente calcolato in base ai criteri normativi tenendo conto anche della resistenza alla stabilità della piattabanda compressa della trave.



Lo schema statico di calcolo può variare dalla fase di getto alla fase finale a seconda che si esegua o meno il puntellamento della trave o sia prevista una continuità in fase finale. Le possibili combinazioni previste dal programma sono le seguenti:

- schema iniziale: appoggio semplice ; - schema finale: appoggio semplice
- schema iniziale: continuo su 3 appoggi ; - schema finale: appoggio semplice
o continuo su 3 appoggi
- schema iniziale: continuo su 4 appoggi ; - schema finale: appoggio semplice
o continuo su 4 appoggi
- schema iniziale: continuo su 5 appoggi ; - schema finale: appoggio semplice
o continuo su 3 appoggi
o continuo su 5 appoggi

Se le sollecitazioni sono definite da input è possibile eseguire il calcolo di verifica anche per elementi continui su luci diverse considerando la sezione di momento massimo e minimo rispettivamente nella campata e sull'appoggio maggiormente sollecitati.

Il programma esegue la classificazione della sezione sia per la fase iniziale che per la fase finale. Nella fase finale la piattabanda superiore viene fatta rientrare nella classe 1 per il collegamento efficace alla soletta. Vengono esaminate tutte le parti compresse dell'anima delimitate dagli irrigidimenti e vengono calcolati i moduli di resistenza con particolare attenzione alle sezioni di classe 4 la cui parte efficace è calcolata sviluppando i criteri della norma EN 1993-1-5 tenendo conto dell'instabilità laterale dell'anima irrigidita sia per comportamento a colonna che per comportamento a lastra seguendo il metodo approssimato.

Nel caso in cui la forza di taglio sia maggiore del 50% della resistenza plastica a taglio viene usata l'espressione del momento resistente ridotto sia per la presenza della forza assiale (se superiore al valore limite stabilito dalla norma per sezioni di classe ≤ 2) che della forza di taglio.

La verifica di stabilità a taglio del pannello d'anima irrigidita viene eseguita, nelle due fasi di costruzione, con il criterio di interazione definito al punto 7.1 della EN 1993-1-5

La verifica di stabilità flessione-torsionale nella fase iniziale può essere eseguita, a scelta, o

con il criterio della norma provvisoria ENV 1993-1-1 (più conservativo) o in base al criterio della norma ufficiale EN 1993-1-1 (più complesso ma ottimizzante) cui fanno riferimento le NTC 2008.

Il programma esegue la visualizzazione grafica della sezione lorda e parzializzata nella fase di getto

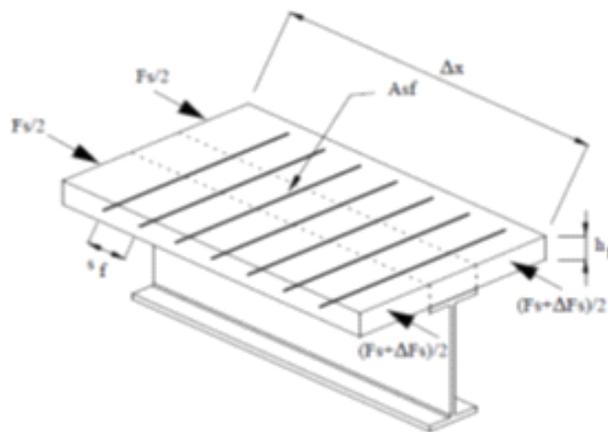
La verifica di resistenza in fase finale (soletta solidarizzata alla trave) viene eseguita dopo aver definito la geometria e le caratteristiche della soletta e dei pioli di connessione nonché la sezione e le caratteristiche delle barre di acciaio in zona tesa. Il calcolo può essere eseguito col metodo elastico per qualunque classe della sezione omogenea e/o col metodo plastico per le classi 1 e 2.

Col metodo elastico viene applicata la sovrapposizione degli effetti ovvero delle sollecitazioni calcolate per le due fasi allo S.L.U.. Col metodo plastico si fa riferimento all'intera sezione collaborante per la verifica di resistenza allo S.L.U. La verifica di deformazione per lo S.L.S è eseguita col metodo elastico considerando, per la fase finale di travi continue, la soletta fessurata oppure no.

E' possibile definire da input l'ampiezza delle fessure che condizionano anche la resistenza a snervamento delle barre di acciaio tese.

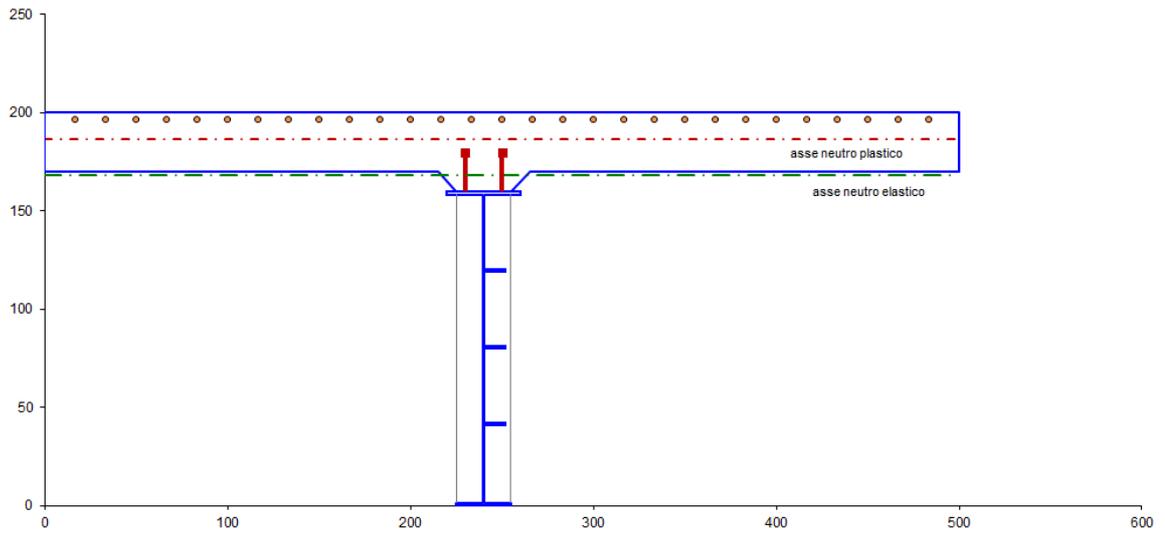
Il calcolo del numero dei pioli necessari a garantire la resistenza a scorrimento è eseguito sia col metodo elastico che col metodo plastico a completo ripristino. Può essere eseguito il calcolo dei pioli col metodo plastico a parziale ripristino solo per sezioni di classe 1 o 2.

Il programma consente anche di calcolare la necessaria armatura trasversale della soletta per la resistenza al taglio longitudinale trasmesso dai pioli.

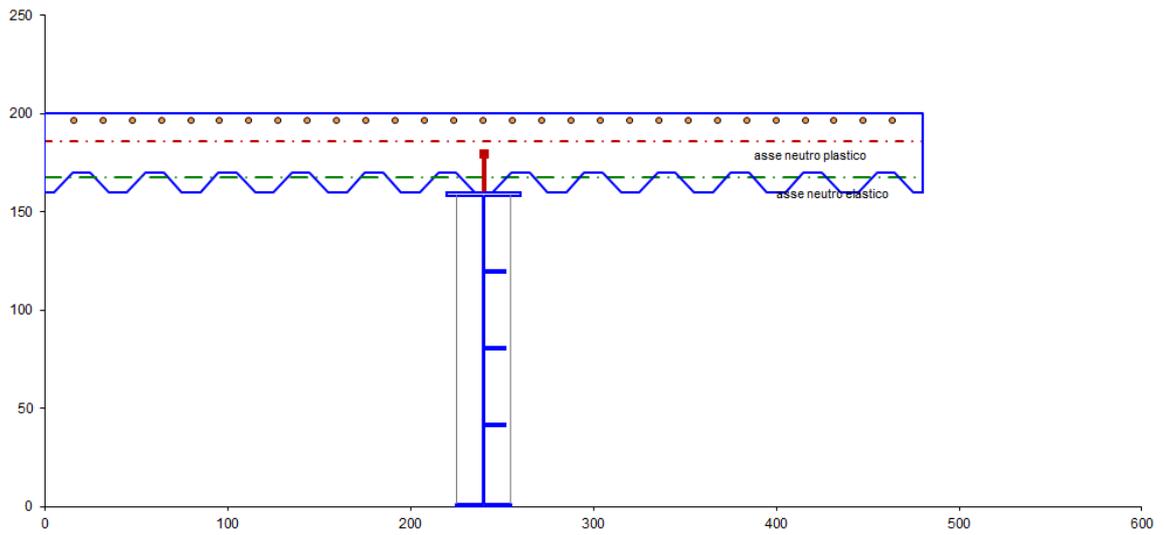


L'intera sezione con l'asse neutro elastico e plastico è automaticamente disegnata come di seguito rappresentato.

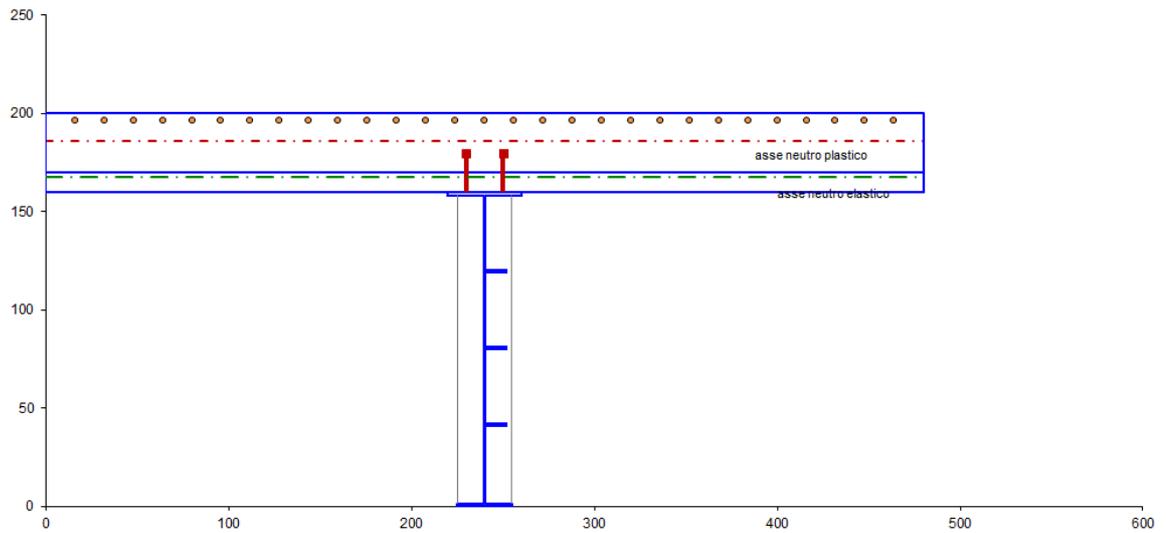
SEZIONE PIENA



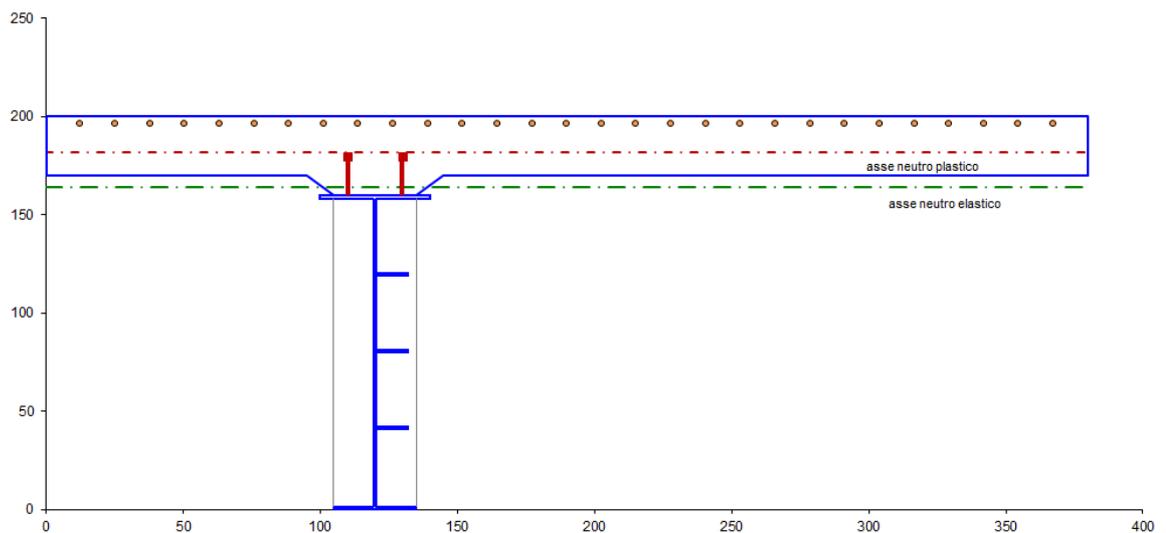
SEZIONE CON GRECA LONGITUDINALE



SEZIONE CON GRECA TRASVERSALE

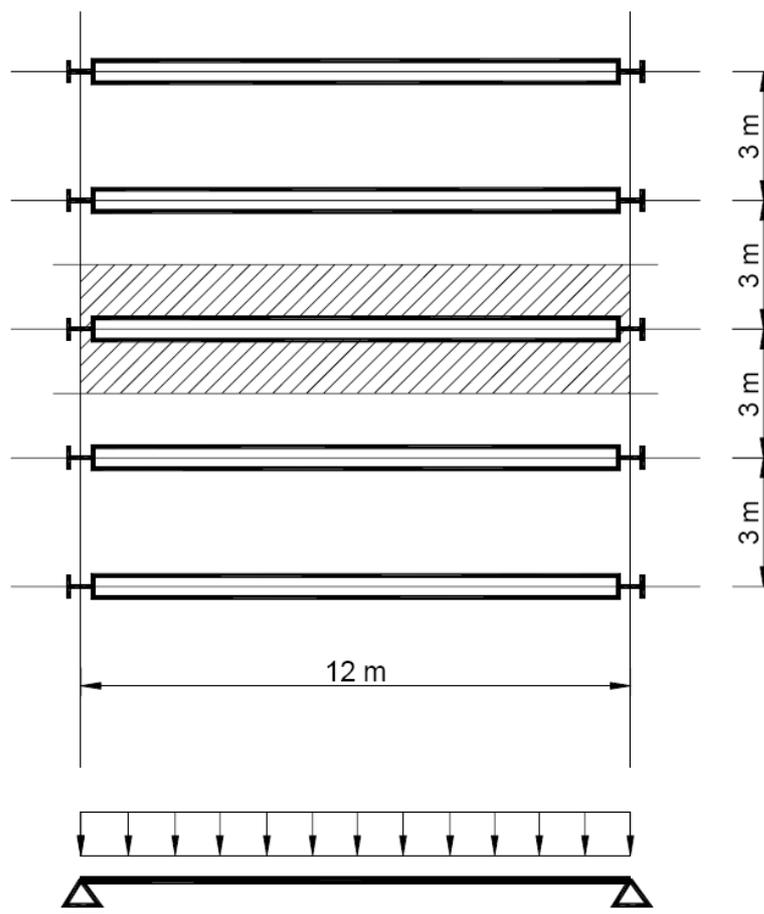


La soletta può essere dissimmetrica rispetto all'asse della trave ed il programma visualizza tale situazione (travi di estremità).



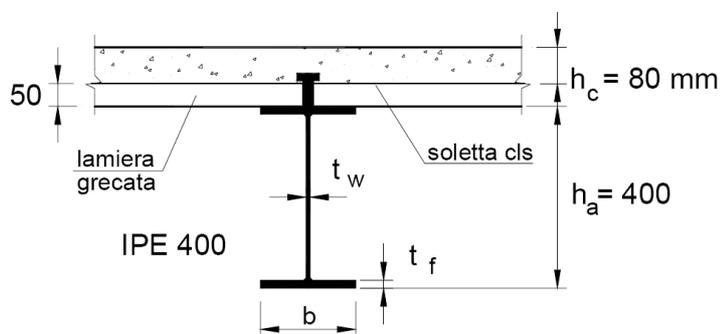
ESEMPIO DI CALCOLO :

La trave composta fa parte di un solaio oggetto del corso “ESDEP WG 10 : Composite construction – worked example 10.1”



Pianta del solaio con travi in acciaio composte semplicemente appoggiate

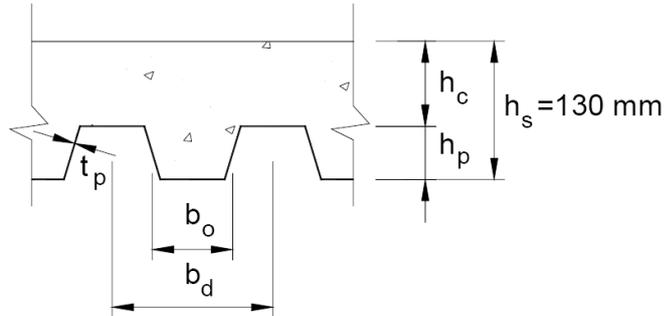
Sezione trasversale della trave composta :

**Materiali :**

- Calcestruzzo alleggerito classe 1,8 ; peso specifico $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ - resistenza C 25/30

- Acciaio per armature : $f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2$
- Acciaio per trave : S 355 EN 10025
- Acciaio per lamiera grecata Fe E 280 GD – $f_{yp} = 355 \text{ N/mm}^2$
- Connettori a piolo (tipo Nelson) : $f_u = 450 \text{ N/mm}^2$

Caratteristiche della soletta :



- Altezza totale della soletta : $h_s = 130 \text{ mm}$
- Altezza della lamiera : $h_p = 50 \text{ mm}$
- Interasse greche : $b_d = 150 \text{ mm}$
- Larghezza media della greca : $b_0 = 75 \text{ mm}$
- Area della greca per u.l. : $A_p = 14,12 \text{ cm}^2/\text{m}$

Carichi di progetto :

fase di costruzione :

- Azioni permanenti riferite alla fascia di carico di 3 m
 - Calcestruzzo e lamiera grecata : $6,12 \text{ kN/m}$
 - P.p. trave IPE 400 : $0,66 \text{ kN/m}$
- Carico variabile di costruzione

L'esempio di riferimento considera il carico distribuito di $1,5 \text{ kN/m}^2$ su un'area di $3 \times 3 \text{ m}^2$ come un carico concentrato nella mezzaria della trave di $13,5 \text{ kN}$ ($1,5 \times 3 \times 3$) trascurando il carico uniforme sulla restante area pari a $0,75 \text{ kN/m}^2$. Data la grande aleatorietà di questo carico e per ottenere sollecitazioni prossime a quelle dell'esempio di riferimento il sottoscritto considera un carico di costruzione pari a $0,75 \text{ kN/m}^2$ uniformemente distribuito su tutta la lunghezza della trave ($0,75 \times 3 \times 12 = 27 \text{ kN}$).

- Carico di costruzione : 2,25 kN/m

fase finale consolidata :

- Azioni permanenti aggiuntive riferite alla fascia di 3 m
 - Controsoffitto : 1,5 kN/m
- Carichi variabili
 - Sovraccarico di esercizio : 15 kN/m (5 kN/m² x 3 m)
 - Tramezzature : 3 kN/m (1 kN/m² x 3 m)

Coefficienti di sicurezza :

per le azioni :

- $\gamma_G = 1,35$
- $\gamma_Q = 1,5$

per i materiali :

- $\gamma_a = 1,1$
- $\gamma_c = 1,5$
- $\gamma_s = 1,15$

Verifica in fase di costruzione :

la soletta non è collaborante e la trave di acciaio è verificata in base alla norma EN 1993-1-1 e 1993-1-5.

A differenza dell'esempio di riferimento viene eseguita anche la verifica di stabilità non considerando efficace ai fini della stabilità torsionale il collegamento alla lamiera grecata anche in considerazione della deformazione che la lamiera grecata subisce durante la stesura del getto di calcestruzzo.

Condizioni di carico e dati fondamentali sono riportati nella seguente parte del foglio di calcolo iniziale del programma "TraveComp"

Si noti la definizione del tipo di azione variabile come sovraccarico quasi permanente per la verifica allo S.L.S. con riferimento ad una combinazione di tipo frequente per una categoria D della costruzione.

Questa definizione non compare nell'esempio di riferimento che considera per il calcolo della freccia il 100% dell'azione variabile in fase finale anziché il 60% .

Lo schema di carico in fase di costruzione è graficizzato dal programma che considera una distribuzione a "scacchiera" del carico per travi continue su più appoggi :



		acciaio		calcestruzzo			
MODULO DI ELASTICITA'	E =	210000		20752		N/mm ²	
LARGHEZZA FASCIA DI CARICO	B =	3,00		interasse travi		m	
DISTANZA TRA GLI APPOGGI	L =	INIZIALE 12,00		FINALE 12,00		m	
CARICHI PERMANENTI INIZIALI / m	g =	2,045	kN/m ²	9,03	kN/m	CARICHI AGGIUNTIVI	
CARICHI PERMANENTI FINALI / m	p =	2,045	kN/m ²	8,28	kN/m	p.g = 0,75 kN/m ²	
CARICO VARIABILE UNIFORME / m	q =	6	kN/m ²	18,00	kN/m	p.p = 0,50 kN/m ²	
FRECCIA AMMISSIBILE	L / f _a =	INIZIALE 300		FINALE 250			
SCHEMA STATICO INIZIALE	elemento	appoggiato					
SCHEMA STATICO FINALE	elemento	appoggiato					
		iniziale		finale			
ASCISSA DI RIFERIMENTO max M	X =	6,00		6,00		m	

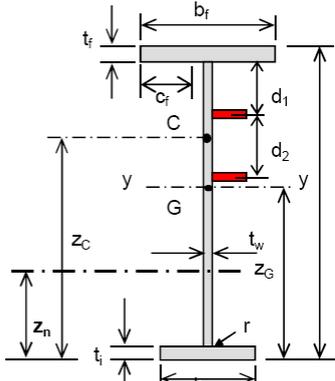
		S.L.U.			S.L.S.		
		$S_{Ed} = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot [\psi \cdot Q]$					
	$\gamma_G =$	1,35	$\gamma_Q =$	1,5	$\psi =$	1	
	$\gamma_G =$	1	$\gamma_Q =$	1	$\psi =$	1	
		fattore di comb. per azioni variabili per lo S.L.S.					
		sovraccarico quasi permanente		Categoria D		$\psi_i =$	0,6

SCHEMA DI CALCOLO

Il calcolo automatico delle sollecitazioni produce i seguenti risultati :

SOLLECITAZIONI PER LO STATO LIMITE ULTIMO							calcolo automatico ▼	
REAZIONI - MOMENTI - TAGLI		CARICHI INIZIALI		u.m.	CARICHI FINALI		u.m.	
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A =$	75,15		kN	229,05		kN	
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B =$	75,15		kN	229,05		kN	
SEZIONE DI RIFERIMENTO		CAMPATA	APPOGGIO		CAMPATA	APPOGGIO		
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y =$	22544	0	kNcm	68714	0	kNcm	
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} =$	0,00	75,15	kN	0,00	229,05	kN	
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} =$	0,00	75,15	kN	0,00	229,05	kN	
SOLLECITAZIONI PER TEORIA ELASTICA		CARICHI PERMANENTI PER S.L.S.			CARICHI PERM. E VARIABILI PER S.L.U.			
REAZIONI - MOMENTI - TAGLI		CARICHI INIZIALI		u.m.	CARICHI FINALI		u.m.	
REAZIONE APPOGGIO A	$R_A =$	40,66		kN	229,05		kN	
REAZIONE APPOGGIO B	$R_B =$	40,66		kN	229,05		kN	
SEZIONE DI RIFERIMENTO		CAMPATA	APPOGGIO		CAMPATA	APPOGGIO		
MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y =$	12199	0	kNcm	68714	0	kNcm	
TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} =$	0,00	40,66	kN	0,00	229,05	kN	
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} =$	0,00	40,66	kN	0,00	229,05	kN	

Le caratteristiche geometriche della trave e la sua classificazione sono eseguite automaticamente e riportate nel seguente foglio di calcolo

FASE INIZIALE DI COSTRUZIONE - SOLETTA NON COLLABORANTE - SEZIONE IN CAMPATA (sezione a I o T simmetrica rispetto al piano di flessione - piattabanda superiore compressa)					
METODO DI CALCOLO IN ACCORDO CON EN 1994-1-1 ; EN 1993-1-5 ; NTC 2008					
MATERIALE TRAVE :	acciaio tipo S 355	EN 10025	$f_y = 35,50$	kN/cm ²	$\epsilon = 0,81$
TIPO DI SEZIONE :	sezione in profilo laminato	profilo a I o H mono o bi-simmetrico	$\gamma_{MO} =$		1,1
				resistenza	stabilità
SOLLECITAZIONI DI PROGETTO :		Momento flettente :	$M_{Ed} =$	kNcm	22544
effetti dovuti ai carichi agenti sulla trave (oltre al p.p.) durante la fase di costruzione		Taglio congruente :	$V_{Ed} =$	kN	0,00
		Compress. assiale :	$N_{Ed} =$	kN	0
CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE (I o T) :					
		Altezza totale in campata	$h =$ cm	40	
		Larghezza piattabanda superiore	$b_f =$ cm	18	
		Larghezza piattabanda inferiore	$b_i =$ cm	18	
		Spessore anima	$t_w =$ cm	0,86	
		Spessore piattabanda superiore	$t_f =$ cm	1,35	
		Spessore piattabanda inferiore	$t_i =$ cm	1,35	
		Raccordo anima-piattabanda	$r =$ cm	2,1	
		Altezza netta dell'anima	$d =$ cm	37,3	
		Sporgenza dell'ala superiore	$c_f =$ cm	6,47	
		Sporgenza dell'ala inferiore	$c_i =$ cm	6,47	
		Area della sezione irrigidita	$A =$ cm ²	81,84	
		Posizione asse baricentrico	$z_c =$ cm	20,00	
		Posizione asse neutro plastico	$z_n =$ cm	20,00	
		Posizione a.n.p. per flessione pura	$d_z =$ cm	20,00	
		Posizione centro di taglio	$z_G =$ cm	20,00	
		Momento di inerzia max.	$J_y =$ cm ⁴	22288	
		Momento di inerzia min.	$J_z =$ cm ⁴	1312	
		Momento di inerzia torsionale	$J_t =$ cm ⁴	38	
		Modulo di res. esterno piattab. sup.	$W_{ys} =$ cm ³	1114	
		Modulo di res. esterno piattab. inf.	$W_{yi} =$ cm ³	1114	
		Modulo di res. interno piattab. sup.	$W_{yas} =$ cm ³	1195	
		Modulo di res. interno piattab. inf.	$W_{yai} =$ cm ³	1195	
		Modulo di res. min. = MIN (W_{ys} , W_{yi})	$W_{el,min} =$ cm ³	1114	
		Modulo di resistenza plastico	$W_{pl} =$ cm ³	1260	
Anima irrigidita ?		<input checked="" type="checkbox"/> N	N° irrigid.	<input type="text" value=""/>	≤ 4
CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE					
Larghezza/spessore :		Anima	$d/t_w =$	38,49	$\alpha_y = 0,500$
		Piattabande	$c/t =$	4,79	$\psi_y = -1,000$
asse neutro el. = cm 20,000			$\alpha_d =$	0,500	
			$\phi_d =$	-1,000	
			$c_\psi =$	1,000	
Limite larghezza/spessore anima :		classe 1	58,58		
		classe 2	67,45		
		classe 3	100,89		
		$k_G =$			
					classe dell'anima
					1
Limite larghezza/spessore piattab.		classe 1	7,32		
		classe 2	8,14		
		classe 3	11,39		
					classe piattabanda
					1
CLASSE SEZIONE 1					

Si noti la possibilità di considerare sezioni con anima irrigidita offerta dal programma semplicemente rispondendo "Y" alla domanda "anima irrigidita ?" e definendo il numero e il passo

degli irrigidimenti.

Le tensioni limite su ciascun pannello d'anima sono calcolate sia per un comportamento elastico che per un comportamento plastico della sezione controllando per ciascuna parte compressa il rapporto larghezza / spessore.

Nel caso dell'esempio l'anima non è irrigidita e la classificazione è eseguita controllando i rapporti larghezza/spessore delle parti sporgenti della piattabanda superiore e dell'anima.

La sezione è di classe 1 (comportamento plastico) e quindi il calcolo della sezione composta può essere eseguito sia col metodo plastico che col metodo elastico. Vedremo nel seguito la profonda differenza.

Verifica di resistenza allo S.L.U. :

L'esempio di riferimento si limita a controllare che il momento resistente plastico sia superiore al momento di progetto avendo accertato che il taglio di progetto è inferiore al 50% della resistenza a taglio della sezione .

$$V_{sd} = (1.35 \cdot 6.78) \cdot 12/2 + (1.50 \cdot 13.5) / 2 = 65 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_a = 1.04 \cdot h \cdot t_w \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_a =$$

$$= 1.04 \cdot 400 \cdot 8.6 \cdot (355 / \sqrt{3}) \cdot 10^{-3} / 1.10 = 667 \text{ kN} .$$

$$M_{sd} = (1.35 \cdot 6.78) \cdot 12^2/8 + (1.5 \cdot 13.5) \cdot 12/4 = 226 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,a,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_a = 1307 \cdot 10^3 \cdot 355 \cdot 10^{-6} / 1.10 = 422 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,a,Rd} > M_{sd} \rightarrow \text{OK}$$

Il programma esegue la stessa verifica che contempla anche il caso di sezioni di classe 3 o 4.

VERIFICA DI RESISTENZA DELLA TRAVE NELLA FASE DI COSTRUZIONE					
Area resistente a taglio :	$A_v = \eta \cdot h_w \cdot t_w$	$A_v =$	<input type="text" value="40,07"/>	cm ²	
Limite di resistenza plastica a taglio :	$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$	$V_{pl,Rd} =$	<input type="text" value="747"/>	kN	
$V_{Ed,max} < 50\% V_{pl,Rd}$	$\rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$	$\rho =$	<input type="text" value="0,000"/>		
Verifica di resistenza per sezione di classe		<input type="text" value="1"/>	$\gamma_{M0} =$	<input type="text" value="1,1"/>	
			$f_d = f_y / \gamma_{M0} =$	<input type="text" value="32,27"/>	kN/cm ²
$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} =$	<input type="text" value="0,000"/>	$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A =$	<input type="text" value="0,406"/>	$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_d =$	<input type="text" value="40675"/> kNcm
$r = (1-n) / (1-0,5 \cdot a) =$	<input type="text" value="1,000"/>	$r =$	fattore di riduzione	$M_{N,Rd} = W_y \cdot f_{d,rid} =$	<input type="text" value="40675"/> kNcm
$N_{1,Rd} = 0,25 \cdot N_{pl,Rd} =$	<input type="text" value="660"/>	$N_{2,Rd} = h_w \cdot t_w \cdot f_d / 2 =$	<input type="text" value="518"/>	$N_{Ed} \leq N_{V,Rd} (cl \leq 2) =$	<input type="text" value="0"/> kN
$N_{V,Rd} = A_v \cdot (1-\rho) \cdot f_y$	$N_{Ed} < \min (N_{1,Rd} ; N_{2,Rd})$	NO carico assiale			
in assenza di taglio :	$R_{M,N} = M_{Ed} / M_{N,Rd}$	o	$[N_{Ed} / A + (M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N) / W_y] / f_d =$	<input type="text" value="0,554"/>	< 1
in presenza di taglio :	$k = 4$				
$M_{NV,Rd} = [W_{pl,y,fl} + v \cdot (1-\rho) \cdot A_v^2 / (k \cdot t_w) - v \cdot N_{Ed}^2 / ((1-\rho) \cdot f_y^2 \cdot 4 \cdot t_w)] \cdot f_d \leq M_{N,Rd}$	$M_{NV,Rd} =$	<input type="text" value="-----"/>	kNcm		
$v =$	fattore di simmetria	$= 2 \cdot [(1 - (z_G - t_i) / h_w)^2 + ((z_G - t_i) / h_w)^2] =$	<input type="text" value="1,00000"/>	per sez. di classe <= 2	
se $V_{z,Ed} > 50\% V_{pl,Rd}$	resistenza dell'area di taglio ridotta del fattore (1-ρ)	$R_{M,N,V} =$	<input type="text" value="-----"/>	< 1	

Il foglio di calcolo contempla tutte le possibilità di verifica della sezione per qualunque classe e per preminenza della forza assiale e del taglio. Nel caso in esame, in assenza di forza assiale e con

taglio di progetto minore del 50% della resistenza a taglio, il rapporto tensionale è eseguito tra il momento di progetto e il momento resistente plastico ovvero :

$$\text{- Esempio : } M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 226 / 422 = 0,536$$

$$\text{- Programma : } M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 22544 / 40675 = 0,554$$

La differenza è dovuta alla approssimazione del calcolo delle sollecitazioni e al valore del modulo di resistenza plastico che è calcolato dal programma con riferimento alle dimensioni dei piatti che costituiscono la sezione trascurando i raccordi anima-piattabande. Ciò è stato fatto per sezioni che sono spesso composte-saldate con irrigidimenti di anima e sottili.

Verifica di stabilità a flessione-torsione :

Nell'esempio di riferimento tale verifica non è eseguita sostenendo che l'instabilità flessione-torsionale è contrastata dal collegamento alla lamiera grecata attraverso i pioli saldati. Ciò può avere senso per travi basse e tozze (vedere tab. 6.1 item 6.4.3 (g)) e nel caso in cui la lamiera sia continua sopra la piattabanda, sia di rigidità adeguata ed il carico sia effettivamente centrato sull'asse della trave. In pratica la deformabilità della lamiera grecata sotto il carico del calcestruzzo fresco in fase di spianamento può generare eccentricità di carico con effetti instabilizzanti.

La norma (item 6.4.1 (1)) prevede che non è necessaria la verifica di stabilità flessione-torsionale quando la trave è **solidarizzata alla soletta** con pioli calcolati secondo l'item 6.6. In tutti gli altri casi di travi con flange compresse deve essere eseguita la verifica di stabilità (lateral stability) in base alla norma EN 1993-1-1.

6.4 Lateral-torsional buckling of composite beams

6.4.1 General

(1) A steel flange that is attached to a concrete or composite slab by shear connection in accordance with 6.6 may be assumed to be laterally stable, provided that lateral instability of the concrete slab is prevented.

(2) All other steel flanges in compression should be checked for lateral stability.

Per travi composte continue deve essere posta particolare attenzione agli effetti del momento negativo sugli appoggi che induce compressione nella flangia inferiore libera. In questo caso deve essere applicato il criterio di verifica di cui all'item 6.4.2 della EN 1994-1-1 a meno che non si adottino gli artifici costruttivi di cui all'item 6.4.3 della stessa norma.

In particolare, sempre per travi composte continue, per evitare l'instabilità flessione-torsionale la trave oggetto di verifica dovrebbe essere affiancata almeno da una trave parallela collegata dalla stessa soletta (sezione a U) e da controventi trasversali opportunamente posizionati lungo lo sviluppo del sistema di travi.

Il programma "TraveComp" esegue la verifica di stabilità flessione-torsionale della trave in fase di getto in accordo con i due criteri previsti dalla norma EN 1993-1-1 e con il criterio semplificato della norma ENV 1993-1-1 tenendo conto dell'effettiva distanza dei vincoli torsionali (controventi trasversali intermedi)

Di seguito è riportato il foglio di calcolo del programma "TraveComp" relativo alla verifica di stabilità della trave in fase di costruzione da cui si evidenzia che la verifica è soddisfatta (metodo 2 EN 1993-1-1) solo se si prevede un vincolo torsionale pienamente efficace in mezzaria

(controvento trasversale intermedio) .

RESISTENZA ALL'INSTABILITA' NELLA FASE DI COSTRUZIONE			
Distanza effettiva tra i vincoli torsionali :	L =	600	cm
Lunghezza libera nel piano principale :	L _y =	1200	cm
Momenti principali di estremità (+;-)	M _{sy} =	0	M _{dy} = 0 kNcm
(1) Momento fittizio in campata	M ₀ =	22544	22544 ΔM = 22544 kNcm
Diagramma del momento flettente (*) :	(l,p,t,q) =	p	parabolico
Fattore di lunghezza effettiva k (0,5-0,7-1)	k =	0,5	rotazione z-z impedita delle estremità
Fattore di lunghezza effettiva k _w (0,5-0,7-1)	k _w =	0,5	distorsione impedita delle estremità
Fattore di distribuzione momenti estremi :	ψ =	0,00	-1 < ψ < 1
Max. spostamento dell'elemento :	δx =	0	cm (da calcolo E.F. della struttura)
nota (1) : momento calcolato per trave semplicemente appoggiata			
Coeff. di forma (*) :	C1 =	0,972	C2 = 0,30 C3 = 0,98
Fattore di momento uniforme equivalente (*) :	β _{My} =	1,300	diagr. parabolico
β _w = W _{calc} /W _{pl,y}	β _w =	1,00	per sez. di classe 1
β _f = J _{tf} / (J _{tf} +J _{ti})	β _f =	0,50	k _k = 0,8
z _j = k _k · (2 β _f - 1) · h _s / 2	z _j =	0,00	cm
I _w = β _f · (1-β _f) · J _y · h _s ² warping const.	I _w =	490048,5	cm ⁴ per sezione a I
z _g = punto di applicazione del carico			estradosso
Momento critico elastico :	M_{cr} =	48555	kNcm EN 1993-1-1
Lunghezza libera nel piano laterale :	L _z =	600	cm EC3
Snellezze effettive per presso-flessione :	λ _y =	73	λ _z = 150 λ _{lim}
Snellezze adimensionali corrispondenti :	λ̄ _y =	0,952	λ̄ _z = 1,961 < 1,961
Snellezza per l'instabilità flesso-torsionale :	λ _{LT} =	73	λ ₀ = 63,00324
Snellezza adimensionale corrispondente :	λ̄ _{LT} =	0,960	λ̄ _{LT,0} = 0,4
			λ̄ ₀ = 0,824665
Coeff. di imperfezione per presso-flessione :	α _y =	0,21	α _z = 0,34
φ = 0,5 · [1 + α · (λ̄ - 0,2)] + λ̄ ²	φ _y =	1,032	φ _z = 2,723
Coeff. di imperfezione per flesso-torsione :	α _{LT} =	0,34	per sezione laminata 0,49
φ _{LT} = 0,5 · [1 + α _{LT} · (λ̄ _{LT} - λ̄ _{LT,0})] + β · λ̄ _{LT} ²	φ _{LT} =	0,941	β = 0,75
Coeff. di riduzione per presso-flessione :	χ _y =	0,699	χ _z = 0,217
Coeff. di riduzione per flesso-torsione :	χ _{LT} =	0,664	χ _{min} = 0,217
per profili a I o H laminati o saldati :	χ _{LT} =	0,664	φ _{LT} = 0,983 item 6.3.2.3
VERIFICA COL METODO 2 EN 1993-1-1	μ _y =	-1,202	k _{yy} = 1,000 k _{zy} = 0,570
	μ _{LT} =	0,232	k _{LT} = 1,000
fattore di correzione per distribuzione del momento tra i vincoli :	f =	0,972	γ _{M1} = 1,1
k _c = 0,940	χ _{LT,mod} = χ _{LT} / f =	0,683	f _d = f _y / γ _{M1} = 32,27 kN/cm ²
VERIFICA DI STABILITA' PER PRESSO-FLESSIONE			
ENV 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _{min} · A _{calc}) + k _y · (M _{Ed} + N _{Ed} · e _N) / W _{calc}] / f _d =		
EN 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _y · A) + k _{yy} · (M _{y,Ed} + N _{Ed} · e _{Ny}) / (χ _{LT} · W _y)] / f _d =	0,771	< 1 OK!
VERIFICA DI STABILITA' PER FLESSO-TORSIONE			
ENV 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _z · A _{calc}) + k _{LT} · (M _{Ed} + N _{Ed} · e _N) / (χ _{LT} · W _{calc})] / f _d =		
EN 1993-1-1	[N _{Ed} / (χ _z · A) + k _{zy} · (M _{y,Ed} + N _{Ed} · e _{Ny}) / (χ _{LT} · W _y)] / f _d =	0,463	< 1 OK!

Verifica della sezione collaborante :

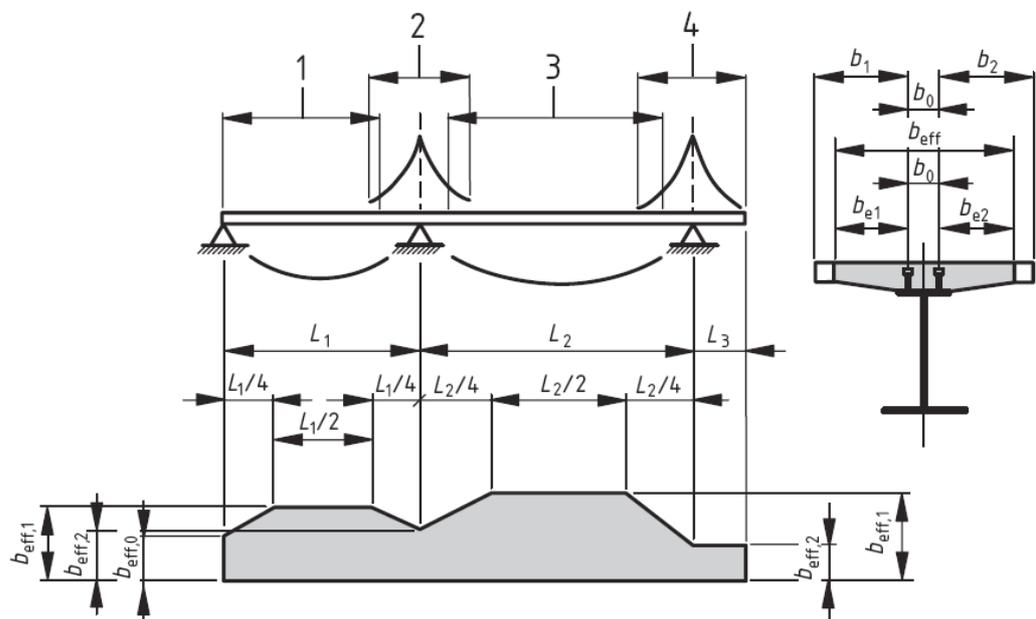
larghezza efficace della soletta :

la larghezza efficace della soletta in campata è data dalla seguente espressione in conformità alla norma EN 1994-1-1 item 5.4.1.2 (5)

$$b_{\text{eff}} = b_0 + \sum b_{ei}$$

Le distanze b_{ei} sono rappresentate nella figura seguente e sono date dal rapporto $L_e / 8$ in cui la lunghezza efficace L_e della trave è deducibile dalla seguente figura **per travi continue** .

Per travi semplicemente appoggiate $L_e =$ lunghezza effettiva della trave tra gli appoggi.

**Key**

- 1 $L_e = 0,85L_1$ for $b_{\text{eff},1}$
- 2 $L_e = 0,25(L_1 + L_2)$ for $b_{\text{eff},2}$
- 3 $L_e = 0,70L_2$ for $b_{\text{eff},1}$
- 4 $L_e = 2L_3$ for $b_{\text{eff},2}$

Nel caso in esame, ipotizzando una sola fila di pioli lungo l'asse dell'anima ($b_0 = 0$) :

$b_{e1} = b_{e2} = L_e / 8 = 1200 / 8 = 150$ cm che coincide con la metà dell'interasse tra le travi e quindi

$b_{\text{eff}} = 300$ cm

Verifica di resistenza allo S.L.U. :

valore riferito al calcestruzzo normale di uguale resistenza meccanica moltiplicato per il fattore $(\rho/2200)^2$ in cui $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

$$E_{cm} = 0,67 \cdot 31000 = 20752 \text{ N/mm}^2$$

$n = 210000 / 13835 = 15,2$ che viene arrotondato per eccesso a **16** data l'aleatorietà del criterio esposto.

Pur essendo la sezione di classe 1 per cui è applicabile il metodo plastico viene di seguito eseguita la verifica col metodo elastico applicabile a sezioni di qualunque classe. Tale verifica non è riportata nell'esempio di riferimento.

Verifica col metodo elastico :

Le caratteristiche geometriche della sezione omogenea sono di seguito riportate

sezione efficace omogenea in campata		
area sezione efficace omogenea	$A_{om} = \text{cm}^2$	233
posizione asse neutro sez. reagente	$z_n = \text{cm}$	38,89
momento di inerzia efficace	$J_{om} = \text{cm}^4$	66825
modulo di res. esterno piattab. sup.	$W_{ys} = \text{cm}^3$	60425
modulo di res. esterno piattab. inf.	$W_{yi} = \text{cm}^3$	1718
modulo di res. esterno soletta C.A.	$W_{yCS} = \text{cm}^3$	4737
modulo di res. interno soletta C.A.	$W_{yCi} = \text{cm}^3$	10944
modulo di res. min. trave acciaio	$W_{el,min} = \text{cm}^3$	1718
posizione asse neutro plastico	$x_{pl} = \text{cm}$	6,21
modulo di resistenza plastico	$W_{pl} = \text{cm}^3$	2564

a) Verifica della sezione omogeneizzata in acciaio

Il calcolo è eseguito in **fase finale** nella sezione di momento massimo e presuppone la piena efficienza del collegamento trave-soletta..

Il modulo di resistenza plastico della sezione composta omogeneizzata in acciaio vale :

$$W_{pl} = 2564 \text{ cm}^3$$

Per sezione di **classe 1** il momento resistente plastico di progetto è dato da :

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd} = 2564,3 \cdot 35,5 / 1,1 = 82754 \text{ kNcm} > 68714 \text{ kNcm} ;$$

$$M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 0,830$$

Si noti che il modulo di resistenza plastico dipende dal valore del coefficiente di omogeneizzazione che condiziona quindi in modo sensibile la verifica.

Se ad esempio si facesse riferimento ad un modulo di resistenza per effetti nel lungo termine il suo valore sarebbe:

$$n = E_p / E'_{cm} ; \quad E'_{cm} = E_{cm} / 2 = 210000 / (20752 / 2) = 20,24 \text{ arrotondato per eccesso a } 22$$

ne consegue che : $W_{pl} = 2462,7 \text{ cm}^3$

$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd} = 2462,7 \cdot 35,5 / 1,1 = 79478 \text{ kNcm} > 68714 \text{ kNcm}$;

$M_{Ed} / M_{pl,Rd} = 0,865$

Il programma “TraveComp” esegue il calcolo in forma completa valido anche per sezioni di classe > 1 controllando la eventuale riduzione del momento resistente sia per effetto della forza assiale che per effetto del taglio quando quest’ultimo supera il 50% della resistenza a taglio.

La verifica col programma automatico riferita ad un valore di $n = 16$ si presenta quindi come segue :

ANALISI DELLA TRAVE COMPOSTA IN CAMPATA - TEORIA ELASTICA			
Area resistente a taglio :	$A_v = \eta \cdot h_w \cdot t_w$	$A_v =$	<input type="text" value="40,07"/> cm^2
Limite di resistenza plastica a taglio :	$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / 3^{1/2}) / \gamma_{M0}$	$V_{pl,Rd} =$	<input type="text" value="747"/> kN
$V_{Ed,max} < 50\% V_{pl,Rd}$	$\rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$	$\rho =$	<input type="text" value="0,000"/>
Verifica di resistenza per sezione di classe		<input type="text" value="1"/>	
		$\gamma_{M0} =$	<input type="text" value="1,1"/>
		$f_d = f_y / \gamma_{M0} =$	<input type="text" value="32,27"/> kN/cm^2
$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} =$	$0,000$	$a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A =$	$0,500$
$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_d =$	<input type="text" value="82754"/>	$M_{pl,Rd} =$	<input type="text" value="82754"/> kNcm
$r = (1-n) / (1-0,5 \cdot a) =$	$1,000$	$r =$ fattore di riduzione	
$M_{N,Rd} = W_y \cdot f_{d,rid} =$	<input type="text" value="82754"/>	$M_{N,Rd} =$	<input type="text" value="82754"/> kNcm
$N_{1,Rd} = 0,25 \cdot N_{pl,Rd} =$	1880	$N_{2,Rd} = h_w \cdot t_w \cdot f_d / 2 =$	518
$N_{Ed} \leq N_{V,Rd} (cl \leq 2) =$	<input type="text" value="0"/>	$N_{Ed} \leq N_{V,Rd} (cl \leq 2) =$	<input type="text" value="0"/> kN
$N_{V,Rd} = A_v \cdot (1-p) \cdot f_y$	$N_{Ed} < \min(N_{1,Rd}; N_{2,Rd})$	NO carico assiale	<input type="text" value="0,830"/> $0,830$
in assenza di taglio :	$R_{M,N} = M_{Ed} / M_{N,Rd}$	o $[N_{Ed}/A + (M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N) / W_y] / f_d =$	<input type="text" value="0,830"/> < 1
in presenza di taglio :	$k = 4$		
$M_{NV,Rd} = [W_{pl,y,fl} + v \cdot (1-p) \cdot A_v^2 / (k \cdot t_w) - v \cdot N_{Ed}^2 / ((1-p) \cdot f_y^2 \cdot 4 \cdot t_w)] \cdot f_d \leq M_{N,Rd}$	$M_{NV,Rd} =$	$M_{NV,Rd} =$	<input type="text" value="-----"/> kNcm
$v =$ fattore di simmetria =	$2 \cdot [(1 - (z_G - t_f) / h_w)^2 + ((z_G - t_f) / h_w)^2] =$	$3,06273$	per sez. di classe ≤ 2
se $V_{z,Ed} > 50\% V_{pl,Rd}$	resistenza dell'area di taglio ridotta del fattore (1-p)	$R_{M,N,V} =$	<input type="text" value="-----"/> < 1

b) Verifica della sezione col metodo della sovrapposizione degli effetti

Nel caso di trave puntellata in fase di costruzione è necessario che le sollecitazioni della fase iniziale siano riferite alla stessa sezione della fase finale.

Se ad esempio nel nostro caso la trave avesse un puntello iniziale in mezzaria che sarà rimosso a soletta consolidata il momento flettente massimo finale si avrà nella mezzaria della trave là dove il puntello (appoggio intermedio) produce un momento flettente negativo sotto i carichi di costruzione. La sovrapposizione degli effetti dovrà tener conto della successione degli eventi per definire lo stato di tensione finale.

La verifica con la teoria elastica della sovrapposizione degli effetti eseguita col programma “TraveComp” produce, per il caso in esame, i seguenti risultati:

VERIFICA DELLA SEZIONE COMPOSTA CON LA TEORIA ELASTICA			
SEZIONE IN CAMPATA :			
Esterno piattabanda inferiore trave :	fase iniziale di getto :	$R_i =$	0,405
	fase finale consolidata :	$R_f =$	0,631
	sovrapposizione degli effetti :	$R_{tot} =$	1,036 < 1
Esterno piattabanda superiore trave :	fase iniziale di getto :	$R_i =$	0,405
	fase finale consolidata :	$R_f =$	0,631
	sovrapposizione degli effetti :	$R_{tot} =$	1,036 < 1
Esterno soletta in C.A. omogeneizzata :	compressione massima (N/mm ²) :	$\sigma_{c,max} =$	6,89 < 16,67
Stabilità al taglio dell'anima :	fase iniziale di getto :	$R_i =$	0,000
	fase finale consolidata :	$R_f =$	0,000
	sovrapposizione degli effetti :	$R_{tot} =$	0,000 < 1

Il rapporto tensionale maggiore di 1 evidenzia col colore rosso che la verifica non è soddisfatta anche se di poco.

Si ricorda che le sollecitazioni nella fase iniziale sono generate dal peso della soletta in calcestruzzo riferito al suo **spessore finale con esclusione quindi del carico di costruzione**, dal peso della eventuale lamiera grecata collaborante e dal peso della trave in acciaio. Le sollecitazioni nella fase finale sono generate dai carichi permanenti portati (pavimentazione con sottofondo, controsoffitti, tramezzature), dai carichi concentrati dovuti alla rimozione di eventuali puntelli provvisori (reazione dei supporti ai carichi della fase iniziale) e dal carico variabile di esercizio.

Nel caso in esame le sollecitazioni della fase iniziale sono riportate nella seguente tabella estratta dai fogli di calcolo del programma "TraveComp" valida soprattutto per travi continue su puntelli per le quali vengono calcolati i momenti flettenti nelle sezioni di campata e di appoggio riferite alla fase finale.

sollecitazioni sulla trave in acciaio dovute al peso della soletta a getto ultimato							
azioni dei puntelli intermedi S.L.U.	REAZIONI - MOMENTI - TAGLI		CARICHI INIZIALI UNIFORMI	u.m.			
	REAZIONE APPOGGIO A	$R_A =$	54,90	kN			
	REAZIONE APPOGGIO B	$R_B =$	54,90	kN	schema statico finale		
	REAZIONE APPOGGIO C	$R_C =$	0,00	kN	momento iniz. congruente		
	SEZIONE DI RIFERIMENTO		CAMPATA	APPOGGIO	CAMPATA	APPOGGIO	
	MOMENTO FLETTENTE IN X	$M_y =$	16469	0	kNcm	16469	0
	TAGLIO A SX. DELLA SEZ. X	$T_{sx} =$	0,00	54,90	kN		
TAGLIO A DX. DELLA SEZ. X	$T_{dx} =$	0,00	54,90	kN			

Verifica col metodo plastico :

Per sezioni di **classe** ≤ 2 è possibile eseguire la verifica di resistenza col metodo plastico ovvero, per il calcolo del momento resistente plastico si fa riferimento ai seguenti schemi o diagrammi di tensione.

6.2 Resistances of cross-sections of beams

6.2.1 Bending resistance

6.2.1.1 General

(1)P The design bending resistance shall be determined by rigid-plastic theory only where the effective composite cross-section is in Class 1 or Class 2 and where pre-stressing by tendons is not used.

(2) Elastic analysis and non-linear theory for bending resistance may be applied to cross-sections of any class.

Typical plastic stress distributions are shown in Figure 6.2.

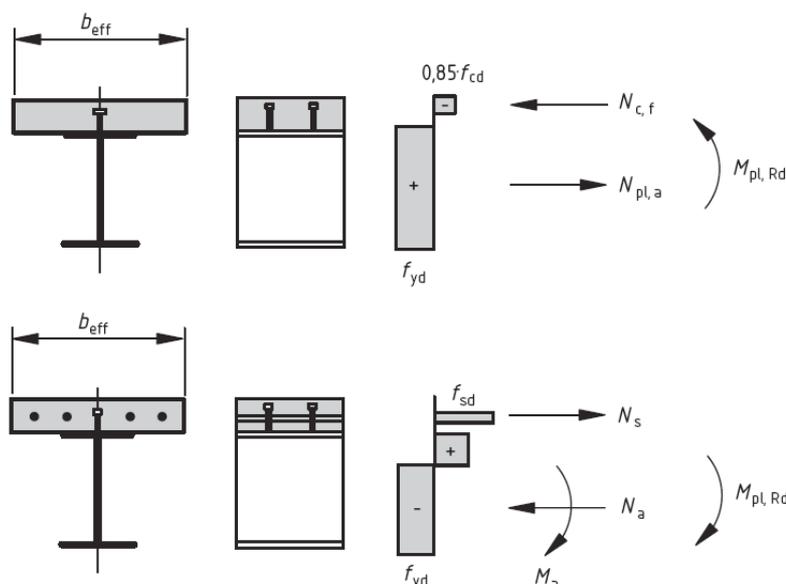


Figure 6.2 : Examples of plastic stress distributions for a composite beam with a solid slab and full shear connection in sagging and hogging bending

Le esempio di riferimento riassume nelle seguenti espressioni la verifica di resistenza a flessione:

$$M_{sd} = (1.35 \cdot 8.28 + 1.5 \cdot 18) \cdot 12^2 / 8 = 687 \text{ kNm}$$

$$x = R_a / R_c \cdot h_c = 64.2 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Rd} = R_a \cdot (h/2 + h_p + h_c - x/2) = 2727 \cdot (200 + 50 + 80 - 64.2/2) \cdot 10^{-3} = 812 \text{ kN m}$$

$$M_{pl,Rd} > M_{sd} \rightarrow \text{OK}$$

Con un rapporto tensionale pari a : $687 / 812 = 0,846$

Il foglio di calcolo automatico illustra la verifica nei seguenti passaggi :

VERIFICA DELLA SEZIONE COMPOSTA CON LA TEORIA PLASTICA PER CLASSE ≤ 2		
SEZIONE IN CAMPATA :		
Sollecitazioni in fase consolidata :	Momento flettente	$M_{Ed} = 68714$ kNcm
	Taglio congruente massimo	$V_{Ed} = 0,00$ kN
	Compressione assiale	$N_{Ed} = 0$ kN
Caratteristiche plastiche :	posizione asse neutro plastico	$x_{pl} = 6,215$ cm
	braccio di leva	$z_{pl} = 29,893$ cm
	rapporto x_{pl} / H	$x_{pl} / H = 0,117$
	fattore di riduzione del $M_{pl,Rd}$	$\beta = 1,000$
	momento resistente plastico	$M_{pl,Rd} = 78952$ kNcm
Verifica di resistenza :	$R_{pl} = M_{Ed} / M_{pl,Rd}$	$R_{pl} = 0,870 < 1$
Stabilità al taglio dell'anima :	rapporto tagli ; $\eta_3 = V_{Ed} / V_{b,Rd}$	$\eta_3 = 0,000 < 1$

Le differenze (modeste) sono dovute al diverso valore dell'area della sezione di acciaio valutata nel calcolo automatico senza tener conto dei raccordi anima-piattabanda

Il fattore β che compare nel foglio di calcolo è un fattore di riduzione del momento resistente plastico che si applica nel caso di impiego di acciai S 420 o S 460

(2) For composite cross-sections with structural steel grade S420 or S460, where the distance x_{pl} between the plastic neutral axis and the extreme fibre of the concrete slab in compression exceeds 15% of the overall depth h of the member, the design resistance moment M_{Rd} should be taken as $\beta M_{pl,Rd}$ where β is the reduction factor given in Figure 6.3. For values of x_{pl}/h greater than 0,4 the resistance to bending should be determined from 6.2.1.4 or 6.2.1.5.

La resistenza a taglio della sezione è verificata come segue nell'esempio di riferimento :

$$V_{sd} = (1.35 \cdot 8.28 + 1.50 \cdot 18) \cdot 12/2 = 229 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 667 \text{ kN} \quad (\text{vedi } 4.2.2.3)$$

$$V_{pl,Rd} > V_{sd} \rightarrow \text{OK}$$

$$h_w/t_w = 331/8.6 = 38.5 < 69 \varepsilon$$

Non è necessaria la verifica dell'instabilità a taglio dell'anima.

La verifica automatica è eseguita tenendo conto della resistenza alla stabilità a taglio dell'anima anziché della resistenza plastica a taglio ovvero :

SEZIONE SULL'APPOGGIO :		
Sollecitazioni in fase consolidata :	Momento flettente	$M_{Ed} =$ <input type="text"/> kNcm
	Taglio congruente massimo	$V_{Ed} =$ <input type="text" value="229,05"/> kN
	Compressione assiale	$N_{Ed} =$ <input type="text"/> kN
Caratteristiche plastiche :	posizione asse neutro plastico	$x_{pl} =$ <input type="text"/> cm
	momento resistente plastico	$M_{pl,Rd} =$ <input type="text"/> kNcm
Verifica di resistenza :	$R_{pl} = M_{Ed} / M_{pl,Rd}$	$R_{pl} =$ <input type="text"/> < 1
Stabilità al taglio dell'anima :	rapporto tagli ; $\eta_3 = V_{Ed} / V_{b,Rd}$	$\eta_3 =$ <input type="text" value="0,331"/> < 1

dove :

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$V_{b,Rd} = 714 \text{ kN}$$

Verifica di deformazione allo S.L.S. :

freccia iniziale :

l'esempio di riferimento presenta il seguente calcolo della freccia sotto l'azione del peso della soletta e della trave con l'esclusione del carico di costruzione :

Freccia dei carichi permanenti

$$\delta_1 = 5/384 \cdot 6.78 \cdot 12000^4 / (210000 \cdot 23130 \cdot 10^4)$$

$$= 37.7 \text{ mm} = L/318 \rightarrow \text{OK}$$

Il foglio di calcolo automatico produce il seguente risultato ; la differenza con l'esempio di riferimento è dovuta ad un calcolo dell'inerzia eseguito, nel foglio di calcolo, con riferimento alle dimensioni dei piatti che costituiscono la sezione escludendo i raccordi anima-piattabande.

$$J_{eff} = 21869 \text{ cm}^4 < 23130 \text{ cm}^4$$

CALCOLO DELLA FRECCIA per carico uniformemente distribuito - elemento continuo su campate uguali
combinazione quasi permanente o frequente (effetti nel lungo termine)

Freccia iniziale	$f_{max,i} =$ <input type="text" value="39,845"/> mm = L / 301	< L / 300 = mm	40,00
Distanza da "A"	$x_{A \text{ iniziale}} =$ <input type="text" value="6,000"/> m		

In realtà il momento di inerzia per il calcolo della freccia in fase iniziale dovrebbe discendere da una interazione tra il momento di inerzia della sezione lorda ed il momento di inerzia della sezione efficace (sezioni di classe 4) in base alla seguente espressione :

$$I_{fic} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{\sigma} (I_{gr} - I(\sigma)_{eff})$$

freccia finale :

la freccia della trave composta solidarizzata dovrebbe essere calcolata con riferimento ad un modulo di elasticità del calcestruzzo valutato per effetti di lunga durata considerando una combinazione “quasi permanente”.

Questa condizione corrisponde al considerare una riduzione del carico variabile in funzione della destinazione d'uso dell'opera.

Nell'esempio di riferimento viene fatto il seguente ragionamento con riferimento ad una versione superata dell'EC4:

La freccia dovuta ai carichi di lunga durata andrebbe valutata con un modulo elastico del calcestruzzo $E'_c = E_{cm}/3$ (EC4 #3.1.4.2 (4)) mentre quella dovuta ai carichi di breve durata andrebbe valutata con il modulo E_{cm} . Data l'incertezza dei parametri in gioco si suole valutare forfettariamente la freccia nella fase di trave composta applicando l'intero sovraccarico con un modulo elastico del calcestruzzo $E'_c = E_{cm}/2$ (EC4 #3.1.4.2 (4)).

Che produce il seguente risultato :

$$E'_c = E_{cm}/2 = 8600 \text{ N/mm}^2 \text{ (modulo "effettivo" del calcestruzzo)}$$

$$n = E_a/E'_c \text{ (coefficiente di omogeneizzazione)}$$

$$n = 210000/8600 = 24.4$$

momento d'inerzia della sezione omogeneizzata all'acciaio :

$$\begin{aligned} I_s &= I_a + I_c/n + A_a \left(h_a/2 + h_p + h_c - x \right)^2 + A_c/n \left(x - h_c/2 \right)^2 \\ &= 23130 \cdot 10^4 + \left(3000 \cdot 80^3 / 12 \right) / 24.4 + 8450 \left(200 + 50 + 80 - 174 \right)^2 \\ &\quad + \left(3000 \cdot 80 \right) / 24.4 \left(174 - 80/2 \right)^2 = 61879 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$E_a I_s = 210000 \cdot 61879 \cdot 10^4 = 130 \cdot 10^{12} \text{ N/mm}^2$$

Freccia della trave composta:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= 5/384 \cdot (18 + 1.50) \cdot 12000^4 / (130 \cdot 10^{12}) \\ &= 40.5 \text{ mm} = L/296 \sim L/300 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

La freccia totale dell'esempio sarebbe quindi :

$$\delta_1 + \delta_2 = 37,7 + 40,5 = \mathbf{78,2 \text{ mm}} > L/250 = \mathbf{48 \text{ mm}}$$

viene pertanto proposta una **controfreccia di 30 mm** in fase di costruzione con una freccia finale pari a :

Freccia totale

$$\delta_{\max} = \delta_1 - \delta_0 + \delta_2 = 7.7 + 40.5 = 48.2 \text{ mm} = L/249 \sim L/250 \rightarrow \text{OK}$$

Il calcolo automatico, eseguito in conformità alla norma EN 1990-1-1 per la combinazione quasi permanente, e per una categoria “D” della costruzione (ambiente ad uso commerciale) distingue il caso di soletta integra e di soletta fessurata per travi continue.

Il calcolo riferito al caso in esame (soletta integra) è di seguito riportato:

momento di inerzia della sezione omogenea

(si trascura l'armatura metallica compressa)

coeff. di omogeneizzazione per effetti nel **lungo** termine
 coeff. di omogeneizzazione per effetti nel **breve** termine
 area omogenea per effetti nel **lungo** termine
 area omogenea per effetti nel **breve** termine
 posizione asse neutro per effetti di **lungo** termine
 posizione asse neutro per effetti di **breve** termine
 momento di inerzia per effetti nel **lungo** termine
 momento di inerzia per effetti nel **breve** termine

$n_l =$	22	22
$n_0 =$	11	
$A_{om,nl} =$	191,47	cm ²
$A_{om,n0} =$	302,27	cm ²
$z_{n,nl} =$	36,723	cm
$z_{n,n0} =$	41,186	cm
$I_{b,nl} =$	61516	cm ⁴
$I_{b,n0} =$	72580	cm ⁴

sezione non fessurata

Freccia finale per e.l.t. $f_{max,fl} =$ **25,707** mm per carichi perm. portati e % carico variabile

Distanza da "A" $X_{A\ finale} =$ **6,000** m

Freccia totale max. $f_{max} =$ **65,553** mm = L / **183** < L / 250 = mm **48,00**

Per rientrare nel limite ammissibile della freccia sarebbe sufficiente una controfreccia iniziale di **18** mm

Per travi continue è possibile eseguire il calcolo della freccia considerando una sezione fessurata sugli appoggi ovvero con riferimento ad una inerzia della sezione opportunamente ridotta per una lunghezza pari al 15% della luce da ciascun lato dell'appoggio.

Data la grande aleatorietà dell'effetto della fessurazione, per la riduzione dell'inerzia si può fare riferimento al criterio empirico di Paulay e Priestley (1992) che per sezioni in C.A. a T prevede una riduzione dell'inerzia lorda pari al 35%.

Elemento strutturale	Intervallo di J_r/J_i	J_r/J_i raccomandato
Travi, rettangolari	0.30÷0.50	0.40
Travi, a T e a L	0.25÷0.45	0.35
Colonne, $N > 0.5f_c A$	0.70÷0.90	0.80
Colonne, $N = 0.2f_c A$	0.50÷0.70	0.60
Colonne, $N = -0.05f_c A$	0.30÷0.50	0.40

Paulay e Priestley, 1992

↓
 Valore del momento d'inerzia della sezione fessurata (J_r) in funzione di quello corrispondente alla sezione integra (J_i)

Continua parte 2