Report di validazione del software

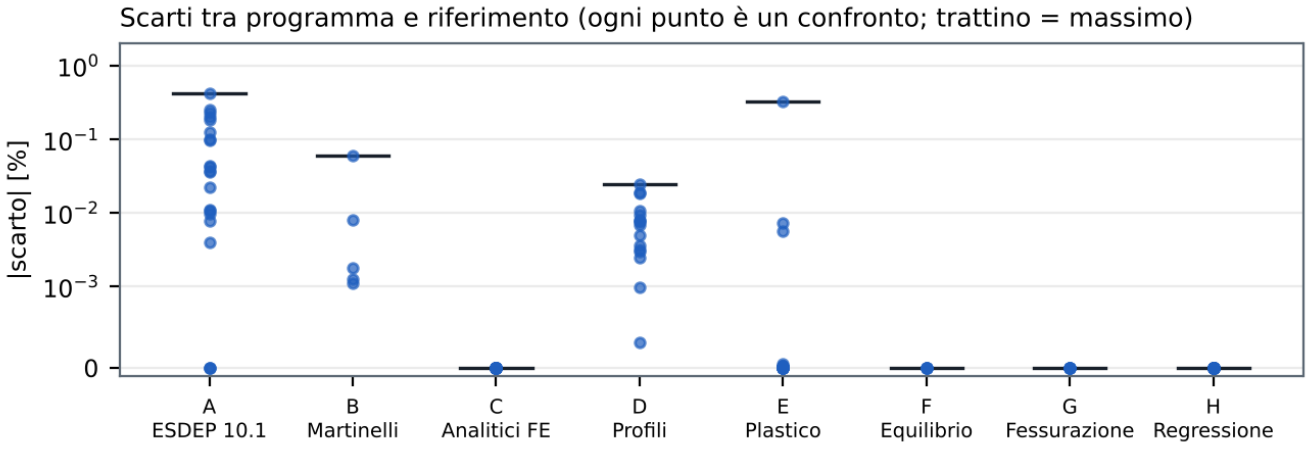
Travi Miste NTC 2018 · versione con trave in c.a. di larghezza definita, armature e schema incastro-incastro · data 17/10/2026

Esito: 137 confronti superati su 137. Il motore di calcolo (la stessa funzione compute() e lo stesso risolutore FE inclusi nel file HTML) è stato eseguito in Node.js sui casi di prova; i valori di riferimento provengono da esempi svolti pubblicati, da soluzioni analitiche chiuse calcolate indipendentemente in Python e dai sagomari dei profili. Il confronto non riguarda il giudizio di progetto ma la correttezza numerica delle procedure implementate.

1. Metodo

Ogni confronto è espresso come scarto percentuale (programma − riferimento)/riferimento. Le tolleranze tengono conto dell'arrotondamento dei valori pubblicati (di norma ±0,5% per i dati a tre cifre significative), della differenza tra sagomario e geometria integrata numericamente (±0,5%) e dell'aritmetica in virgola mobile per le soluzioni chiuse (±0,001–0,05%). Dove un esempio pubblicato adotta coefficienti diversi da quelli NTC 2018 (γ_a = 1,10, γ_G = 1,35, E_{cm} assegnato) il programma è stato eseguito con gli stessi coefficienti, modificabili nell'oggetto di configurazione CFG senza alterare il codice di calcolo.

Gruppo	Contenuto	Fonte del riferimento	Confronti	Scarto max	Esito
A	Trave semplicemente appoggiata, soletta piena, IPE 400 S355, L = 12 m	ESDEP WG10 Worked example 10.1 (Gelfi, Univ. Brescia)	21	0,4192 %	**OK**
B	Trave continua: momento iperstatico, pioli Ø16, resistenze di calcolo	Martinelli, Esercitazione n. 3	5	0,0606 %	**OK**
C	Analisi FE: appoggio, incastro, estremi fessurati, ritiro, convergenza	Soluzioni chiuse e integrazione indipendente	31	0,0000 %	**OK**
D	Area, inerzia, W_pl, A_v dei profili IPE/HEA/HEB	Sagomario ArcelorMittal (EN 10365)	16	0,0242 %	**OK**
E	Momento plastico positivo e negativo, interazione taglio	Modello a rettangoli indipendente e formula chiusa EN 1994	18	0,3212 %	**OK**
F	Equilibrio delle analisi incastro-incastro complete	Statica: $M^+ + \lvert M^-\rvert = qL^2/8$	5	0,0000 %	**OK**
G	Armatura minima e tensione nelle barre (EN 1994-1-1 §7.4)	Calcolo manuale indipendente	6	0,0000 %	**OK**
H	Semplice appoggio con soletta piena: nessuna variazione	Versione originale del programma	35	0,0000 %	**OK**



2. Gruppo A · ESDEP WG10, esempio svolto 10.1

Solaio di luce 12 m con travi IPE 400 in S355 a interasse 3 m e soletta piena C25/30 di 105 mm, pioli Ø19 × 95 mm (f_u = 450 MPa), getto gravante sul solo acciaio. Carichi: G_k = 9,72 kN/m (soletta 7,56, profilo 0,66, controsoffitto 1,50), Q_k = 18 kN/m. Coefficienti dell'esempio: γ_G = 1,35, γ_Q = 1,50, γ_a = 1,10, γ_c = 1,50, γ_v = 1,25, E_{cm} = 30 500 MPa. Le frecce dell'esempio usano $E'_c = E_{cm}/2$ (n = 13,8): il confronto è condotto sulla sezione omogeneizzata con lo stesso n e con il risolutore FE del programma.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
Larghezza efficace b_eff	3.000 mm	3.000,0 mm	+0,0000 %	± 0,50 %	OK
Resistenza soletta R_c = 0,85 f_ck/γ_c · b_eff h_c	4.463 kN	4.462,5 kN	-0,0112 %	± 0,50 %	OK
Resistenza profilo R_a = A f_y/γ_a	2.727 kN	2.725,9 kN	-0,0420 %	± 0,50 %	OK
Profondità blocco compresso x	64,2 mm	64,14 mm	-0,0970 %	± 0,50 %	OK
Momento plastico M_pl,Rd (η = 1)	744 kNm	744,0 kNm	-0,0040 %	± 0,50 %	OK
Momento plastico profilo M_pl,a,Rd	422 kNm	421,8 kNm	-0,0357 %	± 0,50 %	OK
Rapporto M_pl,Rd / M_pl,a,Rd	1,76	1,764	+0,2042 %	± 0,50 %	OK
Momento di progetto M_Ed	722 kNm	722,3 kNm	+0,0374 %	± 0,50 %	OK
Taglio di progetto V_Ed	241 kN	240,8 kN	-0,1010 %	± 0,50 %	OK
P_Rd rottura gambo (P_Rd,1)	82,0 kN	81,66 kN	-0,4192 %	± 1,00 %	OK
P_Rd rottura calcestruzzo (P_Rd,2)	73,0 kN	73,13 kN	+0,1826 %	± 1,00 %	OK
Pioli totali per ripristino completo N_f	76 n.	76,0 n.	+0,0000 %	± 0,01 %	OK
Area profilo IPE 400 A_a	8.450 mm²	8.446,3 mm²	-0,0437 %	± 0,50 %	OK
Inerzia profilo I_y	23.130 cm⁴	23.128,2 cm⁴	-0,0078 %	± 0,50 %	OK
Modulo plastico W_pl,y	1.307 cm³	1.307,1 cm³	+0,0106 %	± 0,50 %	OK
Snellezza anima d/t_w	38,4	38,49	+0,2301 %	± 0,50 %	OK
Inerzia sezione omogeneizzata (n = 13,8)	64.546 cm⁴	64.531,4 cm⁴	-0,0226 %	± 0,50 %	OK
Asse neutro elastico da estradosso	121,0 mm	120,70 mm	-0,2502 %	± 0,50 %	OK
Freccia δ₁ getto su solo acciaio (8,22 kN/m)	45,7 mm	45,70 mm	-0,0096 %	± 0,50 %	OK
Freccia δ₂ sezione composta (19,5 kN/m)	38,9 mm	38,85 mm	-0,1247 %	± 0,50 %	OK
Classe ala / anima (1 = classe 1)	1	1,0	+0,0000 %	± 0,01 %	OK

Taglio $V_{pl,Rd}$ (non confrontato). L'esempio usa la formula semplificata $A_v = 1{,}04 \cdot h \cdot t_w$ ($V_{pl,Rd}$ = 667 kN, che si riproduce esattamente), mentre il programma applica l'area di taglio EN 1993-1-1 §6.2.6(3) per profili laminati, A_v = 4.269 mm², da cui $V_{pl,Rd}$ = 796 kN con γ_a = 1,10. La differenza dipende dalla formula e non da un errore. Il numero di pioli per il ripristino completo coincide (38 per metà luce, 76 totali).

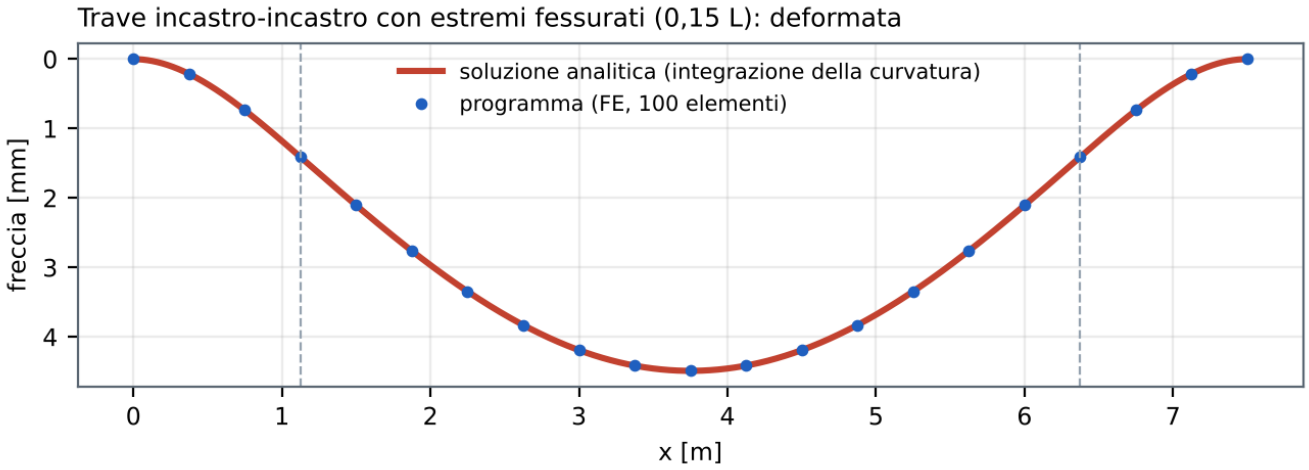
3. Gruppo B · Martinelli, Esercitazione n. 3

Trave continua su due campate di 8 m, IPE 400 S275 e soletta C30/37; per simmetria si studia la campata incastro-appoggio. Si confrontano il momento iperstatico dell'analisi non fessurata ($X_{UC} = q_d L^2/8$ a inerzia costante), la resistenza a taglio del gambo dei pioli Ø16 e le resistenze di calcolo dei materiali. Altri valori dell'esercitazione (area del profilo, A_v, M^-_{Rd}) contengono refusi evidenti e non sono stati usati.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
Carico SLU q_d = 1,3(g_k + g'_k) + 1,5 q_k	49,53 kN/m	49,526 kN/m	-0,0081 %	± 0,05 %	OK
Momento iperstatico non fessurato X_UC (incastro-appoggio)	396,0 kNm	396,24 kNm	+0,0606 %	± 0,10 %	OK
P_aRd piolo Ø16, f_u = 500 MPa	64.339 N	64.339,8 N	+0,0013 %	± 0,01 %	OK
f_ad = f_ak / 1,05 (S275)	261,9 MPa	261,90 MPa	+0,0018 %	± 0,05 %	OK
f_sd armature B450C	391,3 MPa	391,30 MPa	+0,0011 %	± 0,05 %	OK

4. Gruppo C · Analisi elastica agli elementi finiti

Il risolutore impiega elementi di trave di Eulero-Bernoulli con carichi nodali equivalenti consistenti e il momento ricostruito dalla curvatura a metà elemento con la correzione esatta $w \cdot l^2/24$. Le soluzioni di riferimento sono: le formule chiuse per trave appoggiata e doppiamente incastrata a inerzia costante (al variare del numero di elementi), e, per la trave con estremi fessurati e per il ritiro, la condizione di congruenza $\int M/EI\,dx = 0$ e il teorema di riduzione calcolati per quadratura adattiva in Python. Rigidezze: EI_1 = 210 000 × 3,0·10⁸ N·mm², $EI_2 = EI_1/3$, L = 7,5 m, w = 20 kN/m, curvatura impressa $\kappa = 2 \cdot 10^{-7}$ mm⁻¹.



Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
Semplice appoggio: M mezzeria = wL²/8 (n_e = 10)	140,625 kNm	140,6250 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: δ = 5wL⁴/384EI (n_e = 10)	46,957 mm	46,9565 mm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M incastro = −wL²/12 (n_e = 10)	-93,750 kNm	-93,7500 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M mezzeria = wL²/24 (n_e = 10)	46,875 kNm	46,8750 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: δ = wL⁴/384EI (n_e = 10)	9,391 mm	9,3913 mm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: M mezzeria = wL²/8 (n_e = 20)	140,625 kNm	140,6250 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: δ = 5wL⁴/384EI (n_e = 20)	46,957 mm	46,9565 mm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M incastro = −wL²/12 (n_e = 20)	-93,750 kNm	-93,7500 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M mezzeria = wL²/24 (n_e = 20)	46,875 kNm	46,8750 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: δ = wL⁴/384EI (n_e = 20)	9,391 mm	9,3913 mm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: M mezzeria = wL²/8 (n_e = 50)	140,625 kNm	140,6250 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: δ = 5wL⁴/384EI (n_e = 50)	46,957 mm	46,9565 mm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M incastro = −wL²/12 (n_e = 50)	-93,750 kNm	-93,7500 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M mezzeria = wL²/24 (n_e = 50)	46,875 kNm	46,8750 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: δ = wL⁴/384EI (n_e = 50)	9,391 mm	9,3913 mm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: M mezzeria = wL²/8 (n_e = 100)	140,625 kNm	140,6250 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: δ = 5wL⁴/384EI (n_e = 100)	46,957 mm	46,9565 mm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M incastro = −wL²/12 (n_e = 100)	-93,750 kNm	-93,7500 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M mezzeria = wL²/24 (n_e = 100)	46,875 kNm	46,8750 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: δ = wL⁴/384EI (n_e = 100)	9,391 mm	9,3913 mm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: M mezzeria = wL²/8 (n_e = 200)	140,625 kNm	140,6250 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Semplice appoggio: δ = 5wL⁴/384EI (n_e = 200)	46,957 mm	46,9565 mm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M incastro = −wL²/12 (n_e = 200)	-93,750 kNm	-93,7500 kNm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: M mezzeria = wL²/24 (n_e = 200)	46,875 kNm	46,8750 kNm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK
Incastro-incastro: δ = wL⁴/384EI (n_e = 200)	9,391 mm	9,3913 mm	-0,0000 %	± 0,001 %	OK
Estremi fessurati ($EI_2 = EI_1/3$ su 0,15 L): M incastro	-72,832 kNm	-72,8320 kNm	-0,0000 %	± 0,01 %	OK
Estremi fessurati: M mezzeria	67,793 kNm	67,7930 kNm	+0,0000 %	± 0,01 %	OK
Estremi fessurati: freccia in mezzeria	4,490 mm	4,4901 mm	+0,0000 %	± 0,01 %	OK

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
Ritiro, incastro-incastro fessurato: momento iperstatico	-5,513 kNm	-5,5125 kNm	-0,0000 %	± 0,01 %	OK
Ritiro, incastro-incastro fessurato: freccia	0,5537 mm	0,55371 mm	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
Ritiro, semplice appoggio: δ = κL²/8	1,406 mm	1,4063 mm	+0,0000 %	± 0,001 %	OK

5. Gruppo D · Proprietà dei profili

Il programma integra numericamente la sezione per fibre di circa 0,1 mm, in zone delimitate da ali e raccordi circolari; l'area a taglio è $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$. I valori di riferimento sono quelli tabellati nei sagomari dei produttori.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
IPE 300: area A	53,81 cm²	53,812 cm²	+0,0030 %	± 0,50 %	OK
IPE 300: inerzia I_y	8.356 cm⁴	8.356,0 cm⁴	+0,0003 %	± 0,50 %	OK
IPE 300: modulo plastico W_pl,y	628,4 cm³	628,35 cm³	-0,0080 %	± 0,50 %	OK
IPE 300: area a taglio A_v,z	25,68 cm²	25,681 cm²	+0,0050 %	± 0,50 %	OK
IPE 400: area A	84,46 cm²	84,463 cm²	+0,0036 %	± 0,50 %	OK
IPE 400: inerzia I_y	23.130 cm⁴	23.128,2 cm⁴	-0,0078 %	± 0,50 %	OK
IPE 400: modulo plastico W_pl,y	1.307,0 cm³	1.307,14 cm³	+0,0106 %	± 0,50 %	OK
IPE 400: area a taglio A_v,z	42,69 cm²	42,694 cm²	+0,0096 %	± 0,50 %	OK
HEA 300: area A	112,50 cm²	112,527 cm²	+0,0242 %	± 0,50 %	OK
HEA 300: inerzia I_y	18.260 cm⁴	18.263,4 cm⁴	+0,0186 %	± 0,50 %	OK
HEA 300: modulo plastico W_pl,y	1.383,0 cm³	1.383,26 cm³	+0,0191 %	± 0,50 %	OK
HEA 300: area a taglio A_v,z	37,28 cm²	37,277 cm²	-0,0074 %	± 0,50 %	OK
HEB 200: area A	78,08 cm²	78,081 cm²	+0,0010 %	± 0,50 %	OK
HEB 200: inerzia I_y	5.696 cm⁴	5.696,1 cm⁴	+0,0025 %	± 0,50 %	OK
HEB 200: modulo plastico W_pl,y	642,5 cm³	642,54 cm³	+0,0067 %	± 0,50 %	OK
HEB 200: area a taglio A_v,z	24,83 cm²	24,831 cm²	+0,0031 %	± 0,50 %	OK

Correzione emersa dalla validazione. Nella versione originale le fibre di integrazione (passo h/2400) non erano allineate al bordo delle ali: per l'IPE 300 l'area risultava sovrastimata dello 0,2% e l'inerzia dello 0,3%. La nuova versione suddivide la sezione in zone delimitate da ali e raccordi e riproduce il sagomario. Effetto sui risultati: variazioni dell'ordine dello 0,2–0,4% su resistenze e frecce e, nel caso di base, un piolo in meno per metà luce (19 invece di 20).

Profilo	A cat.	A orig.	A nuova	I_y cat.	I_y orig.	I_y nuova
IPE 300	53,81	53,93	53,81	8.356	8.378	8.356
IPE 400	84,46	84,46	84,46	23.130	23.128	23.128
HEA 300	112,50	112,61	112,53	18.260	18.277	18.263
HEB 200	78,08	78,08	78,08	5.696	5.696	5.696

6. Gruppo E · Resistenze plastiche della sezione composta

Per isolare l'algoritmo dalla geometria, i profili sono stati privati dei raccordi (r = 0) e confrontati con un modello a tre rettangoli (ala, anima, ala) scritto in modo indipendente, sia per il momento negativo con armature tese a f_{sd} (con e senza riduzione $(1 - \rho)\cdot f_{yd}$ dell'anima per il taglio) sia per il momento positivo con forza nel calcestruzzo pari a 0,3, 0,6 e 1,0 volte $N_{c,f}$ (asse neutro nell'anima, nell'ala e nella soletta). Per i profili reali il momento negativo è confrontato con la formula chiusa con asse neutro nell'anima, $M = M_{pl,a,Rd} + F_s(h_a/2 + z_s) - F_s^2/(4t_w f_{yd})$, con W_{pl} da sagomario.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
IPE 300 S275 (r = 0), 6Ø12: M⁻_pl,Rd	223,0 kNm	222,98 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 300 S275 (r = 0), 6Ø12: M⁻_Rd con taglio (ρ = 0,25)	206,9 kNm	206,90 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 300 S275 (r = 0), 6Ø12: M⁺_Rd con N_c = 0,3·N_c,f	240,9 kNm	240,95 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
IPE 300 S275 (r = 0), 6Ø12: M⁺_Rd con N_c = 0,6·N_c,f	281,9 kNm	281,90 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 300 S275 (r = 0), 6Ø12: M⁺_Rd con N_c = 1,0·N_c,f	317,2 kNm	317,22 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 300 S275 (reale), 6Ø12: M⁻_pl,Rd vs formula chiusa (W_pl da sagomario)	229,9 kNm	229,85 kNm	-0,0057 %	± 1,00 %	OK
IPE 400 S355 (r = 0), 10Ø16: M⁻_pl,Rd	624,2 kNm	624,21 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 400 S355 (r = 0), 10Ø16: M⁻_Rd con taglio (ρ = 0,25)	575,4 kNm	575,36 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 400 S355 (r = 0), 10Ø16: M⁺_Rd con N_c = 0,3·N_c,f	632,5 kNm	632,50 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 400 S355 (r = 0), 10Ø16: M⁺_Rd con N_c = 0,6·N_c,f	726,1 kNm	726,12 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 400 S355 (r = 0), 10Ø16: M⁺_Rd con N_c = 1,0·N_c,f	788,0 kNm	787,96 kNm	+0,0000 %	± 0,10 %	OK
IPE 400 S355 (reale), 10Ø16: M⁻_pl,Rd vs formula chiusa (W_pl da sagomario)	647,4 kNm	647,48 kNm	+0,0072 %	± 1,00 %	OK
HEB 200 S275 (r = 0), 8Ø12: M⁻_pl,Rd	219,9 kNm	219,94 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
HEB 200 S275 (r = 0), 8Ø12: M⁻_Rd con taglio (ρ = 0,25)	211,3 kNm	211,31 kNm	-0,0001 %	± 0,10 %	OK
HEB 200 S275 (r = 0), 8Ø12: M⁺_Rd con N_c = 0,3·N_c,f	242,0 kNm	241,98 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
HEB 200 S275 (r = 0), 8Ø12: M⁺_Rd con N_c = 0,6·N_c,f	283,3 kNm	283,30 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
HEB 200 S275 (r = 0), 8Ø12: M⁺_Rd con N_c = 1,0·N_c,f	304,1 kNm	304,15 kNm	-0,0000 %	± 0,10 %	OK
HEB 200 S275 (reale), 8Ø12: M⁻_pl,Rd vs formula chiusa (W_pl da sagomario)	225,4 kNm	226,14 kNm	+0,3212 %	± 1,00 %	OK

7. Gruppo F · Equilibrio delle analisi incastro-incastro

Per ogni caso il programma esegue l'analisi completa (fasi costruttive, n_L/n_0, zone fessurate, dimensionamento iterativo delle barre). Qualunque sia la ripartizione iperstatica, la somma del momento in mezzeria e del valore assoluto del momento d'incastro deve eguagliare $q_d L^2/8$.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
IPE 300 · L = 7,5 m: M⁺ + |M⁻| = q_d L²/8	204,3 kNm	204,25 kNm	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · trave c.a. 500×120: M⁺ + |M⁻| = q_d L²/8	218,0 kNm	217,96 kNm	-0,0000 %	± 0,05 %	OK
IPE 400 · L = 10 m · i = 3 m · q_k = 5: M⁺ + |M⁻| = q_d L²/8	550,8 kNm	550,77 kNm	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
HEA 300 · L = 8 m · puntellata: M⁺ + |M⁻| = q_d L²/8	237,2 kNm	237,19 kNm	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
HEB 240 · L = 6 m · trave c.a. 400×200: M⁺ + |M⁻| = q_d L²/8	144,8 kNm	144,82 kNm	+0,0000 %	± 0,05 %	OK

Risultati delle analisi: il rapporto |M⁻|/M⁺ è sempre inferiore a 2 (valore a inerzia costante) per effetto della fessurazione agli incastri, come atteso.

Caso (incastro-incastro)	M⁺_Ed	|M⁻_Ed|	|M⁻|/M⁺	M⁻_Rd	Classe	Barre	δ t∞
IPE 300 · L = 7,5 m	81,4	122,8	1,51	229,9	2	6	8,5
IPE 300 · L = 7,5 m · trave c.a. 500×120	83,4	134,6	1,61	209,7	1	4	9,4
IPE 400 · L = 10 m · i = 3 m · q_k = 5	222,3	328,4	1,48	450,4	2	8	13,8
HEA 300 · L = 8 m · puntellata	98,2	139,0	1,42	435,0	2	7	5,5
HEB 240 · L = 6 m · trave c.a. 400×200	57,4	87,4	1,52	330,2	1	4	3,5

8. Gruppo G · Fessurazione agli incastri

Caso di base (IPE 300 S275, soletta 120 mm C25/30, L = 7,5 m, incastro-incastro, barre Ø12). Il calcolo manuale ricostruisce f_{ctm}, la posizione del baricentro della sezione non fessurata (z_0), k_c, la tensione

ammessa per interpolazione della Tab. 7.1 di EN 1994-1-1 con $\varphi^* = \varphi \cdot 2{,}9/f_{ct,eff}$, l'armatura minima e la tensione nelle barre $\sigma_{s,0}$ nella sezione fessurata.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
f_ctm = 0,30 f_ck^(2/3)	2,565 MPa	2,5650 MPa	+0,0000 %	± 0,01 %	OK
k_c = 1/(1 + h_c/2z₀) + 0,3	0,759	0,7585	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
σ_s ammessa (Tab. 7.1, Ø12, w_k = 0,3)	264,3 MPa	264,33 MPa	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
A_s,min = k_s k_c k f_ct,eff A_ct/σ_s	596 mm²	596,2 mm²	+0,0000 %	± 0,05 %	OK
Inerzia fessurata I₂ (acciaio + barre)	12.460 cm⁴	12.459,7 cm⁴	+0,0000 %	± 0,01 %	OK
σ_s,0 = M_qp (y_G2 − z_s)/I₂	48,4 MPa	48,40 MPa	+0,0000 %	± 0,05 %	OK

9. Gruppo H · Regressione sulla versione originale

Con schema in semplice appoggio e soletta piena la nuova versione deve restituire esattamente i risultati della versione caricata dall'utente, a parità di proprietà del profilo (alla versione originale è applicata la stessa integrazione corretta descritta nel gruppo D). Il calcolo delle frecce è ora eseguito dal risolutore FE invece che con la formula chiusa. Sono stati confrontati cinque casi, compresi trave puntellata, connessione parziale e assenza di ritiro.

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
IPE 300 · L = 7,5 m: M_pl,Rd	343,136 kNm	343,1362 kNm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m: V_pl,Rd	388,329 kN	388,3289 kN	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m: P_Rd	74.293,980 N	74.293,9797 N	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m: pioli per L/2	19,000 n.	19,0000 n.	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m: η	1,000	1,0000	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m: δ t₀	26,140 mm	26,1402 mm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m: δ t∞	33,964 mm	33,9637 mm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: M_pl,Rd	343,136 kNm	343,1362 kNm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: V_pl,Rd	388,329 kN	388,3289 kN	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: P_Rd	74.293,980 N	74.293,9797 N	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: pioli per L/2	19,000 n.	19,0000 n.	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: η	1,000	1,0000	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: δ t₀	12,319 mm	12,3185 mm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 300 · L = 7,5 m · puntellata: δ t∞	21,764 mm	21,7641 mm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: M_pl,Rd	631,120 kNm	631,1201 kNm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: V_pl,Rd	645,580 kN	645,5805 kN	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: P_Rd	74.293,980 N	74.293,9797 N	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: pioli per L/2	30,000 n.	30,0000 n.	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: η	1,000	1,0000	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: δ t₀	25,113 mm	25,1132 mm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 400 · L = 9 m · i = 3 m: δ t∞	33,715 mm	33,7152 mm	-0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: M_pl,Rd	286,429 kNm	286,4291 kNm	+0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: V_pl,Rd	375,468 kN	375,4681 kN	+0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: P_Rd	74.293,980 N	74.293,9797 N	+0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: pioli per L/2	12,000 n.	12,0000 n.	+0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: η	0,436	0,4360	+0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: δ t₀	19,384 mm	19,3841 mm	+0,0000 %	esatto	OK
HEB 200 · L = 6 m · 12 pioli imposti: δ t∞	28,999 mm	28,9994 mm	-0,0000 %	esatto	OK
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: M_pl,Rd	280,227 kNm	280,2274 kNm	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: V_pl,Rd	334,747 kN	334,7473 kN	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: P_Rd	81.656,276 N	81.656,2763 N	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: pioli per L/2	15,000 n.	15,0000 n.	+0,0000 %	esatto	OK
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: η	1,000	1,0000	+0,0000 %	esatto	OK

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto	Toll.	Esito
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: δ t_0	15,110 mm	15,1097 mm	-0,0000 %	esatto	**OK**
IPE 270 · L = 6 m · senza ritiro · C32: δ t_∞	15,983 mm	15,9832 mm	+0,0000 %	esatto	**OK**

Unica differenza voluta: nella verifica di taglio longitudinale la superficie a-a considera ora la quota di calcestruzzo esterna al gruppo di pioli (prima si assumeva prudenzialmente metà della forza totale) e si aggiunge la superficie b-b attorno ai connettori, determinante per le travi in c.a. strette.

10. Ambito e limiti della validazione

• **Validato con riferimenti pubblicati:** resistenza plastica positiva, pioli e ripristino completo, carichi e combinazioni, classificazione, sezioni omogeneizzate, frecce (gruppo A); risoluzione iperstatica e resistenze dei materiali (gruppo B).

• **Validato con soluzioni indipendenti:** risolutore FE per entrambi gli schemi, rigidezza a tratti e ritiro (C); proprietà dei profili (D); momento negativo plastico con armature e interazione taglio, momento positivo con connessione parziale (E); equilibrio dello schema incastro-incastro (F); armatura minima e tensioni per la fessurazione (G).

• **Non coperto da esempi pubblicati:** la larghezza efficace a momento negativo assume $L_e = 0{,}25 \cdot (L + L)$ come per un appoggio intermedio tra campate uguali; lo svergolamento in fase di getto nello schema incastrato usa prudenzialmente $C_1 = 1{,}127$ con il momento massimo; lo svergolamento distorsionale a momento negativo è trattato solo con il criterio semplificato della Tab. 6.1 di EN 1994-1-1; la lunghezza delle barre superiori usa un ancoraggio convenzionale di 40Ø; la superficie b-b e i minimi delle staffe seguono EN 1994-1-1 §6.6.6 ed EN 1992-1-1 §9.2.2 senza un esempio numerico di confronto.

• Il programma non esegue ridistribuzione dei momenti, la verifica dell'apertura delle fessure per calcolo diretto di w_k, né la verifica dei nodi d'incastro, che restano a carico del progettista.

11. Fonti

P. Gelfi, Trave composta semplicemente appoggiata – Esempio 1: soletta piena, Università di Brescia (rev. 2006), tratto da ESDEP WG10 Composite construction, Worked example 10.1. gelfi.unibs.it/didattica/appunticorso/pdf/travecomposta1.pdf

E. Martinelli (corso di Strutture speciali), Esercitazione n. 3 – Trave continua composta, a.a. 2009/2010. enzomartinelli.eu/materialedidattico/itg/traveverificaplastica.pdf

UNI EN 1994-1-1:2005, §5.4.1.2, §5.4.2.3, §6.2.1, §6.2.2.4, §6.4.3, §6.6, §7.3, §7.4; UNI EN 1993-1-1 §5.5, §6.2.6, §6.2.8; UNI EN 1992-1-1 §6.2.4, §9.2; D.M. 17/01/2018 (NTC 2018) §4.2 e §4.3.

ArcelorMittal, Sales programme – Sections and merchant bars: proprietà dei profili IPE, HEA, HEB (EN 10365).