Report di validazione - ripartizione di Guyon-Massonnet

Il programma è confrontato con: la soluzione esatta in forma chiusa della piastra ortotropa (da cui derivano le tabelle di Massonnet), il limite di Courbon, un esempio numerico pubblicato, un modello a graticcio indipendente e un ricalcolo indipendente delle sollecitazioni secondo NTC 2018. I valori di riferimento sono stati calcolati con codice Python separato (soluzione esponenziale esatta, graticcio di travi con 3 gradi di libertà per nodo, enumerazione propria delle corsie) e sono riportati nel programma; i valori del programma sono ricalcolati ogni volta che si genera il report. Sono trattati due impalcati: travi in acciaio composte (caso A) ed elementi TOP BRIDGE in c.a.p. (caso B).

Convenzioni: b = semilarghezza, y = posizione della trave, e = posizione del carico, K(y,e) = rapporto tra la freccia in y e la freccia media. Scarto = programma/riferimento - 1.

V1 - Coefficienti K0 (alfa = 0) e K1 (alfa = 1): programma e soluzione esatta

La soluzione esatta risolve c²W'''' - 2alfa·c·W'' + W = delta(u - e) con bordi liberi (W'' = 0; c·W''' - 2alfa·W' = 0) mediante quattro esponenziali per tratto e condizioni di salto nel punto di carico. Per ogni tabella si confrontano 45 valori (y = 0, b/4, b/2, 3b/4, b; e = -b ... b).

theta	alfa	max |scarto| su 45 valori	max scarto relativo	K(b,b) esatto	K(b,b) programma	K(b,b) versione precedente
0,30	0	0,0006	0,04%	4,1177	4,1171	2,0585
0,30	1	0,0000	0,00%	1,4474	1,4474	0,7237
0,50	0	0,0007	0,04%	4,7981	4,7974	2,3987
0,50	1	0,0001	0,01%	2,1362	2,1362	1,0681
1,00	0	0,0044	0,14%	8,8915	8,8871	4,4436
1,00	1	0,0008	0,05%	4,1892	4,1885	2,0943
1,50	0	0,0148	0,31%	13,3287	13,3139	6,6569
1,50	1	0,0026	0,11%	6,2832	6,2809	3,1404

e	-b	-3b/4	-b/2	-b/4	0	b/4	b/2	3b/4	b
K0(y=b) esatto	-1,4286	-0,9828	-0,5198	-0,0021	0,6203	1,3968	2,3613	3,5140	4,7981
K0(y=b) programma	-1,4281	-0,9824	-0,5196	-0,0018	0,6203	1,3967	2,3609	3,5136	4,7974
K0(y=0) esatto	0,6203	0,8287	1,0273	1,1877	1,2575	1,1877	1,0273	0,8287	0,6203
K0(y=0) programma	0,6203	0,8287	1,0273	1,1877	1,2576	1,1877	1,0273	0,8287	0,6203

Esito: scarto relativo massimo 0,31% (differenze finite con 100 intervalli sulla larghezza; l'errore cresce con theta perché K si concentra vicino al carico). La versione precedente dimezzava K per un carico posto esattamente sul bordo libero (e = ±b): il nodo di bordo ha un volume di controllo h/2 ma riceveva la forza come un nodo interno. L'errore interessava i carichi a meno di b/30 dal bordo (folla, ultimo marciapiede) ed è corretto.

V2 - Proprietà della soluzione e limite di Courbon

Proprietà	Atteso	Programma
Reciprocità K(y,e) = K(e,y), theta 0,8, alfa 0,3 (max scarto su 121 coppie)	0	0,00000
Equilibrio: (1/2b)·int K(y,e) de, y = 0,4b	1,0000	1,0000
Courbon (theta -> 0): K(b,b) = 1 + 3	4,0000	4,0005
Courbon: K(b/2,-b) = 1 - 1,5	-0,5000	-0,4998
Courbon: K(0,e) = 1 per ogni e (e = 0,7b)	1,0000	1,0001

V3 - Esempio pubblicato: TD Guyon-Massonnet, ENSTP 2020 (theta = 0,67, alfa = 0,16)

Ponte di luce 31 m, 5 travi a interasse 2,10 m, b = 5,25 m. L'esempio legge K0 e K1 dalle tabelle di Massonnet (theta 0,65 e 0,70) e interpola con K = K0 + 0,33·(K1 - K0). Si riportano: i valori pubblicati, lo stesso procedimento con K0 e K1 del programma, e K calcolato direttamente dal programma per alfa = 0,16.

Coefficienti K per la trave I (y = 0)

e	-b	-3b/4	-b/2	-b/4	0	b/4	b/2	3b/4	b
Pubblicato	0,3188	0,6765	1,0349	1,3500	1,5001	1,3500	1,0349	0,6765	0,3188
Programma, K0 + 0,33(K1-K0)	0,3186	0,6765	1,0351	1,3499	1,5000	1,3499	1,0351	0,6765	0,3186
Programma, alfa = 0,16 diretto	0,3513	0,6866	1,0296	1,3377	1,4867	1,3377	1,0296	0,6866	0,3513
Esatto, alfa = 0,16	0,3513	0,6866	1,0296	1,3378	1,4864	1,3378	1,0296	0,6866	0,3513

Coefficienti K per la trave III (y = 0,8b)

e	-b	-3b/4	-b/2	-b/4	0	b/4	b/2	3b/4	b
Pubblicato	-0,3447	-0,1944	-0,0174	0,2308	0,6049	1,1536	1,8916	2,7552	3,6167
Programma, K0 + 0,33(K1-K0)	-0,3454	-0,1954	-0,0186	0,2298	0,6045	1,1544	1,8940	2,7607	3,5986

Programma, alfa = 0,16 diretto	-0,3780	-0,2180	-0,0298	0,2316	0,6187	1,1762	1,9135	2,7635	3,5716
Esatto, alfa = 0,16	-0,3781	-0,2182	-0,0299	0,2315	0,6187	1,1762	1,9136	2,7637	3,5722

Esito: con lo stesso procedimento dell'esempio il programma riproduce i valori pubblicati entro 0,002 per la trave I e entro 0,02 per la trave III (l'esempio interpola linearmente tra le righe y = 3b/4 e y = b della tabella). Il calcolo diretto per alfa = 0,16, che coincide con la soluzione esatta, si scosta dall'interpolazione di 0,03 al bordo: è l'errore della formula di interpolazione in alfa, non del programma.

V4 - Modello di carico NTC 2018 e statica

Carreggiata	Programma	NTC Tab. 5.1.I
5,00 m	1 x 3,00 m, residuo 2,00 m	1 x 3,00
5,50 m	2 x 2,75 m, residuo 0,00 m	2 x w/2
7,60 m	2 x 3,00 m, residuo 1,60 m	int(w/3) x 3,00
9,00 m	3 x 3,00 m, residuo 0,00 m	int(w/3) x 3,00
10,50 m	3 x 3,00 m, residuo 1,50 m	int(w/3) x 3,00

Grandezza	Riferimento	Programma	Scarto
Tandem, M max assoluto 2Q(L/2 - a/4)²/L, Q = 1, L = 30 m	14,4060	14,4060	0,00%
Tandem, M in mezzeria Q(L/2 - 0,6)	14,4000	14,4000	0,00%
Tandem, V appoggio Q(2 - a/L)	1,9600	1,9600	-0,00%
Freccia peso proprio 5gL^4/(384EJ) [mm]	4,821	4,821	-0,02%
Soletta, peso proprio: M sbalzo (trave 1) [kNm/m]	-5,859	-5,869	0,16%
Soletta, peso proprio: M su trave 2 [kNm/m]	-2,859	-2,858	-0,04%
Soletta, peso proprio: M su trave 3 [kNm/m]	-3,859	-3,853	-0,14%

Soletta: riferimento da trave continua agli elementi finiti (480 elementi) per 7,5 kN/m² su 5 appoggi a 2,375 m con sbalzi di 1,25 m.

V5 - Caso A: impalcato a 5 travi in acciaio composte

L = 30 m, carreggiata 9,00 m, marciapiedi 1,50 + 1,50 m, 5 travi a 2,375 m (sbalzi 1,25 m). Trave composta: E = 210 GPa, J = 0,25 m4, Jt = 3000 cm4; soletta 30 cm, Es = 33,3 GPa, nu = 0,2. Carichi: g1 10, g2 3,0 (marciapiedi 1,5) kN/m², schema 1 NTC, folla 2,5 kN/m².

theta = 0,829, alfa = 0,049 (rho_p = 22105263, rho_e = 74925, gamma_p = 63458, gamma_e = 62437 kNm); 5 travi a 2,375 m; B = 12,00 m.

Coefficienti K (carico sinusoidale, prima armonica)

Trave / metodo	e = -b	-b/2	0	b/2	b
T1 programma	4,403	1,972	0,313	-0,182	-0,265
esatta	4,404	1,972	0,313	-0,182	-0,265
graticcio	4,847	2,011	0,264	-0,214	-0,284
Courbon	3,526	2,263	1,000	-0,263	-1,526
T2 programma	1,121	1,928	1,299	0,287	-0,406
esatta	1,120	1,928	1,300	0,287	-0,407
graticcio	1,156	1,904	1,277	0,269	-0,467
Courbon	2,263	1,632	1,000	0,368	-0,263
T3 programma	-0,192	1,042	1,925	1,042	-0,192
esatta	-0,193	1,042	1,924	1,042	-0,193
graticcio	-0,268	1,017	1,904	1,017	-0,268
Courbon	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Programma - esatta: scarto massimo 0,0009. Programma - graticcio: scarto massimo 0,444 (il graticcio ha travi discrete e sbalzi reali; Guyon-Massonnet distribuisce le rigidezze su tutta la larghezza). Equilibrio del graticcio: somma dei momenti = momento statico con scarto 0,000%.

Sollecitazioni di progetto per trave: programma e ricalcolo indipendente

Trave	Q prog.	Q rif.	q prog.	q rif.	MEd prog.	MEd rif.	scarto	VEd prog.	VEd rif.	scarto
T1	137,06	137,06	14,291	14,296	9419,0	9424,1	-0,05%	1263,3	1263,9	-0,05%
T2	167,07	167,09	13,397	13,392	10061,1	10057,9	0,03%	1350,5	1350,1	0,03%
T3	168,77	168,79	13,094	13,087	10117,2	10112,0	0,05%	1358,1	1357,4	0,05%
T4	167,07	167,09	13,397	13,392	10061,1	10057,9	0,03%	1350,5	1350,1	0,03%
T5	137,06	137,06	14,291	14,296	9419,0	9424,1	-0,05%	1263,3	1263,9	-0,05%

Ricalcolo indipendente: K esatti, corsie NTC traslate su 101 posizioni con tutte le numerazioni e le corsie scariche, integrazione di Gauss a 12 punti; MEd = Somma gamma·(quota per trave)·(L²/8 o L/2 - 0,6), VEd con Q(2 - 1,2/L). Unità: Q kN/asse, q kN/m, M kNm, V kN.

Commento: con theta = 0,83 la soletta è deformabile e il metodo di Courbon (soletta rigida) sottostima la trave di bordo per carichi sul bordo (K = 3,5 contro 4,4) e sovrastima la trave centrale per carichi eccentrici; è attendibile solo per theta < 0,3 circa. Per la trave di bordo caricata sul bordo il graticcio, con travi discrete e sbalzi reali, dà K = 4,847 contro 4,403 (10,1%): per i carichi sugli sbalzi Guyon-Massonnet può essere leggermente non cautelativo e conviene un controllo con la regola della leva; per i carichi da traffico in carreggiata le differenze sono di pochi punti percentuali.

V6 - Caso B: impalcato di elementi TOP BRIDGE affiancati

L = 18 m, carreggiata 7,60 m, marciapiedi 1,00 + 1,00 m, 8 elementi U14H70 i (14×0,6") a 1,203 m, controcappa 20 cm C32/40, manufatto C45/55. Rigidezze per elemento: J* = 5,814·10^10 mm4 (sezione composta omogeneizzata), Jt = 9,578·10^10 mm4 (Bredt sulla cella chiusa dalla controcappa: 1083 x 730 mm, nervature 117 mm, lastra 140 mm, superiore 184 mm omogeneizzati). Continuità trasversale affidata alla sola controcappa (rho_e e gamma_e della cappa).

theta = 0,795, alfa = 3,095 (rho_p = 1753687, rho_e = 22231, gamma_p = 1203636, gamma_e = 18525 kNm); 8 travi a 1,203 m; B = 9,60 m.

Coefficienti K (carico sinusoidale, prima armonica)

Trave / metodo	e = -b	-b/2	0	b/2	b
E1 programma	1,849	1,324	0,870	0,630	0,543
esatta	1,849	1,324	0,870	0,630	0,543
graticcio	1,980	1,367	0,849	0,583	0,486
Courbon	3,660	2,330	1,000	-0,330	-1,660
E2 programma	1,469	1,359	0,932	0,677	0,584
esatta	1,469	1,359	0,932	0,677	0,584
graticcio	1,534	1,405	0,922	0,636	0,530
Courbon	2,900	1,950	1,000	0,050	-0,900
E3 programma	1,169	1,276	1,037	0,763	0,658
esatta	1,169	1,276	1,037	0,763	0,658
graticcio	1,187	1,311	1,044	0,733	0,612
Courbon	2,140	1,570	1,000	0,430	-0,140
E4 programma	0,941	1,075	1,161	0,895	0,775
esatta	0,941	1,075	1,161	0,895	0,775
graticcio	0,928	1,085	1,184	0,883	0,741
Courbon	1,380	1,190	1,000	0,810	0,620

Programma - esatta: scarto massimo 0,0001. Programma - graticcio: scarto massimo 0,131 (il graticcio ha travi discrete e sbalzi reali; Guyon-Massonnet distribuisce le rigidezze su tutta la larghezza). Equilibrio del graticcio: somma dei momenti = momento statico con scarto 0,000%.

Sollecitazioni di progetto per trave: programma e ricalcolo indipendente

Trave	Q prog.	Q rif.	q prog.	q rif.	MEd prog.	MEd rif.	scarto	VEd prog.	VEd rif.	scarto
E1	69,33	69,33	6,198	6,199	2036,1	2036,3	-0,01%	458,7	458,8	-0,01%
E2	70,41	70,41	6,210	6,209	2052,1	2052,1	0,00%	462,4	462,4	0,00%
E3	69,97	69,97	6,034	6,033	2039,9	2039,8	0,01%	459,6	459,6	0,01%
E4	67,66	67,66	5,734	5,735	1998,7	1998,6	0,00%	450,2	450,2	0,01%
E5	67,66	67,66	5,734	5,735	1998,7	1998,6	0,00%	450,2	450,2	0,01%
E6	69,97	69,97	6,034	6,033	2039,9	2039,8	0,01%	459,6	459,6	0,01%
E7	70,41	70,41	6,210	6,209	2052,1	2052,1	0,00%	462,4	462,4	0,00%
E8	69,33	69,33	6,198	6,199	2036,1	2036,3	-0,01%	458,7	458,8	-0,01%

Ricalcolo indipendente: K esatti, corsie NTC traslate su 101 posizioni con tutte le numerazioni e le corsie scariche, integrazione di Gauss a 12 punti; MEd = Somma gamma·(quota per trave)·(L²/8 o L/2 - 0,6), VEd con Q(2 - 1,2/L). Unità: Q kN/asse, q kN/m, M kNm, V kN.

Commento: la grande rigidezza torsionale degli elementi a cella chiusa porta alfa = 3,09 > 1, fuori dalle tabelle di Massonnet ma nel campo di validità dell'equazione della piastra risolta dal programma. Il graticcio, che modella direttamente la torsione degli elementi, conferma la ripartizione (sulla trave di bordo caricata al bordo il graticcio dà K = 1,980 contro 1,849, cioè il 7,1% in più). Limitare alfa a 1 è a favore di sicurezza:

Ipotesi	alfa	Q eff [kN/asse]	MEd max [kNm]	VEd max [kN]
alfa calcolato	3,095	70,4	2052	462
alfa limitato a 1	1,000	77,0	2161	487

Coerenza con l'applicativo «Verifica Top Sol · Top Bridge»

Grandezza	Applicativo Top Bridge	Questo programma
MRd fase 2 [kNm]	2162,5	2162,5

MRd fase 1, getto [kNm]	1051,1	1051,1
VRd zona piena a d dall'appoggio [kN]	900,8	900,8
sigma superiore / inferiore da P inf [MPa] (catalogo 2,62 / -11,34)	2,62 / -11,34	2,62 / -11,34
Tandem per elemento [kN/asse]	120,3 (Q·1,203/3,0, solo corsia 1)	70,4 (tutte le corsie, K/n)
q variabile per elemento [kN/m]	10,83 (q1k su 1,203 m)	6,21 (corsie + folla, K/n)
MEd in mezzeria [kNm]	2895	2052
Esito delle verifiche	non verificato (192%)	verificato (95%)

Le resistenze e lo stato di precompressione coincidono perché il programma usa lo stesso motore dell'applicativo Top Bridge, al quale passa le sollecitazioni di fase 2 ottenute con Guyon-Massonnet. La differenza sta nella ripartizione: l'applicativo assegna a ogni elemento la quota 1,203/3,0 del tandem della corsia 1, mentre Guyon-Massonnet ripartisce tutte le corsie sull'intero impalcato con la rigidezza torsionale degli elementi. Il secondo approccio è più realistico per un impalcato continuo trasversalmente; il primo resta cautelativo per il predimensionamento.

Verifiche dell'elemento nel caso B

Verifica	Azione	Limite/resist.	Sfrutt.	Esito
Stati limite ultimi				
Flessione in mezzeria (fase 2, sezione composta)	2052,13 kNm	2162,48	95%	OK
Flessione in fase di getto (manufatto solo)	792,06 kNm	1051,10	75%	OK
Taglio a d dall'appoggio (zona piena)	425,19 kN	900,80	47%	OK
Taglio a fine zona piena (sezione alleggerita)	337,51 kN	371,41	91%	OK
Lunghezza zona piena agli appoggi	3,00 m	6,30	48%	OK
Punzonamento impronta in mezzeria	0,27 MPa	0,56	49%	OK
Punzonamento impronta in appoggio	0,05 MPa	0,36	13%	OK
Stati limite di esercizio				
Tensione di compressione al rilascio (t0)	-12,42 MPa	-24,50	51%	OK
Tensione di trazione al rilascio (t0)	0,97 MPa	3,21	30%	OK
Compressione cls manufatto - comb. caratteristica	-21,89 MPa	-27,00	81%	OK
Compressione controcappa - comb. caratteristica	-6,84 MPa	-19,20	36%	OK
Compressione cls manufatto - comb. quasi permanente	-18,36 MPa	-20,25	91%	OK
Formazione fessure lembo inferiore - comb. frequente	2,88 MPa	3,16	91%	OK
Decompressione lembo inferiore - comb. quasi permanente	-1,37 MPa	0,00	0%	OK
Freccia a tinf - comb. quasi permanente	56,58 mm	72,00	79%	OK
Incremento di freccia dopo la posa di G2 (comb. caratteristica)	18,44 mm	36,00	51%	OK

V8 - Sagomario: proprieta dei profili laminati

Le proprieta sono calcolate dal programma per integrazione a fibre della sezione con raccordi circolari (dimensioni EN 10365), J torsionale con la formula di El Darwish-Johnston, Iw = Iz (h - tf)²/4. Confronto con i valori dei cataloghi (ArcelorMittal, Euronorm 19-57).

Profilo	A prog./cat. [cm2]	scarto	Iy [cm4]	scarto	Wpl [cm3]	scarto	Iz	Iw	Av	It
IPE 300	53,81 / 53,81	0,00%	8356 / 8356	-0,00%	628,3 / 628,4	-0,01%	-0,18%	0,03%	0,00%	-3,74%
IPE 600	155,98 / 156,00	-0,01%	92082 / 92080	0,00%	3512,3 / 3512,0	0,01%	-0,21%	-0,02%	0,00%	-3,42%
HEA 300	112,53 / 112,50	0,02%	18263 / 18260	0,02%	1383,2 / 1383,0	0,02%	-0,14%	-0,02%	-0,01%	1,15%
HEB 300	149,08 / 149,10	-0,02%	25165 / 25170	-0,02%	1868,6 / 1869,0	-0,02%	-0,12%	-0,01%	-0,01%	-0,70%
HEB 600	269,96 / 270,00	-0,02%	171039 / 171000	0,02%	6425,1 / 6425,0	0,00%	-0,10%	0,00%	0,01%	-3,61%
HEM 300	303,08 / 303,10	-0,01%	59201 / 59200	0,00%	4077,6 / 4078,0	-0,01%	-0,08%	0,00%	-0,00%	-6,70%
HEM 600	363,66 / 363,70	-0,01%	237446 / 237400	0,02%	8772,0 / 8772,0	0,00%	-0,12%	-0,02%	-0,03%	-6,46%

Esito: A, Iy e Wpl coincidono con i cataloghi entro 0,02%. Iz e Iw differiscono di qualche decimo di punto (il programma trascura il contributo dei raccordi a Iz). It ha scarti fino al 7% rispetto alle formule dei produttori: e usato solo nella rigidezza torsionale di Guyon-Massonnet, dove il contributo della soletta (G t^3/6) e circa mille volte maggiore, e nel momento critico in fase di getto (vedi V9, scarto 2% su Mcr).

V9 - Sezione composta e resistenze: confronto con formule chiuse indipendenti

Riferimenti calcolati con codice Python separato, a formule chiuse: proprieta dei laminati con le formule dei cataloghi, sezione saldata come somma di rettangoli, sezione omogeneizzata con il teorema di Steiner, momento plastico per equilibrio del blocco di tensioni (asse neutro in soletta per il caso A, nell'ala superiore per il caso B), sezione efficace EN 1993-1-5 Tab. 4.1, PRd NTC §4.3.4.3.1, Mcr con It di catalogo. Caso A: impalcato a 5 HEM 600 S355, L = 18 m (trave di bordo T5). Caso B: 5 travi saldate 500x30 / 1440x16 / 600x40 S355, L = 30 m (trave T1).

Caso A - HEM 600

Grandezza	Programma	Riferimento	Scarto
A profilo [mm2]	36365,555	36365,779	-0,00%
Ia [mm4]	2374458813,383	2374474687,033	-0,00%
I0 composta n0 [mm4]	9095912133,249	9105117990,656	-0,10%
IL composta nL [mm4]	6489857322,716	6489884997,692	-0,00%
IS composta nS [mm4]	7431122483,509	7431155573,351	-0,00%
Mpl,Rd composta [kNm]	5789,923	5789,948	-0,00%
Vpl,a,Rd [kN]	2921,267	2921,311	-0,00%
PRd piolo [kN]	109,478	109,478	0,00%
Mc,Rd getto [kNm]	2965,780	2965,800	-0,00%
Mcr getto, Lcr = L/3 [kNm]	4783,639	4881,487	-2,00%
chiLT	0,720	0,725	-0,69%
Mb,Rd [kNm]	2038,941	2053,175	-0,69%
freccia g1 su acciaio [mm]	57,929	57,938	-0,02%
freccia g2 a t_inf [mm]	6,053	6,054	-0,02%
freccia traffico [mm]	27,474	27,452	0,08%
freccia ritiro [mm]	16,499	16,499	0,00%
sigma acciaio inf., caratt. [MPa]	270,604	270,037	0,21%
sigma cls sup., caratt. [MPa]	-8,760	-8,822	-0,70%
flusso di scorrimento SLU appoggio [N/mm]	856,009	850,353	0,67%

Caso B - sezione saldata asimmetrica

Grandezza	Programma	Riferimento	Scarto
A profilo [mm2]	62040,000	62040,000	0,00%
Ia [mm4]	24500266850,956	24500267174,081	-0,00%
I0 [mm4]	66501660748,435	66501661071,560	-0,00%
IL [mm4]	48061042993,746	48061043316,871	-0,00%
IS [mm4]	54653747570,047	54653747893,172	-0,00%
Mpl,Rd (a.n.p. nell'ala superiore) [kNm]	19909,607	19909,609	-0,00%
Vpl,a,Rd [kN]	4497,394	4497,394	0,00%
Vb,Rd instabilita per taglio [kN]	2783,909	2783,909	0,00%
Weff anima di classe 4 (getto) [mm3]	28075635,996	28076154,689	-0,00%
Mc,Rd getto con Weff [kNm]	9492,239	9492,414	-0,00%
freccia g1 [mm]	47,451	47,458	-0,02%
freccia g2 a t_inf [mm]	6,246	6,247	-0,02%

Esito: resistenze, inerzie e sezione efficace coincidono con i riferimenti (scarti dell'ordine di 1e-4, dovuti all'integrazione a fibre). Le piccole differenze su I0 e sulla tensione nel calcestruzzo del caso A (0,1-0,7%) nascono perche il programma, quando l'asse neutro elastico cade in soletta, parzializza il calcestruzzo teso (EN 1994-1-1 §6.2.1.5), mentre il riferimento usa la sezione interamente reagente; Mcr differisce del 2% per il J torsionale (V8). Le frecce del programma, ottenute per doppia integrazione numerica dei diagrammi del momento, coincidono con le formule chiuse 5qL4/384EI e Pa(3L²-4a²)/24EI.

V10 - Confronto con l'applicativo «Travi Miste NTC 2018»

Stessa trave interna risolta con il motore dell'applicativo Travi Miste (eseguito separatamente; HEM 600 S355, soletta 300 mm C32/40, L = 18 m, interasse 2,375 m, semplice appoggio, non puntellata, g1k 7,5 kN/m2, phi 2, nessun ritegno in getto). Il programma usa le stesse ipotesi per sezione omogeneizzata, momento plastico e pioli; per la stabilita in getto lo stesso Mcr (C1 = 1,127, carico all'ala superiore) quando non ci sono ritegni.

Grandezza	Travi Miste	Questo programma	Scarto
beff [mm]	2375,0	2375,0	0,00%
A [mm2]	36365,7	36365,6	-0,00%
Ia [mm4]	2,374·10^9	2,374·10^9	-0,00%
I0 [mm4]	9,039·10^9	9,039·10^9	-0,00%
IL [mm4]	6,433·10^9	6,433·10^9	-0,00%
IS [mm4]	7,373·10^9	7,373·10^9	-0,00%
Mpl,Rd [kNm]	5744,9	5744,9	-0,00%
Vpl,a,Rd [kN]	2921,3	2921,3	-0,00%
PRd [kN]	109,48	109,48	0,00%
pioli per meta luce (ripristino)	113	113	0,00%

g1 per trave [kN/m]	20,667	20,667	-0,00%
freccia g1 su acciaio [mm]	56,65	56,64	-0,02%
Ncs ritiro [kN]	3394,1	3394,1	0,00%
Mcr getto senza ritegni [kNm]	1234,4	1226,3	-0,66%

Differenze attese: la freccia g1 di Travi Miste e calcolata con un modello a elementi finiti a 100 elementi, qui per doppia integrazione su 100 intervalli (scarto < 2%); Mcr differisce per il diverso J torsionale (Travi Miste trascura i raccordi). I coefficienti gammaM1 = 1,10 e la curva di instabilita a (laminati, h/b <= 2, EN 1993-1-1 Tab. 6.4) sono quelli dei ponti, Travi Miste (edifici) usa gammaM1 = 1,05 e curva b: per questo non si confronta Mb,Rd.

V11 - Coerenza tra ripartizione trasversale e verifiche

Controllo	Atteso	Programma	Scarto
Somma g1 sulle travi = g1k B + n peso profilo [kN/m]	104,273	104,273	0,00%
J usato da Guyon-Massonnet = J0 della trave interna (n0, interamente reagente) [cm4]	904620	904620	0,00%
Somma dei momenti di g2 sulle travi = momento statico totale [kNm]	1275,8	1278,4	0,21%
Pioli adottati >= ripristino plastico (per meta luce)	>= 113	114	OK
Passo dei pioli tra 5d e min(4hc; 800) mm	110 - 800	130 / 195	OK
Controfreccia = frecce permanenti a t_inf -> totale netto = traffico [mm]	27,47	27,47	0,00%

La ripartizione dei carichi g2 e da traffico tra le travi resta quella di Guyon-Massonnet validata in V1-V5; il peso della soletta fresca e dei profili e assegnato per area d'influenza (la soletta non e ancora collaborante), e l'equilibrio globale e rispettato (lo scarto di qualche decimo di punto sulla somma dei momenti di g2 deriva dalla quadratura a 8 punti di K sulle aree di carico). Le verifiche sono eseguite per ogni trave con la propria larghezza efficace (bordo o interna).

V12 - Disegno DXF della sezione da ponte

Controllo sul file travi in acciaio (caso A)	Risultato
Formato R12 (AC1009), solo caratteri ASCII	OK
Righe in coppie codice/valore, codici numerici	OK (5834 righe)
Sezioni HEADER, TABLES, ENTITIES e terminatore EOF	HEADER, TABLES, ENTITIES + EOF
Entita lette / generate	LINE 270, TEXT 43, ARC 24 (generate 337)
Layer usati non definiti nella tabella LAYER	nessuno
Ingombro del disegno [mm]	16266 x 4713 (larghezza impalcato 12000)

Controllo sul file Top Bridge (caso B di V6)	Risultato
Formato R12 (AC1009), solo caratteri ASCII	OK
Righe in coppie codice/valore, codici numerici	OK (6222 righe)
Sezioni HEADER, TABLES, ENTITIES e terminatore EOF	HEADER, TABLES, ENTITIES + EOF
Entita lette / generate	LINE 235, TEXT 41, CIRCLE 112 (generate 388)
Layer usati non definiti nella tabella LAYER	nessuno
Ingombro del disegno [mm]	12493 x 3656 (larghezza impalcato 9600)

Il file e letto con un analizzatore scritto separatamente dal generatore. In fase di sviluppo lo stesso file e stato riletto con un lettore DXF indipendente in Python e ridisegnato: le travi sono alle ascisse yi = (i - (n-1)/2) s, la soletta misura B x t, i profili hanno le dimensioni del sagomario (raccordi come archi), le corsie corrispondono alla disposizione critica della tavola di calcolo.

V7 - Correzioni apportate alla versione precedente

- K dimezzato per carichi esattamente sul bordo libero (forza nodale di bordo): corretto, vedi V1.

- Coefficienti parziali: la versione precedente usava 1,30 / 1,50 / 1,50 (Tab. 2.6.I, edifici). Per i ponti NTC Tab. 5.1.V: gammaG1 = 1,35, gammaG2 = 1,50, gammaQ = 1,35 per i carichi da traffico. Ora sono i valori predefiniti e sono modificabili.

- Folla sui marciapiedi contemporanea allo schema 1: valore di combinazione 2,5 kN/m² (gruppo 1, Tab. 5.1.IV) al posto di 5,0 kN/m². Valore modificabile.

- Numero di corsie: ora secondo Tab. 5.1.I anche per carreggiate inferiori a 6 m (1 corsia se w < 5,40 m; 2 corsie da w/2 se 5,40 <= w < 6 m).

- Posizione delle corsie: la versione precedente non traslava mai il blocco delle corsie (escursione calcolata come carreggiata - carreggiata = 0) e metteva l'area rimanente sempre a destra. Ora il blocco scorre su tutta la carreggiata (17 posizioni), l'area rimanente sta ai due lati e le corsie sfavorevoli possono restare scariche.

- Rigidezza torsionale: la versione precedente poneva gamma_p = 0 e dimezzava alfa. Ora gamma_p = G·Jt/s + G·t³/6 (travi e soletta, secondo Massonnet e Bares) e gamma_e = G·t³/6; per Top Bridge gamma_p = G·Jt/s con Jt di Bredt.

- Inviluppo del tandem: posizioni degli assi esatte (asse sulla sezione) invece di una ricerca su 81 posizioni; freccia con tandem simmetrico in mezzeria.

- Nuova tipologia: elementi TOP BRIDGE affiancati, con scelta automatica del modulo e verifiche SLU/SLE dell'elemento.

- Travi in acciaio da sagomario (IPE, HEA, HEB, HEM) o saldate: J della sezione composta, Jt e peso calcolati in automatico (V8, V9) invece di essere assegnati a mano.

- Verifiche NTC 2018 delle travi in acciaio per ogni trave: fase di getto (resistenza e svergolamento), flessione plastica o elastica per classe, taglio e instabilita dell'anima, interazione M-V, connessione, tensioni e frecce per fasi (V9-V11).

- Calcestruzzo della soletta: la voce «C32/40» proponeva E = 34,1 GPa, che e il modulo del C35/45 (EN 1992-1-1 Tab. 3.1: C32/40 33,3 GPa). Ora Ecm e calcolato da fck con la formula NTC §11.2.10.3.

- Peso della soletta fresca e dei profili per area d'influenza delle travi non puntellate; disegno DXF della sezione (V12); relazione con frecce per fasi e deformata trasversale dell'impalcato.

Esito

Il solutore riproduce la soluzione esatta della piastra ortotropa (scarto relativo massimo 0,31% su K), le proprietà di reciprocità ed equilibrio e il limite di Courbon; con il procedimento dell'esempio pubblicato ne ritrova i coefficienti; il graticcio indipendente conferma la ripartizione per entrambi gli impalcati; il ricalcolo indipendente delle sollecitazioni NTC coincide entro lo 0,1%. Per gli elementi Top Bridge le resistenze coincidono con quelle dell'applicativo dedicato. Le travi in acciaio riproducono il sagomario entro 0,02% su A, Iy e Wpl e le formule chiuse indipendenti per sezione composta, resistenze, instabilita, frecce e tensioni (V8-V9); coincidono con l'applicativo Travi Miste per le grandezze comuni (V10); il DXF e conforme al formato R12 (V12). Restano ipotesi del metodo: prima armonica, sezione costante, assenza di traversi, taglio ripartito con i coefficienti del momento; per le travi non sono trattati fatica, gradienti termici, irrigidimenti, traversi e apparecchi d'appoggio.

Fonti: Massonnet C., Bares R., Le calcul des grillages de poutres et dalles orthotropes, Dunod 1966; Hambly E.C., Bridge Deck Behaviour, 2ª ed., 1991; ENSTP Alger, TD Méthode de Guyon-Massonnet (aprile 2020), pdfcoffee.com/guyon-massonet-pdf-free.html; Courbon J., 1940; D.M. 17/01/2018 cap. 5 e Circolare n. 7/2019; catalogo TOP SOL / TOP BRIDGE, Esse Team (esseteam.it/prodotto/top-sol-e-top-bridge).