Report di validazione

Programma «Travi Rastremate GL» v2.0 — calcolo di travi in legno lamellare rastremate e centinate e dei relativi giunti (NTC 2018, EN 1995-1-1, EN 1993-1-8)

Voce	Contenuto
Oggetto	Validazione del motore di calcolo della trave e dei giunti, della relazione PDF e del file DXF
Data	24/10/2026
Versione verificata	2.0 (2026-10), file travi-rastremate-giunti.html
Esito	**Validato** entro le tolleranze indicate, con le limitazioni del §9

1. Scopo e metodo

La validazione è stata condotta su cinque livelli indipendenti: (A) confronto con esempi numerici pubblicati in letteratura tecnica; (B) confronto con soluzioni analitiche in forma chiusa; (C) confronto codice-codice con una seconda implementazione delle stesse formule scritta indipendentemente in Python; (D) prove di convergenza della discretizzazione numerica; (E) prove funzionali dei file prodotti (PDF e DXF). Tutti i valori «programma» sono stati ottenuti eseguendo il file HTML consegnato in un browser Chromium senza interfaccia, chiamando le stesse funzioni usate dall'interfaccia.

Tolleranza di accettazione: ±3 % rispetto ai valori di letteratura (che sono arrotondati a 2–3 cifre significative); ±0,1 % per i confronti analitici e codice-codice.

2. Modifiche e correzioni apportate al programma

Argomento	Versione precedente	Versione 2.0	Effetto
Svergolamento	Formula approssimata $\sigma_{m,crit} = 0{,}78 \cdot b^2 \cdot E_{0,05}/(h \cdot l_{ef})$, valida per il legno massiccio di conifera (EC5 6.32)	Formula generale EC5 (6.31) con I_z, I_{tor}, $E_{0,05}$ e $G_{0,05}$; per il lamellare (E/G ≈ 17,7) la formula approssimata sovrastimava $\sigma_{m,crit}$ fino al 15 %	η_{LTB} +3…+4 % (lato sicurezza)
Volume della zona di colmo (boomerang)	Formula chiusa $b \cdot [\sin\beta \cdot \cos\beta \cdot (r_{in}+h_{ap})^2 - r_{in}^2 \cdot \beta]$, propria della trave curva ad altezza costante	Integrazione numerica dell'area delimitata dalle rette radiali nei punti di tangenza dell'arco (EC5 fig. 6.9)	V −5 %, $\eta_{t,90}$ −1 %
Classi di materiale	Solo GL24h, GL28h, GL32h	Tutte le classi EN 14080: GL20h…GL32h e GL20c…GL32c, con $G_{0,05}$	—
Coefficienti ψ	Fissati dalla categoria	ψ_0 e ψ_2 modificabili (proposti dalla categoria)	—
Compressione ⊥	$l_{ef} = l + 30$ mm sempre	$l_{ef} = l + \min(30\text{ mm}; l)$ come da EC5 6.1.5; nel giunto la verifica usa la larghezza netta (fresatura) e la piastra di base	—
Giunti	Assenti	Giunto d'appoggio (piastra inserita singola/doppia o scarpa a U, spinotti o bulloni) e giunto di colmo a momento: 13 verifiche EC5 cap. 8, All. A, EN 1993-1-8	nuovo
Relazione	Solo HTML da stampare	PDF vettoriale generato nel browser (font Unicode incorporati, indice, figure vettoriali, formule con valori sostituiti, distinta di taglio)	nuovo
DXF	Prospetto, lamelle, sezione rettangolare	Prospetto, pianta, sezioni A-A e B-B, dettagli dei giunti, assonometrie della trave e dei giunti, modello 3D (3DFACE), distinta di taglio, cartiglio, tipi di linea	nuovo

3. Confronto con casi di letteratura

3.1 Trave rastremata a due falde — Swedish Wood, «Design of timber structures», Vol. 3 (ed. 2016), Esempio 3.5

Dati: L = 20 m, b = 190 mm, h_s = 700 mm, h_{ap} = 1698 mm (α = 5,7°), GL30c, classe di servizio 1, γ_M = 1,25, k_{mod} = 0,8 (media durata). Carichi: g_k = 1,10 + 3,96 = 5,06 kN/m, s = 8,77 kN/m; combinazione $q_d = 1{,}2 \cdot g_k + 1{,}5 \cdot s$ = 19,23 kN/m (programma: 19,23 kN/m). Appoggio 190 × 360 mm, arcarecci ogni 2,4 m, ψ_2 = 0,1.

Grandezza	Letteratura	Programma	Scarto	Esito	Note
Sezione critica x_0 [m]	—	4,125	—	✓	formula chiusa 4,122
$\sigma_{m,d}(x_0)$ [MPa]	16,1	16,086	-0,1 %	✓	
$k_{m,\alpha}$	0,860	0,864	0,5 %	✓	
η flessione in x_0	0,970	0,970	-0,0 %	✓	16,1/16,5
$\sigma_{m,d}$ al colmo = $k_l \cdot 6M/(bh^2)$ [MPa]	12,6	12,567	-0,3 %	✓	
k_l	1,200	1,194	-0,5 %	✓	letto su grafico
η flessione al colmo	0,650	0,655	0,7 %	✓	
$\sigma_{t,90,d}$ [MPa]	0,210	0,210	0,1 %	✓	
$k_{dis} \cdot k_{vol}$	0,630	0,632	0,3 %	✓	la fonte indica «k_{vol}» = 0,63 già comprensivo di k_{dis} = 1,4
η trazione ⊥ al colmo	1,045	1,039	-0,5 %	✓	fonte: 0,21/0,20 con valori arrotondati
$\sigma_{c,90,d}$ all'appoggio [MPa]	2,600	2,595	-0,2 %	✓	l_{ef} = 360 + 30 mm
η compressione ⊥	0,930	0,927	-0,4 %	✓	
$\lambda_{rel,m}$ (svergolamento)	≤ 0,75	0,752	—	✓	k_{crit} = 0,996: effetto −0,4 %
w_{fin} [mm]	80,3	80,955	0,8 %	✓	fonte: L/249; programma L/247

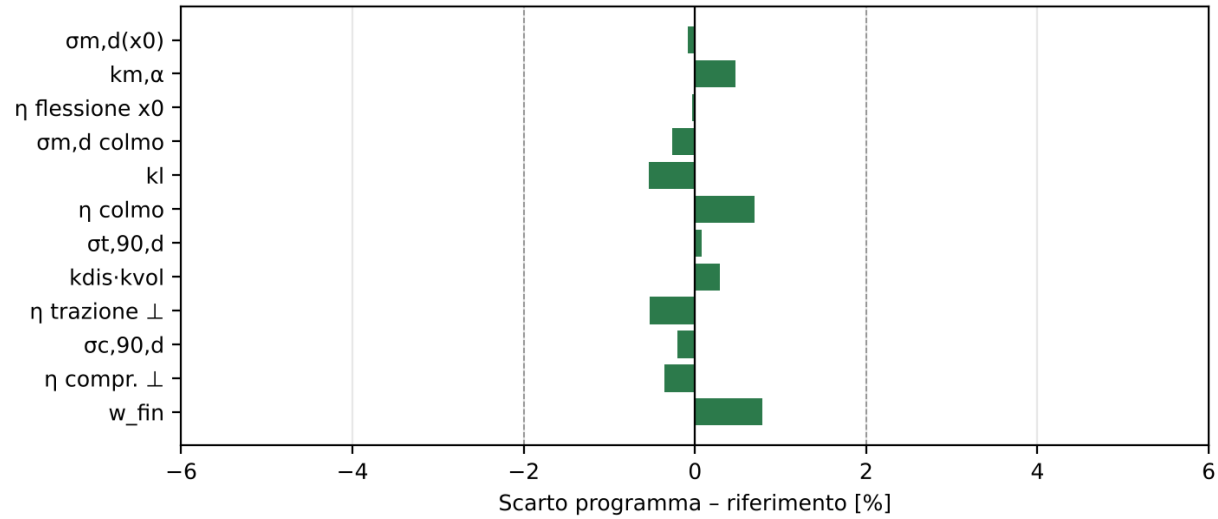

Fig. 1 — Scarti percentuali programma/letteratura per l'esempio 3.5 (linee tratteggiate: ±2 %). Tutti gli scarti sono inferiori all'1 %, compatibili con l'arrotondamento dei valori pubblicati.

3.2 Svergolamento di una trave in lamellare — Swedish Wood Vol. 3, Esempio 3.4

Dati: b = 115 mm, h = 630 mm, l_{ef} = 8,0 m, GL30c ($E_{0,05}$ = 10 800 MPa, $G_{0,05}$ = 540 MPa). L'ultima colonna riporta il valore che si otteneva con la formula approssimata della versione precedente: lo scarto del −7 % su λ conferma la necessità della correzione.

Grandezza	Letteratura	Programma v2.0	Scarto	Esito	Formula precedente (0,78·b²E/hl)
$\lambda_{rel,m}$	1,25	1,266	1,3 %	✓	1,165 (−6,8 %)
k_{crit}	0,62	0,611	-1,5 %	✓	0,686
W_y [10^6 mm³]	7,61	7,607	-0,0 %	✓	

3.3 Trave intagliata — Swedish Wood Vol. 3, Esempio 3.3

Dati: b = 90 mm, h = 315 mm, h_{ef} = 200 mm, x = 150 mm, i = 0, k_n = 6,5. Il programma calcola k_v = 0,410 (verifica manuale con EC5 (6.62): $k_v = 6{,}5/[\sqrt{315}\cdot(\sqrt{(0{,}635\cdot 0{,}365) + 0{,}8\cdot 150/315}\cdot\sqrt{(1/0{,}635 - 0{,}635^2)})] = 0{,}410$). Il testo della fonte conclude che la verifica dell'intaglio non è soddisfatta; con q_d = 5,1 kN/m su circa 5 m di luce si ottiene $\tau_d \approx 1{,}24$ MPa contro $k_v \cdot f_{v,d} \approx 0{,}92$ MPa: stessa conclusione. Il valore numerico di k_v non è leggibile nell'estratto della fonte, quindi il confronto è qualitativo.

3.4 Unione bullonata acciaio-legno — Swedish Wood Vol. 3, Esempio 4.3

Grandezza	Letteratura	Programma	Scarto	Esito
$f_{h,0,k}$ [MPa] (d = 16 mm, ρ_k = 390)	26,9	26,86	-0,1 %	✓
$F_{v,Rk}$ modo (k), piastre esterne sottili t = 8 mm = 0,5d [kN]	12,9	12,88	-0,2 %	✓
$F_{ax,Rk}$ rondella fittizia d_w = min(12t; 4d) = 64 mm [kN]	22,6	22,43	-0,8 %	✓

Lo scarto su $F_{ax,Rk}$ (−0,8 %) deriva dall'area della rondella: il programma deduce un foro d + 1 mm, la fonte il solo diametro d. La resistenza complessiva del bullone non è confrontabile: la fonte somma 12,9 + 2·22,6/4 = 24,2 kN, mentre il programma applica il limite EC5 8.2.2(2) che contiene l'effetto fune entro il 25 % del contributo di Johansen per ciascun piano di taglio (16,1 kN per piano, 32,2 kN per bullone a 2 piani). La differenza è di impostazione e non di calcolo: le grandezze elementari coincidono.

3.5 Resistenza a rifollamento e momento di snervamento — tabelle di progetto HSBI «Bemessungshilfen für Verbindungen nach EC5» (Schiermeyer/Wiesner, 2019)

GL24h (ρ_k = 385 kg/m³), spinotti S235 ($f_{u,k}$ = 360 MPa), forza parallela alla fibratura.

d [mm]	$f_{h,0,k}$ tabella	$f_{h,0,k}$ programma	scarto	$M_{y,Rk}$ tabella [Nmm]	$M_{y,Rk}$ programma	scarto
6	29,68	29,68	-0,01 %	11.392	11.392	0,00 %
8	29,04	29,04	0,02 %	24.069	24.069	-0,00 %
10	28,41	28,41	0,01 %	42.996	42.996	-0,00 %
12	27,78	27,78	0,01 %	69.071	69.071	-0,00 %
16	26,52	26,52	-0,00 %	145.927	145.927	0,00 %
20	25,26	25,26	-0,02 %	260.676	260.676	0,00 %
24	23,99	23,99	0,01 %	418.768	418.768	-0,00 %
30	22,10	22,10	-0,00 %	748.064	748.064	0,00 %

4. Confronto con soluzioni analitiche

Freccia di una trave prismatica ($h_s = h_{ap}$ = 800 mm, b = 200 mm, L = 10 m, q = 5 kN/m, GL24h): soluzione chiusa $w = 5qL^4/(384EI) + \chi qL^2/(8GA) = 6{,}634 + 0{,}721 = 7{,}3554$ mm; integrazione numerica del programma 7,3554 mm (scarto -0,000 %).

Sezione critica a flessione: $x_0 = L\cdot h_s/(2h_{ap})$ (2 falde) e $x_0 = L/(1 + h_{ap}/h_s)$ (1 falda), confrontata con la ricerca numerica su 960 conci (risoluzione 16,7 mm).

Tipo	h_s	h_{ap}	x_0 numerico [m]	x_0 analitico [m]	scarto
double	600	1200	4,0000	4,0000	0,00 %
mono	600	1200	5,3333	5,3333	0,00 %

Tipo	h_s	h_{ap}	x_0 numerico [m]	x_0 analitico [m]	scarto
double	500	1500	2,6667	2,6667	0,00 %
mono	500	1500	4,0000	4,0000	0,00 %
double	700	1000	5,6000	5,6000	0,00 %
mono	700	1000	6,5833	6,5882	-0,07 %

Limite boomerang → due falde: per $r_{in} \to \infty$ i coefficienti di colmo della trave centinata devono tendere a quelli della trave a intradosso rettilineo ($h_{ap}/r \to 0$). Trave a 2 falde: k_l = 1,1354, k_p = 0,0150.

β	r_{in}	k_l boomerang	k_p boomerang
0,50°	500 m	1,1489	0,01662
0,20°	2.000 m	1,1396	0,01548
0,05°	8.000 m	1,1364	0,01512
0,01°	40.000 m	1,1356	0,01502

5. Confronto codice-codice con implementazione indipendente

Le verifiche della trave e dei giunti sono state riscritte da zero in Python (file indep.py), partendo dalle formule normative e con una discretizzazione diversa (2000 conci; volume del colmo del boomerang integrato per fasce verticali invece che con il poligono). Sono stati esaminati tre casi: (a) trave a 2 falde con giunti predefiniti; (b) trave a 2 falde con scarpa a U, bulloni 8.8, trave appesa e giunto di colmo con una piastra; (c) trave a boomerang.

(a) 2 falde, configurazione predefinita

Verifica	η programma	η Python	scarto
flex	0,8070	0,8070	0,000 %
apexm	0,6492	0,6492	0,000 %
apext	0,5487	0,5487	0,000 %
shear	0,8778	0,8778	0,000 %
c90	0,8183	0,8183	0,000 %
ltb	0,8082	0,8082	0,000 %
ja_grp	0,2276	0,2276	0,000 %
ja_shear	0,9490	0,9490	0,000 %
ja_c90	0,7016	0,7016	0,000 %
ja_weld	0,1259	0,1259	0,000 %
jc_cont	0,5999	0,5999	0,000 %
jc_grp	0,6797	0,6797	0,000 %
jc_plate	0,2135	0,2135	0,000 %
jc_split	0,4367	0,4367	-0,000 %

(b) 2 falde, scarpa a U con bulloni, trave appesa

Verifica	η programma	η Python	scarto
flex	0,8070	0,8070	0,000 %
apexm	0,6492	0,6492	0,000 %
apext	0,5487	0,5487	0,000 %
shear	0,8778	0,8778	0,000 %
c90	0,8183	0,8183	0,000 %
ltb	0,8082	0,8082	0,000 %
ja_grp	0,5739	0,5739	0,000 %
ja_split	0,9742	0,9742	-0,000 %
ja_shear	1,0129	1,0129	0,000 %
ja_weld	0,1291	0,1291	0,000 %
jc_cont	0,5999	0,5999	0,000 %
jc_grp	1,1348	1,1348	0,000 %
jc_plate	0,4486	0,4486	0,000 %
jc_split	0,4180	0,4180	0,000 %

(c) boomerang

Verifica	η programma	η Python	scarto
flex	0,8721	0,8721	-0,000 %
apexm	0,7562	0,7562	0,000 %
apext	1,4718	1,4718	0,000 %
shear	0,8752	0,8752	0,000 %
c90	0,8158	0,8158	0,000 %
ltb	0,8783	0,8782	0,012 %
ja_grp	0,2276	0,2276	0,000 %
ja_shear	0,9461	0,9461	0,000 %
ja_c90	0,6995	0,6995	0,000 %
ja_weld	0,1259	0,1259	0,000 %
jc_cont	0,5981	0,5981	0,000 %
jc_grp	0,6777	0,6777	0,000 %
jc_plate	0,2128	0,2128	0,000 %
jc_split	0,4367	0,4367	-0,000 %

Scarto massimo su 42 confronti: 0,012 %. Le due implementazioni coincidono; questo controllo esclude errori di programmazione ma non errori di interpretazione comuni a entrambe, che sono coperti dai §3 e §4.

6. Convergenza numerica ed effetto delle correzioni

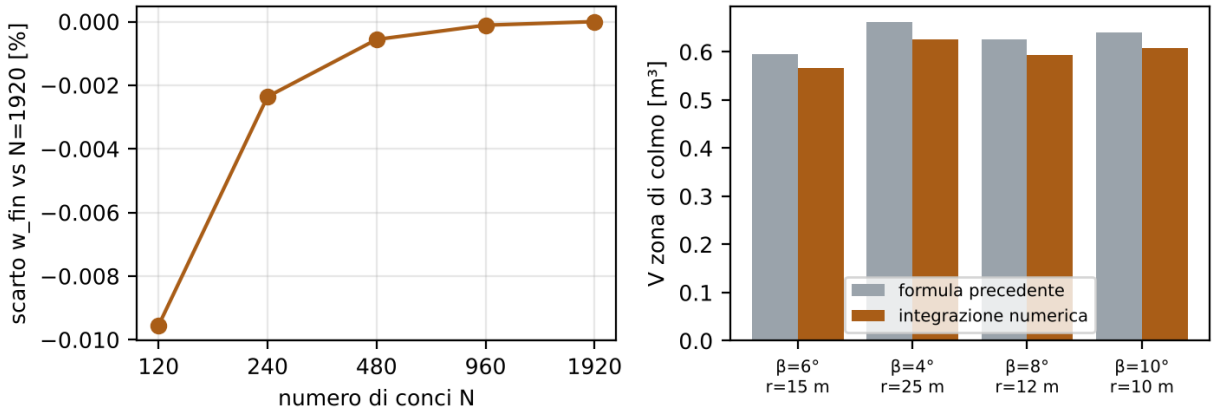

Fig. 2 — A sinistra: convergenza della freccia finale con il numero di conci (480 conci, valore usato dal programma, comporta un errore < 0,001 %). A destra: volume della zona di colmo del boomerang con la formula precedente e con l'integrazione numerica.

Confronto tra versione precedente e versione 2.0 sui dati predefiniti (sono elencate solo le verifiche il cui valore cambia; tutte le altre restano identiche):

Trave	Verifica	η prima	η v2.0	variazione
2 falde	Svergolamento	0,782	0,808	3,3 %
Boomerang	Trazione ⊥ al colmo	1,487	1,472	-1,0 %
Boomerang	Taglio + trazione ⊥	1,588	1,573	-0,9 %
Boomerang	Svergolamento	0,850	0,878	3,3 %
1 falda	Svergolamento	1,144	1,158	1,3 %

7. Prove funzionali dei file prodotti

Prova	Esito della prova	Esito
Relazione PDF	Generata per 5 configurazioni (2 falde, 1 falda, boomerang; piastra singola, doppia, scarpa a U; spinotti e bulloni). 13–14 pagine A4; controllo strutturale qpdf senza errori; testo estraibile (pdftotext) grazie alla mappa ToUnicode; indice con collegamenti; formule con pedici e simboli greci resi correttamente.	✓
Disegno DXF	Formato R12 (AC1009) analizzato con un lettore indipendente: coppie codice/valore valide, sezioni HEADER/TABLES/ENTITIES complete, 20 layer, 4 tipi di linea. Caso predefinito: 731 LINE, 113 POLYLINE, 114 CIRCLE, 221 TEXT, 904 3DFACE. Viste verificate visivamente: prospetto, pianta, sezioni A-A e B-B, dettagli, assonometrie, modello 3D, distinta, cartiglio.	✓
Distinta di taglio	Volume lordo delle lamelle 2,356 m³ contro 2,304 m³ della trave (+2,3 %): la distinta usa la lunghezza dello spigolo inferiore di ogni lamella, cioè il pezzo da tagliare prima della sagomatura dell'estradosso. Masse delle piastre = L·H·t·7850 kg/m³ verificate a mano (P1: 0,26·0,28·0,010·7850 = 5,71 kg).	✓
Interfaccia	Nessun errore JavaScript nel caricamento e nel ricalcolo per tutte le configurazioni provate.	✓

8. Considerazioni sui modelli dei giunti

Il giunto d'appoggio usa esclusivamente formule normative (EC5 8.2.3, 8.1.4, 8.5.1, All. A; EN 1993-1-8 tab. 3.4 e §4.5.3.3), le cui grandezze elementari sono validate ai §3.4–3.5. Il giunto di colmo a momento adotta un modello di equilibrio a coppia interna (compressione per contatto su un'altezza h_c definita dal progettista, trazione affidata alla piastra inferiore con spinotti): è un modello ingegneristico corrente, verificato per equilibrio e con il confronto codice-codice, per il quale non è stato reperito un esempio numerico pubblicato da usare come riferimento.

9. Limitazioni

• Per le travi centinate a boomerang non è stato reperito un esempio pubblicato completo; la validazione si basa sul limite verso la trave a 2 falde, sul confronto codice-codice e sulle stesse formule EC5 validate per la trave a 2 falde.

• La rottura a blocco (EC5 All. A) è calcolata con una suddivisione degli elementi lignei per piano di taglio; per configurazioni con due piastre interne è una semplificazione cautelativa.

• Il rifollamento delle piastre usa le distanze minime tra fori e bordi in tutte le direzioni (a favore di sicurezza).

• Non sono verificati: ancoraggi della piastra di base alla sottostruttura, resistenza al fuoco, azioni sismiche, rinforzi a trazione perpendicolare.

• Le fonti di letteratura sono state consultate in forma testuale estratta; dove un valore non era leggibile il confronto è stato dichiarato qualitativo.

10. Conclusioni

Le verifiche della trave riproducono l'esempio pubblicato di trave a 2 falde con scarti inferiori all'1 % su tutte le 14 grandezze confrontate; le grandezze elementari dei collegamenti coincidono con le tabelle di progetto e con l'esempio di letteratura entro lo 0,8 %; le soluzioni analitiche sono riprodotte con scarti inferiori allo 0,01 %; la seconda implementazione indipendente coincide su tutti i 42 confronti. Le correzioni introdotte (svergolamento con la formula generale, volume del colmo del boomerang) sono confermate dal confronto con la letteratura. Il programma è ritenuto validato per l'uso previsto, fermo restando il controllo e la firma del progettista abilitato.

Riferimenti

• Swedish Wood, Design of timber structures – Volume 3: Examples, ed. 2016, esempi 3.3, 3.4, 3.5, 4.3. https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/design-of-timber-structures-3-2016.pdf

• Swedish Wood, Design of timber structures – Volume 3, ed. 2022. https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/sw-design-of-timber-structures-vol3-2022.pdf

• Schiermeyer, Wiesner, Bemessungshilfen für Verbindungen nach EC5, HSBI Campus Minden, 2019. https://www.hsbi.de/media/fachbereiche/campus-minden/ueber-uns/labore-lehrgebiete/labore/labor-konstruktiver-ingenieurbau/leporello/leporello-2-verbindungsmittel-ec5-nach-einfuehrungserlass-in-nrw-bsh-nach-din-en-14080-anpassungen-2019-09.pdf

• UNI EN 1995-1-1:2014 Eurocodice 5 — Progettazione delle strutture di legno; UNI EN 1993-1-8; UNI EN 14080:2013.

• D.M. 17/01/2018 (NTC 2018) e Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019; CNR-DT 206 R1/2018.