

Sezioni avanzate

Modellazione di sezioni complesse in SectionPro

Applicazione alla sezione in appoggio di un ponte a cassone precompresso

BridgeKernel · 2026

I Introduzione

Le sezioni standard di travi, pilastri e pareti sono generalmente descritte da un unico contorno e da un'armatura uniforme. Le strutture reali spesso combinano diversi materiali, vuoti, strati di rinforzo separati, cavi di precompressione o elementi in acciaio incorporati. La loro analisi richiede una rappresentazione che preservi sia la geometria che la legge costitutiva di ogni componente.

Le sezioni avanzate di SectionPro rispondono a questa esigenza. Una sezione avanzata è composta da domini geometrici, armatura passiva, acciaio da precompressione, profili in acciaio strutturale e lamiere sottili. A ciascun componente viene assegnata la legge del materiale utilizzata nelle analisi. La stessa descrizione viene quindi impiegata per calcolare le proprietà della sezione, verificare tensioni e deformazioni sotto le sollecitazioni di sezione applicate, calcolare l'apertura delle fessure e generare i domini di interazione.

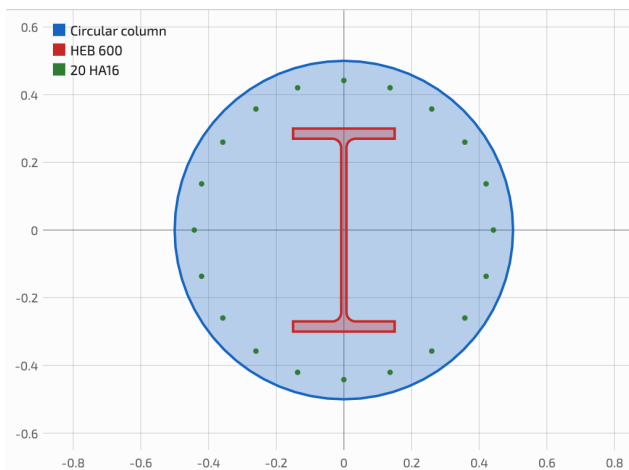
Questo articolo presenta innanzitutto il modello dati di una sezione avanzata. Come esempio viene quindi utilizzata una sezione critica in appoggio di un ponte a cassone in calcestruzzo precompresso. Questa geometria combina un grande vuoto, armature distribuite su più facce e gruppi di cavi in un unico modello.

I Definizione di una sezione avanzata

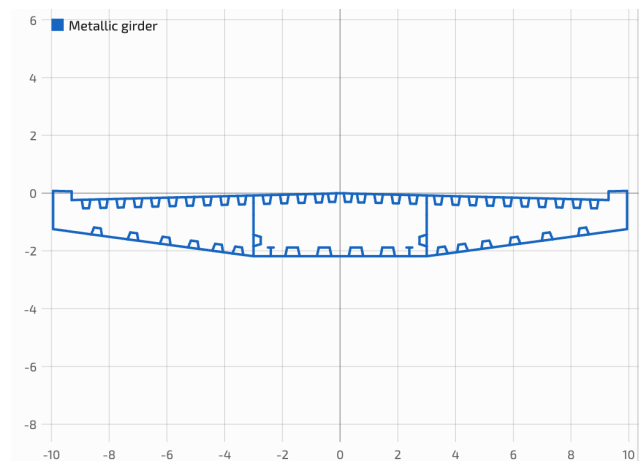
Una sezione avanzata riunisce diverse famiglie di oggetti meccanici. Il solutore conserva la loro posizione nel sistema di riferimento della sezione e ne valuta il contributo mediante la legge assegnata a ciascun oggetto.

- Un dominio geometrico, o GeoDomain, è definito da un contorno esterno e può contenere diversi vuoti. Una sezione può contenere più domini, ciascuno con la propria legge del materiale.
- L'armatura passiva è organizzata in strati indipendenti. Ogni barra possiede una posizione, un diametro e una legge dell'acciaio, consentendo di rappresentare separatamente strati, facce e qualità di acciaio.

- L'acciaio da precompressione è raggruppato in famiglie di cavi definite da posizione, area, parametri di aderenza e stato iniziale.
- I profili in acciaio strutturale possono essere selezionati dalla libreria integrata di 535 riferimenti, che copre undici famiglie europee: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP e profili cavi quadrati, rettangolari e circolari. Possono essere rappresentati mediante un GeoDomain integrato sull'area reale, compresi raccordi curvi e arrotondamenti, oppure mediante un insieme di elementi TSP.
- Un elemento TSP descrive la linea media rettilinea o curva di una lamiera e il suo spessore. Il contributo è ottenuto mediante integrazione lineare, assumendo una tensione uniforme nello spessore. Questa rappresentazione è adatta a lamiere sottili, profili in acciaio strutturale e cassoni multicellulari.
- Le leggi dei materiali sono assegnate direttamente ai componenti. Possono utilizzare i modelli normativi forniti da SectionPro oppure una relazione generale tensione-deformazione definita dall'utente per gli stati limite considerati.



Colonna composita: calcestruzzo, sezione HEB e armatura passiva.

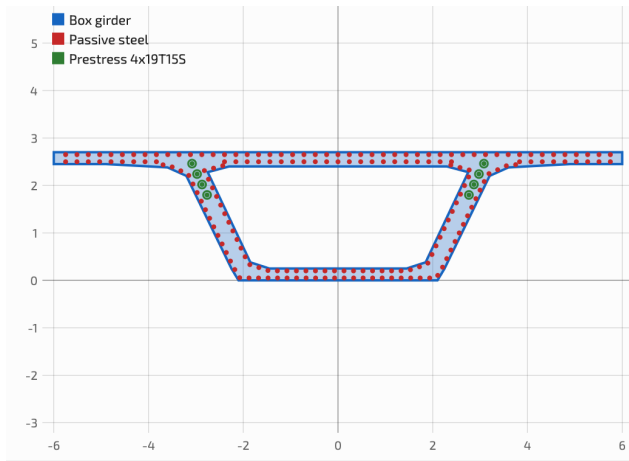


Trave scatolare in acciaio: 267 elementi TSP e 51 celle Bredt.

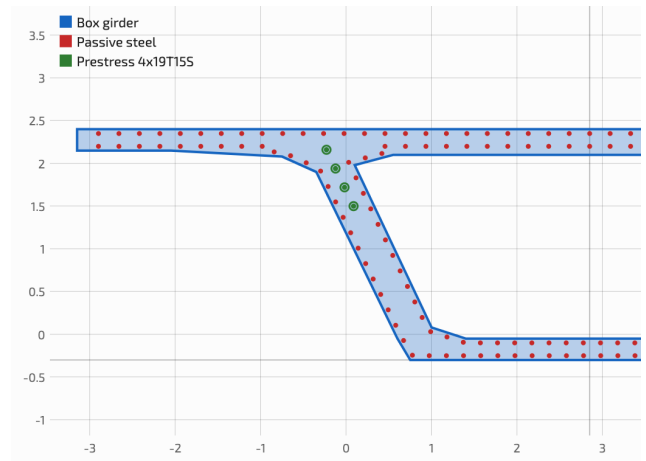
Figura 1: Esempi di sezioni avanzate visualizzate in SectionPro.

! Esempio: ponte a cassone

La sezione studiata è una sezione critica in appoggio di un cassone monocellulare. È larga 12,00 m e alta 2,70 m. La soletta superiore, le anime inclinate, i raccordi e la soletta inferiore formano un unico dominio di calcestruzzo. La cella centrale è definita come vuoto interno.



(a) Vista generale della sezione.



(b) Dettaglio del raccordo superiore sinistro.

Figura 2: Modello SectionPro: dominio in calcestruzzo, armatura passiva e gruppi di precompressione.

Componente	Materiale	Definizione nell'esempio
GeoDomain 1	Calcestruzzo C45/55	Contorno del cassone, una cella interna, area lorda 6,759 m ²
Armatura passiva	B500B	186 barre HA16 distribuite a 50 mm dalle superfici del calcestruzzo
Precompressione	Y1860	Otto cavi 19T15S, quattro lungo ciascuna anima, 2,850 mm ² per cavo e guaine da 100 mm

La sezione contiene 186 barre di armatura e otto cavi di precompressione. Le quattro guaine lungo ciascuna anima sono allineate con la direzione dell'anima e si estendono nel raccordo superiore. Le coordinate sono generate tramite script e salvate nel file della sezione avanzata. Lo stesso file viene utilizzato per tutte le analisi presentate di seguito.

| Sollecitazioni di sezione e precompressione

Il vettore complessivo delle sollecitazioni di sezione è scomposto negli effetti dei carichi permanenti G , dei carichi variabili Q e della precompressione P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Per la sezione considerata, il modello strutturale agli elementi finiti sviluppato nel nostro software LFEM fornisce i seguenti vettori delle sollecitazioni $G + Q$, in MN e MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{SLE}} = (0; -58,650; 0)$ e $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{SLU}} = (0; -92,650; 0)$.

In SectionPro, la precompressione è considerata a due livelli. La sua azione sulla struttura, compresi l'effetto primario e l'eventuale effetto secondario, deve essere inclusa nel vettore delle sollecitazioni applicato. La simmetria trasversale della sezione e del tracciato dei cavi annulla qui il momento rispetto a y ; pertanto $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{primario}} + M_{z,P}^{\text{secondario}}, 0)$.

La tensione effettiva del tendine definisce lo stato iniziale associato all'azione di precompressione. Nel calcolo della resistenza, lo stato di deformazione di equilibrio modifica quindi la tensione del tendine: l'allungamento produce un incremento positivo della tensione e aumenta il contributo del tendine, mentre l'accorciamento produce una diminuzione della tensione.

Nell'esempio, la tensione efficace dopo le perdite è pari a 1116 MPa. L'azione corrispondente produce una forza assiale di 25,445 MN. Nella sezione in appoggio, i cavi si trovano al di sopra del baricentro e

generano quindi un momento primario di $+8,994 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Per questo tracciato, il modello strutturale fornisce un momento secondario dello stesso segno, pari a $+4,400 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Il momento di precompressione introdotto nella sezione vale pertanto $+13,394 \text{ MN} \cdot \text{m}$.

Vettore finale delle sollecitazioni	$N \text{ [MN]}$	$M_z \text{ [MN} \cdot \text{m]}$	$M_y \text{ [MN} \cdot \text{m]}$
SLE	25,445	-45,256	0,000
SLU	25,445	-79,256	0,000

Risultati sul modello completo

Caratteristiche meccaniche

SectionPro calcola le proprietà delle sezioni lorda, netta e omogeneizzata. In questo esempio, dalla sezione netta vengono sottratte soltanto le guaine di precompressione; l'armatura passiva viene mantenuta. Nella sezione omogeneizzata, sia l'acciaio passivo sia quello da precompressione utilizzano il coefficiente di omogeneizzazione $n = 5$.

Sezione	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$y_G \text{ [m]}$	$I_{zz} \text{ [m}^4\text{]}$	$I_{yy} \text{ [m}^4\text{]}$
Lorda	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Netto	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Omogeneizzato	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

Di seguito sono riportate le proprietà di torsione e taglio della sezione lorda.

$J \text{ [m}^4\text{]}$	$A_{sy} \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{sz} \text{ [m}^2\text{]}$	$y_T \text{ [m]}$	$\Gamma \text{ [m}^6\text{]}$
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

Il campo mostrato di seguito corrisponde alle tensioni tangenziali prodotte da un momento torcente unitario.

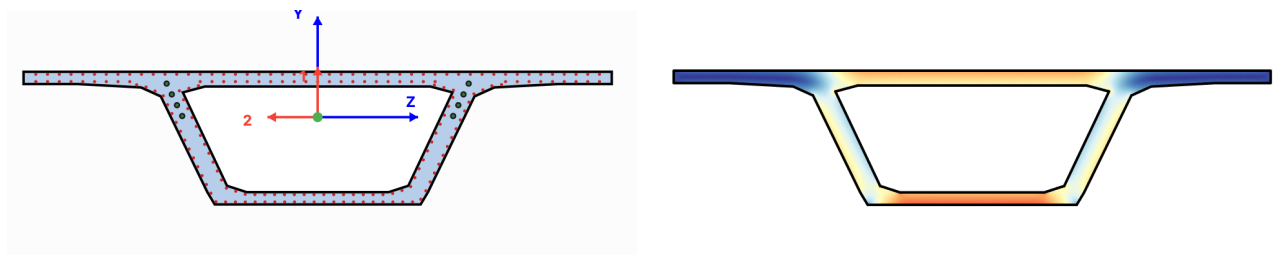


Figura 3: Assi baricentrici e principali (a sinistra) e campo di tensioni tangenziali per torsione unitaria (a destra).

Equilibrio allo SLE e allo SLU

Il solutore determina lo stato deformativo della sezione che equilibra le sollecitazioni applicate. Le tensioni sono quindi ricavate dalle rispettive leggi costitutive del calcestruzzo, dell'armatura passiva e dei cavi. I risultati presentati corrispondono alla combinazione caratteristica allo SLE e alla combinazione fondamentale allo SLU.

Per i cavi, la tensione finale è valutata a partire dalla deformazione cumulata $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. Il termine ε_0 è la deformazione associata alla tensione efficace di 1116 MPa; $\Delta\varepsilon_1$ rappresenta l'eventuale decompressione del calcestruzzo adiacente al cavo; $\Delta\varepsilon_2$ è la deformazione ottenuta dall'equilibrio della sezione. In questo esempio l'effetto di decompressione è attivato.

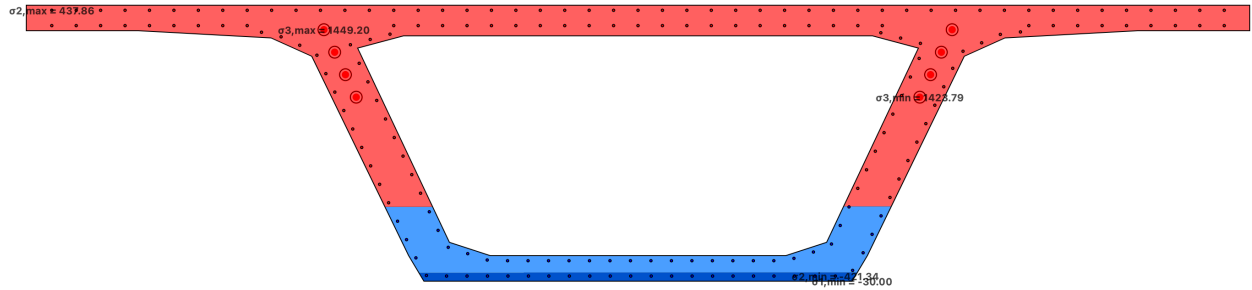


Figura 4: Campo di tensioni normali allo SLU ottenuto dalla verifica non lineare del vettore finale delle sollecitazioni.

Risultato	Unità	SLE caratteristico	SLU fondamentale
Calcestruzzo			
Deformazione minima, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	-0,531	-2,262
Tensione minima, $\sigma_{b, \min}$	MPa	-19,264	-30,000
Acciai passivi			
Deformazione minima, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	-0,512	-2,107
Deformazione massima, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Tensione minima, $\sigma_{s, \min}$	MPa	-102,31	-421,34
Tensione massima, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Precompressione			
Deformazione minima, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Tensione totale minima, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Incremento minimo di tensione, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Deformazione massima, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Tensione totale massima, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Incremento massimo di tensione, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Risoluzione			
Iterazioni		4	6
Residuo di convergenza		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Convergenza		SÌ	SÌ

Allo SLU fondamentale, il calcestruzzo della soletta inferiore raggiunge localmente il plateau plastico in compressione, mentre nella soletta superiore e nella parte alta delle anime si sviluppa un'importante zona tesa. I cavi sono fortemente mobilitati, con incrementi di tensione compresi tra 307,8 e 333,2 MPa.

Allo SLE caratteristico, le verifiche tensionali sono soddisfatte: la massima tensione di compressione nel calcestruzzo è 19,264 MPa, la massima tensione di trazione nell'armatura passiva è 99,09 MPa e la massima tensione totale nei cavi è 1198,23 MPa. L'apertura della fessura, $w_k = 0,174$ mm, rimane contenuta anche se qui è valutata con la combinazione caratteristica.

Domini di interazione

La geometria avanzata e le leggi dei materiali sono utilizzate anche per calcolare i domini di resistenza. La curva $N-M_z$ è una sezione del dominio per $M_y = 0$. La superficie $N-M_z-M_y$ estende il calcolo a tutte le direzioni di flessione.

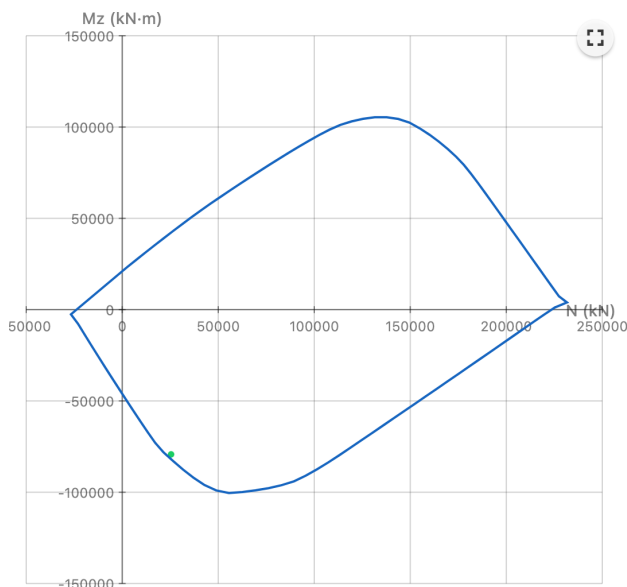


Figura 5: Curva di interazione $N-M_z$ allo SLU per $M_y = 0$, con il vettore finale delle sollecitazioni.

La tabella seguente fornisce il riquadro di delimitazione della superficie di interazione, definita dai valori minimo e massimo di ciascuno dei suoi tre componenti.

Componente	Minimo	Massimo
N	-26,70 MN	231,62 MN
M_z	-100,41 MN · m	105,35 MN · m
M_y	-287,82 MN · m	287,82 MN · m

Le capacità positive e negative rispetto a M_y coincidono, come previsto dalla simmetria trasversale della sezione. La differenza tra le capacità positive e negative rispetto a M_z riflette la diversa geometria e armatura delle solette superiore e inferiore. Il vettore finale delle sollecitazioni si trova molto vicino al confine del dominio di resistenza. Il modulo di distanza dal dominio fornisce $FS = 0,983$: un valore leggermente inferiore all'unità, ma molto vicino al limite.

Prestazioni

La tabella seguente riporta i tempi di esecuzione delle chiamate al nucleo di SectionPro per il modello del cassone. Questi valori escludono l'interfaccia grafica e la rappresentazione dei risultati.

Analisi	Tempo di calcolo
Caratteristiche meccaniche	28,3 ms
Stato di tensioni e deformazioni	0,73 ms
Calcolo dell'apertura della fessura	2,38 ms
Curva di interazione $N-M_z$, 200 punti	1,11 ms
Superficie di interazione $N-M_z-M_y$, maglia 50×50	208 ms

Questi risultati illustrano uno dei punti di forza di SectionPro: l'ampia ottimizzazione del nucleo mantiene i tempi di calcolo estremamente bassi, anche per le analisi non lineari e la costruzione dei domini di resistenza tridimensionali. Le verifiche e le iterazioni di progetto restituiscono quindi un risultato quasi immediato, contribuendo direttamente alla fluidità dell'esperienza utente.

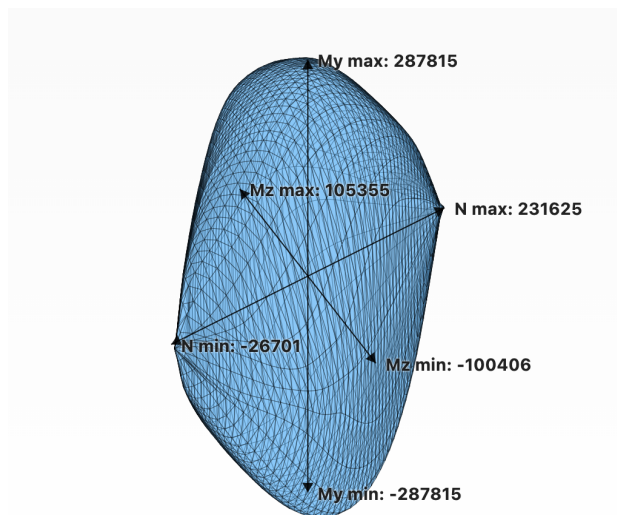


Figura 6: Superficie di interazione $N-M_z-M_y$ allo SLU.

Conclusione

Le sezioni avanzate combinano in un unico modello diversi domini geometrici e i relativi vuoti, strati di armatura passiva, gruppi di acciaio da precompressione, profili in acciaio strutturale e lamiere sottili. Ciascun componente mantiene la propria legge del materiale nei diversi stati limite.

Il cassone studiato illustra questa rappresentazione. La sezione in appoggio combina un dominio di calcestruzzo con un vuoto interno, armature distribuite sulle facce e cavi di precompressione disposti lungo le anime. La precompressione entra nel vettore delle sollecitazioni applicato attraverso gli effetti primario e secondario. Il contributo resistente dei cavi è valutato a partire dalla variazione della loro tensione, tenendo conto della precompressione iniziale, dell'eventuale decompressione del calcestruzzo adiacente e dello stato deformativo di equilibrio della sezione.

La modalità avanzata può quindi analizzare praticamente qualsiasi sezione trasversale, indipendentemente dalla complessità geometrica o dai materiali con cui è assemblata. Questa generalità rimane naturalmente soggetta alle ipotesi dell'analisi della sezione trasversale, in particolare che le sezioni piane rimangano piane e che i componenti collegati soddisfino la compatibilità di deformazione. Grazie al nucleo di calcolo ottimizzato, anche questi modelli dettagliati mantengono tempi di risposta quasi istantanei.