



Curve di interazione

Tutorial SectionPro: diagrammi di interazione 2D classici
con verifica delle combinazioni di carico

BridgeKernel · 2026

Introduzione

Il modulo delle curve di interazione calcola i diagrammi di interazione 2D classici per sezioni in calcestruzzo armato. Fissando una componente di sollecitazione (N , M_z o M_y) a un valore scelto, SectionPro calcola la frontiera di resistenza nel piano delle due componenti rimanenti. Le combinazioni di carico vengono distribuite sul grafico: i carichi interni alla curva appaiono in **verde** (verificati), quelli esterni in **rosso** (non verificati). Il controllo visivo è diretto, senza calcolo di fattori di sicurezza numerici.

Sono disponibili due modalità. Nella modalità a componente fissa, una componente è impostata a un valore specifico (ad es. $N = 0$) e la curva è tracciata nel piano rimanente. Il valore fisso deve essere compreso nel dominio di resistenza della sezione, altrimenti non esiste alcuna curva a quel livello.

Nella modalità involuppo, SectionPro traccia due curve: una per il valore massimo della componente fissa su tutte le combinazioni di carico, e una per il valore minimo. Ciò consente di verificare più casi di carico in un'unica figura, senza generare una curva separata per ciascun valore. I valori della componente fissa devono essere compresi nel dominio di resistenza. In questa modalità viene usato un terzo colore:

- **Verde**: interno a entrambe le curve, verificato a entrambi gli estremi della componente fissa.
- **Rosso**: esterno a entrambe le curve, non verificato a entrambi gli estremi.
- **Grigio**: tra le due curve, incerto. Lo stato del carico dipende dal valore effettivo della componente fissa; è necessaria una verifica più precisa con la modalità a componente fissa, la superficie 3D o il solutore di equilibrio.

Risultati calcolati

Curva di interazione

Componente fissa (N , M_z o M_y)
Frontiera di resistenza 2D chiusa
Modalità involuppo (min/max)

Verifica visiva

Punti di carico distribuiti sul grafico
Verde (verificato) / Rosso (non verific.) / Grigio (incerto)

Esportazioni

PDF: curva 2D + carichi distribuiti
XLS: coordinate della curva
TXT: risultati tabulari (colonne)

Sezione ottagonale (Eurocode 2)

Dati di input

La geometria della sezione, l'armatura e le leggi dei materiali sono identiche a quelle degli articoli #4-6:

Calcestruzzo

- Sezione trasversale ottagonale
- $b_1 = 2.00$ m, $b_2 = 0.50$ m
- $h_1 = 1.00$ m, $h_2 = 0.60$ m

Armatura

- 48 barre, interasse uniforme 150 mm
- Diametro $\varphi = 32$ mm, copriferro 50 mm

Leggi dei materiali (EC2)

- Calcestruzzo C30/37: $f_{ck} = 30$ MPa
- Acciaio B500B: $f_{yk} = 500$ MPa

The screenshot shows a 'Data' window for an 'Octagonal solid section'. Under 'Concrete', the parameters are: Width b1 (m) = 2, Width b2 (m) = 0.5, Height h1 (m) = 1, and Height h2 (m) = 0.6. Under 'Reinforcement', the mode is 'uniform spacing', with Bar spacing (mm) = 150, Bar diameter (mm) = 32, Concrete cover (mm) = 50, and Layers (1 or 2) = 1. There are 'Submit' and 'Infos' buttons. Below the form is a diagram of the octagonal section with reinforcement bars.

Figura 1: Sezione trasversale ottagonale.

Curve di interazione

La prima curva mostra la capacita' di flessione biassiale a forza assiale nulla ($N = 0$) allo stato limite di esercizio (SLE-C), mentre la seconda mostra la classica interazione forza assiale-flessione a momento fuori piano nullo ($M_y = 0$) allo stato limite ultimo (SLU-F).

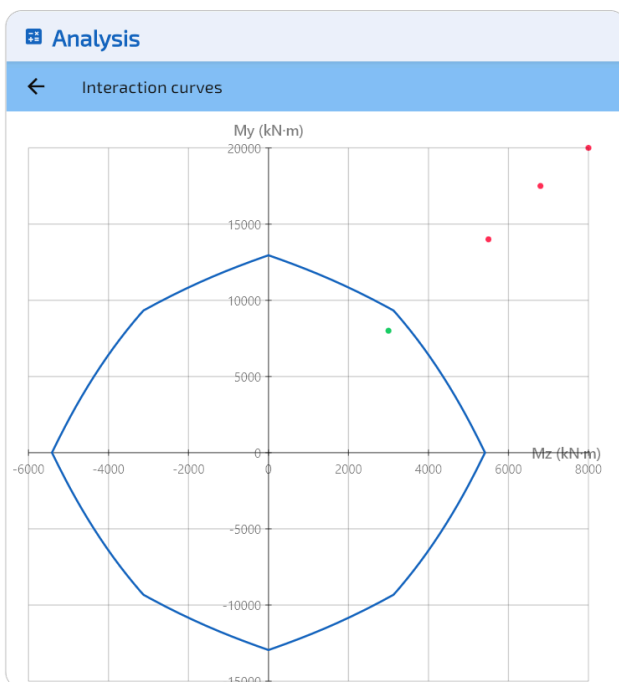


Figura 2: Esercizio (caratteristica): M_z - M_y a $N = 0$.

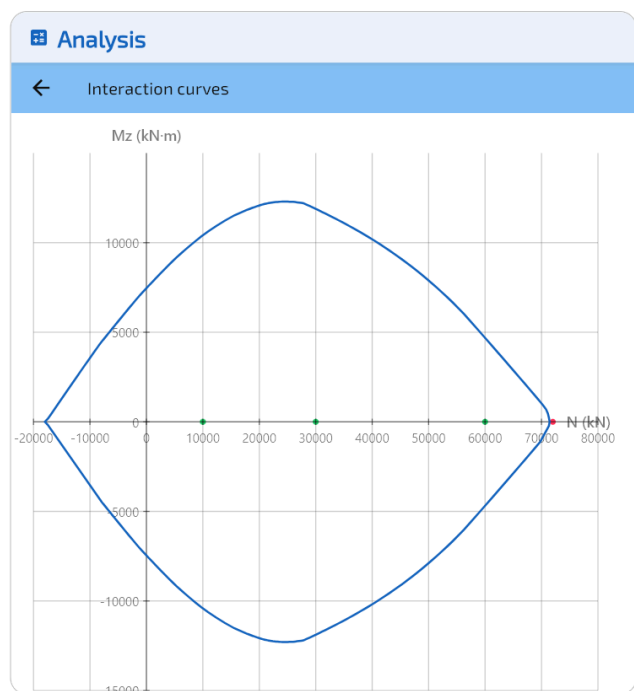


Figura 3: Ultimo (fondamentale): N - M_z a $M_y = 0$.

Le 30 combinazioni di carico sono le stesse dell'articolo sulle distanze (15 SLU-F, 15 SLE-C). Tutti i carichi verdi avevano $\eta < 1$ nell'analisi 3D, e tutti i carichi rossi avevano $\eta > 1$: le curve 2D sono pienamente coerenti con i risultati delle distanze 3D.

Modalita' involuppo

La modalita' involuppo richiede che la componente fissa di ogni combinazione sia compresa nel dominio di resistenza. Alcuni dei 30 carichi originali superano la capacita' della sezione: ad esempio, il carico #4 allo SLU-F ha $N = 72000$ kN mentre la resistenza assiale e' circa 70700 kN. Questi carichi sono esclusi dalla modalita' involuppo; viene quindi usato un insieme ridotto di carichi interni.

Le due figure mostrano l'involuppo per lo SLE (N come componente fissa, piano M_z-M_y) e lo SLU (M_y come componente fissa, piano $N-M_z$). Ogni involuppo e' composto da due curve: una al valore minimo e una al valore massimo della componente fissa.

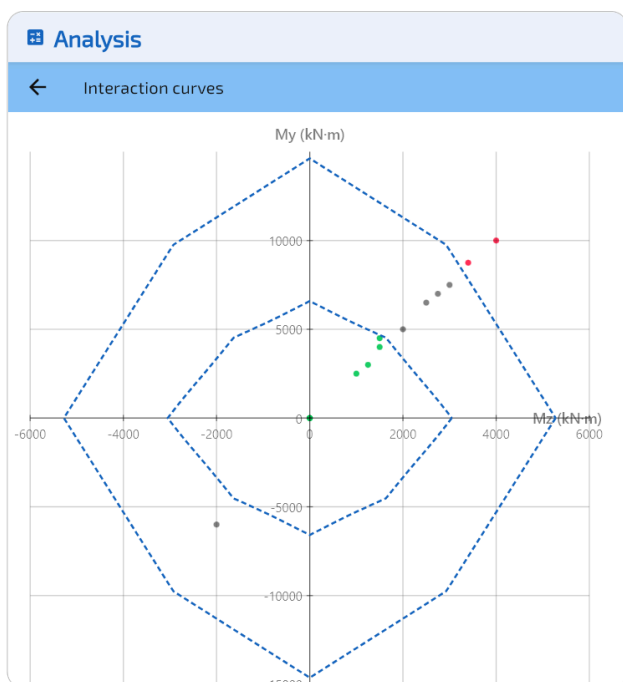


Figura 4: Esercizio: involuppo su N .

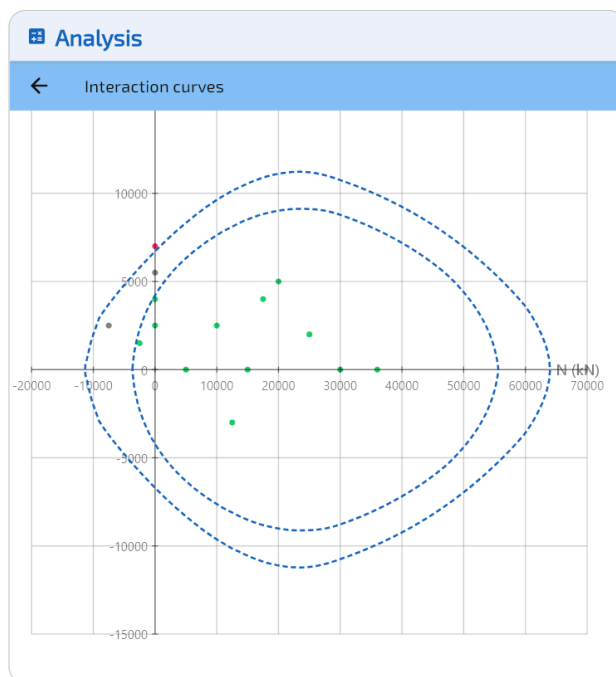


Figura 5: Ultimo: involuppo su M_y .

I marcatori verdi ricadono all'interno di entrambe le curve: sono verificati sia al valore minimo che massimo della componente fissa. I marcatori rossi superano la capacita' a entrambi gli estremi. I marcatori grigi si trovano tra le due curve: sono verificati a un estremo ma non all'altro. Il loro stato e' ambiguo e richiede una verifica individuale tramite la modalita' a componente fissa, la superficie 3D o il solutore di equilibrio interno.

Sezione ellittica (ACI 318)

Dati di input

Calcestruzzo

- Sezione trasversale ellittica
- Larghezza = 3.00 m, Altezza = 2.00 m

Armatura

- 40 barre lungo il perimetro
- Diametro $\varphi = 40$ mm, copriferro 50 mm

Leggi dei materiali (ACI 318)

- Calcestruzzo: $f'_c = 30$ MPa
- Acciaio: $f_y = 500$ MPa

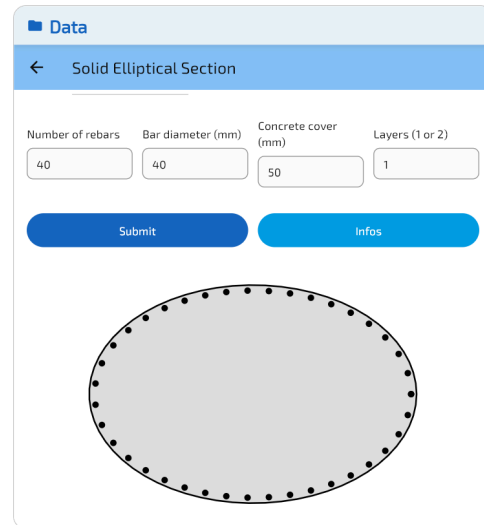


Figura 6: Sezione trasversale ellittica.

Curve di interazione

La prima curva mostra la capacita' di flessione biassiale a forza assiale nulla ($N = 0$) allo stato limite di esercizio, mentre la seconda mostra l'interazione forza assiale-flessione a $M_y = 0$ allo stato limite ultimo. Il blocco di tensioni di Whitney e i fattori φ vengono applicati nativamente alla curva ultima.

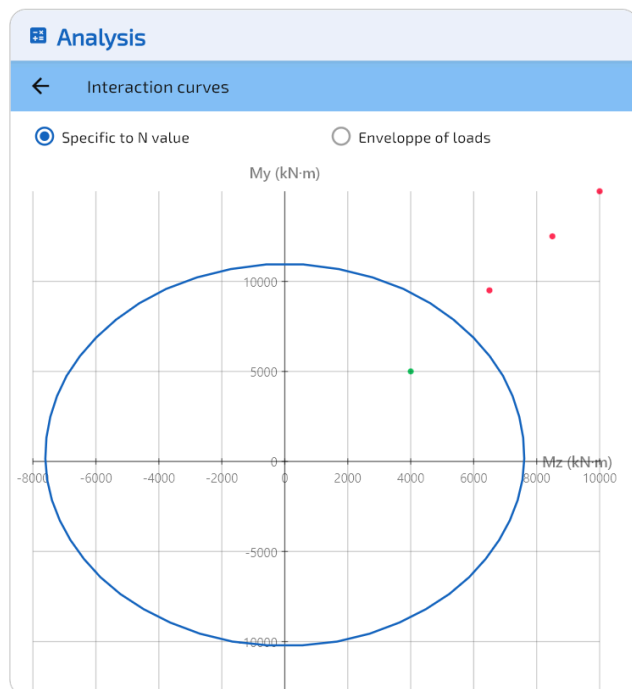


Figura 7: Esercizio: M_z - M_y a $N = 0$.

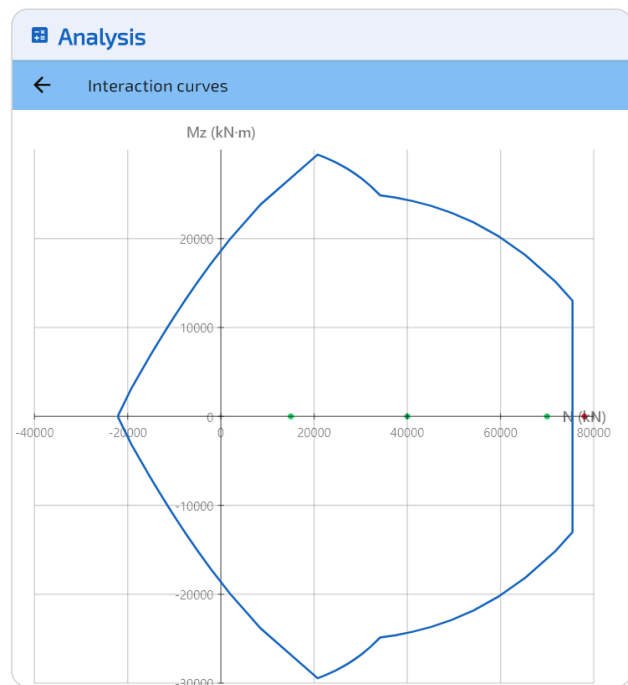


Figura 8: Ultimo: N - M_z a $M_y = 0$ (Whitney).

La curva ultima (destra) evidenzia gli effetti del blocco Whitney secondo ACI 318. La forza di compressione massima e' limitata a $\varphi P_{n,max}$: il bordo verticale piatto a destra del diagramma riflette la riduzione normativa del carico assiale ($\varphi_c \times 0.80$ per pilastri con staffe). La zona di transizione tra la regione controllata dalla trazione ($\varphi = 0.90$) e quella dalla compressione ($\varphi = 0.65$) appare come

un cambio di curvatura vicino al punto bilanciato. La curva di esercizio (sinistra), basata su leggi lineari elastiche senza fattori riduttivi, ha invece una forma regolare e simmetrica.

Modalita' involuppo

Viene usato lo stesso insieme ridotto di carichi. L'involuppo calcola due curve ai valori minimo e massimo della componente fissa: N per il contorno M_z-M_y (esercizio) e M_y per il contorno $N-M_z$ (ultimo, Whitney). Si applica la stessa classificazione a tre colori.

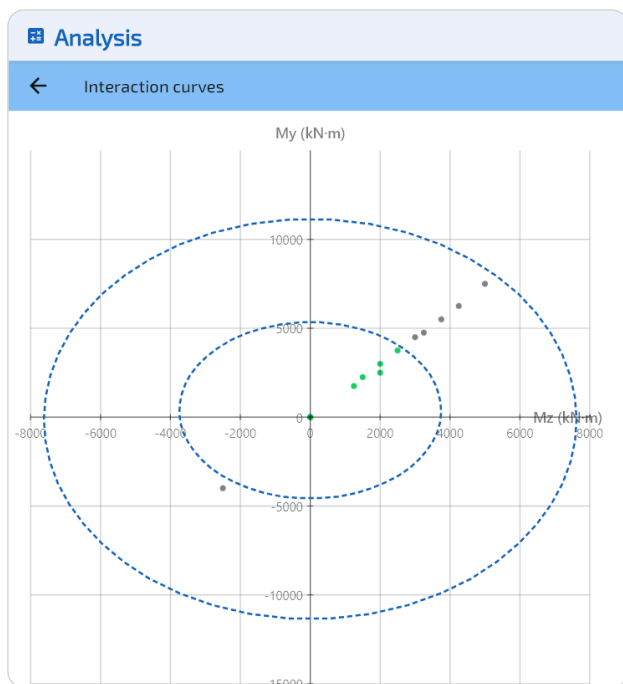


Figura 9: Esercizio: involuppo su N .

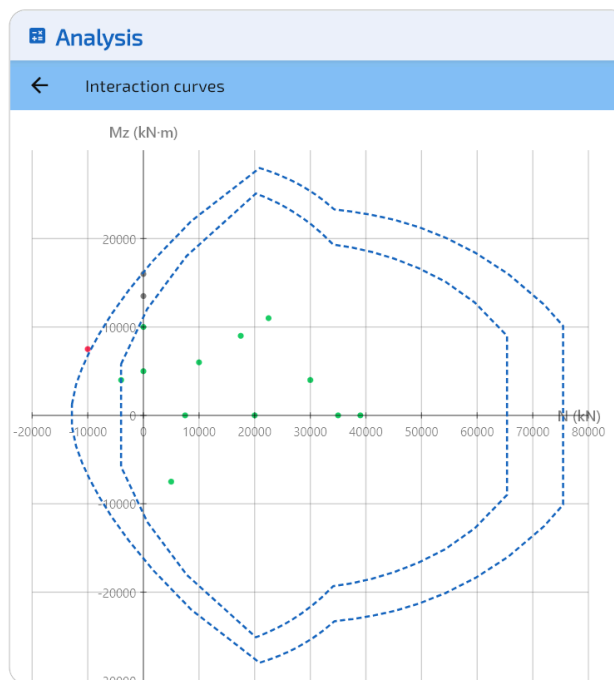


Figura 10: Ultimo: involuppo su M_y (Whitney).

Benchmark di prestazioni

Il calcolo della curva di interazione dipende dalla risoluzione della mesh selezionata. Risoluzioni piu' elevate producono curve piu' regolari a costo di tempi maggiori. La tabella mostra il tempo totale di calcolo (mediana di 3 esecuzioni) per entrambe le sezioni.

Risoluzione mesh	Ottagonale EC2 (ms)	Ellittica ACI (ms)
51 × 50	8.5	6.5
101 × 100	11.0	7.0
201 × 200	14.5	9.0

Tutti i calcoli rimangono sotto i 15 ms anche alla risoluzione massima, rendendo le curve di interazione essenzialmente istantanee per l'ingegnere.

Conclusione

Le curve di interazione 2D forniscono i diagrammi ingegneristici classici che completano la superficie 3D:

- I carichi distribuiti sulla curva mostrano immediatamente quali sono verificati (verde) e quali superano la capacita' (rosso), senza calcolare fattori di sicurezza numerici.

- La classificazione Interno/Esterno della valutazione delle distanze 3D e' pienamente coerente con la posizione sulla curva 2D.
- Le curve 2D per ACI 318 sono calcolate nativamente con il blocco Whitney e i fattori φ .
- La modalita' involuppo verifica piu' casi di carico con valori diversi della componente fissa in un'unica figura, usando la classificazione a tre colori (verde/grigio/rosso).
- Le curve vengono generate in millisecondi, anche ad alte risoluzioni di mesh.

Il modulo non calcola attualmente un fattore di sicurezza numerico (η) per ciascun carico: questo e' fornito dal modulo delle distanze (Articolo #5). Una versione futura potrebbe combinare entrambi: la curva 2D visiva con i valori η annotati direttamente sul grafico.

Esportazione

SectionPro esporta le curve di interazione nei formati PDF, TXT e XLS. Il report PDF include la curva 2D con i punti di carico distribuiti e una tabella dei risultati allegata.

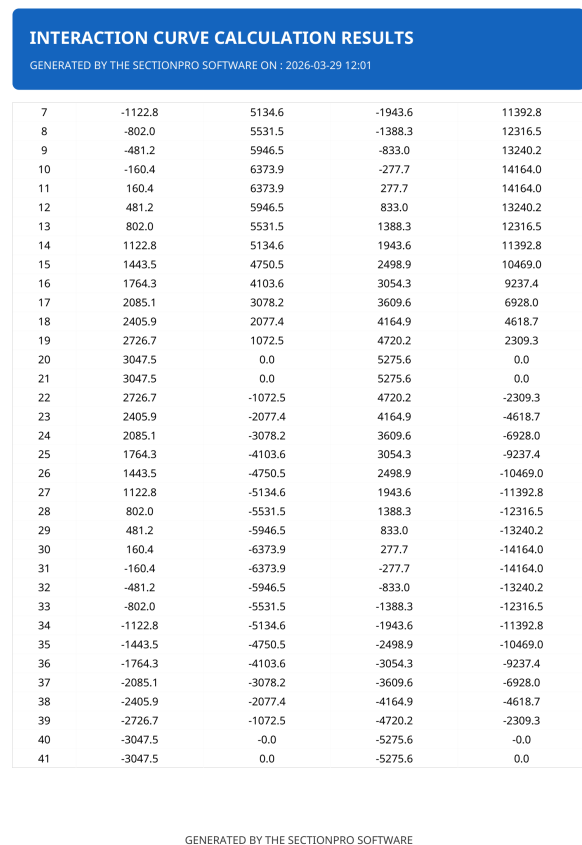
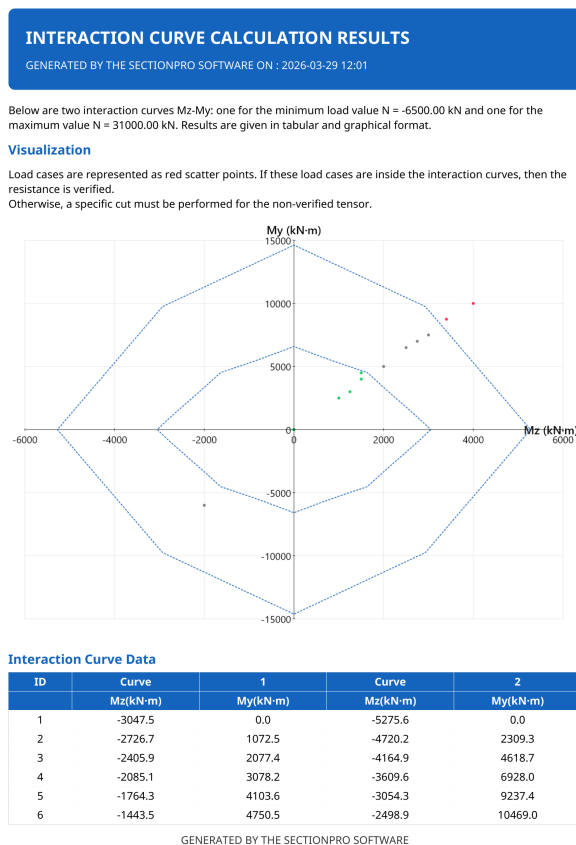


Figura 11: Esportazione PDF, pagina 1: curva di interazione con i carichi.

Figura 12: Esportazione PDF, pagina 2: coordinate della curva.