



Superficie di interazione

Tutorial SectionPro: domini di resistenza 3D in flessione deviata

BridgeKernel · 2026

Introduzione

Verificare una sezione in calcestruzzo armato sotto sforzo normale e flessione combinati è semplice quando la flessione è uniassiale: un singolo diagramma di interazione (N, M) descrive l'intero dominio di resistenza. In flessione deviata, invece, la resistenza dipende simultaneamente da N , M_z e M_y , e nessuna curva 2D è sufficiente. Il dominio di resistenza completo diventa una superficie tridimensionale nello spazio (N, M_z, M_y) .

SectionPro calcola questa superficie per ogni stato limite definito dall'utente. Un punto di carico interno indica sicurezza; esterno, capacità superata. La superficie è visualizzata in un visualizzatore 3D interattivo e può essere esportata in PDF, Excel e testo.

Questo articolo presenta l'analisi della superficie di interazione su due geometrie e due codici normativi: una **sezione ottagonale** (Eurocode 2) e una **sezione ellittica** (ACI 318), ciascuna analizzata allo SLU e allo SLE.

Risultati calcolati

SectionPro fornisce tre categorie di risultati per ogni superficie di interazione:

Dominio di resistenza 3D

- Superficie triangolata interattiva
- Una superficie per stato limite
- Risoluzione della mesh regolabile
- Rotazione, zoom, spostamento
- Opacità della superficie regolabile

Riquadro delimitante

- N_{\min}, N_{\max} : intervallo di sforzo normale
- $M_{z,\min}, M_{z,\max}$: intervallo di momento
- $M_{y,\min}, M_{y,\max}$: intervallo di momento
- Capacità estrema per direzione

Esportazioni

- PDF: riquadro delimitante + viste 3D
- XLS: coordinate della mesh + triangoli
- TXT: coordinate della mesh (colonne)

Scenari di prova

Sezione ottagonale (Eurocode 2). Allo SLU, il calcestruzzo segue una legge parabola-rettangolo con $\gamma_c = 1,50$ e l'acciaio è elastoplastico con incrudimento ($\gamma_s = 1,15$). Allo SLE, entrambi i materiali sono elastici lineari con tensioni ammissibili definite dall'utente.

Sezione ellittica (ACI 318). Allo SLU, il calcestruzzo segue il blocco di Whitney, con fattori φ (0,65 a 0,90), limite $\varphi_N = 0,80$ e tensione di blocco piena, poiché $\rho = 0,07\%$ supera la

soglia dell'1 %. Allo SLE, entrambi i materiali sono elastici lineari con tensioni ammissibili definite dall'utente.

Sezione ottagonale (Eurocode 2)

Dati di ingresso

Calcestruzzo

- Sezione trasversale ottagonale
- $b_1 = 2\{, \}00$ m, $b_2 = 0\{, \}50$ m
- $h_1 = 1\{, \}00$ m, $h_2 = 0\{, \}60$ m

Armature

- 48 barre, spaziatura uniforme 150 mm
- Diametro $\varphi = 32$ mm
- Copriferro 50 mm, 1 strato

Leggi dei materiali (EC2)

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

Figura 1: Sezione ottagonale: geometria e disposizione delle armature.

SLU (Fondamentale)

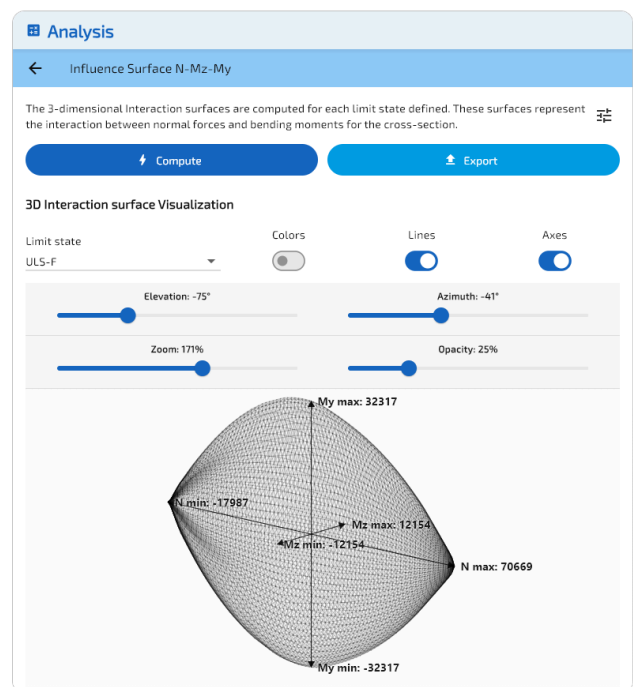
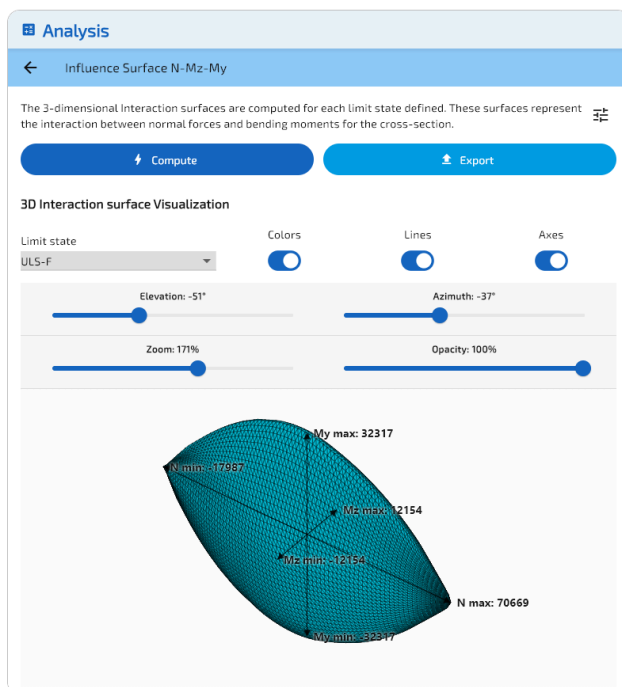


Figura 2: Superficie di interazione allo SLU, triangoli colorati. Figura 3: Superficie di interazione allo SLU, vista wireframe.

SLE (Caratteristica)

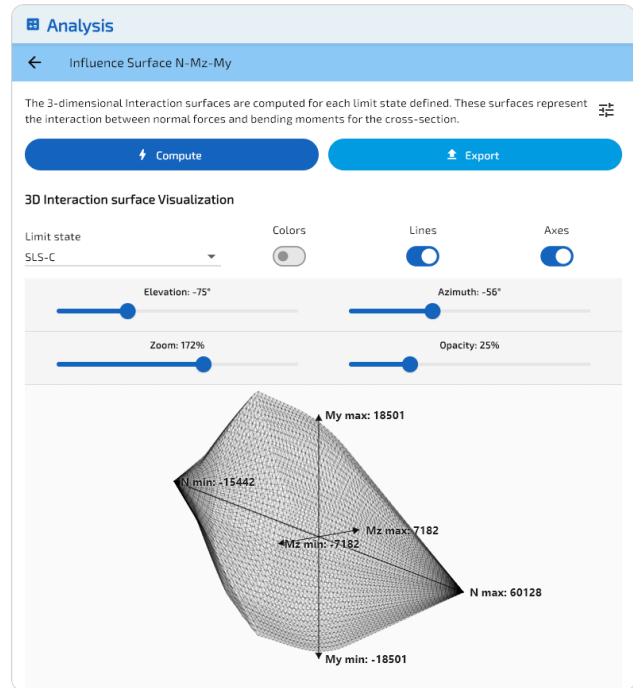
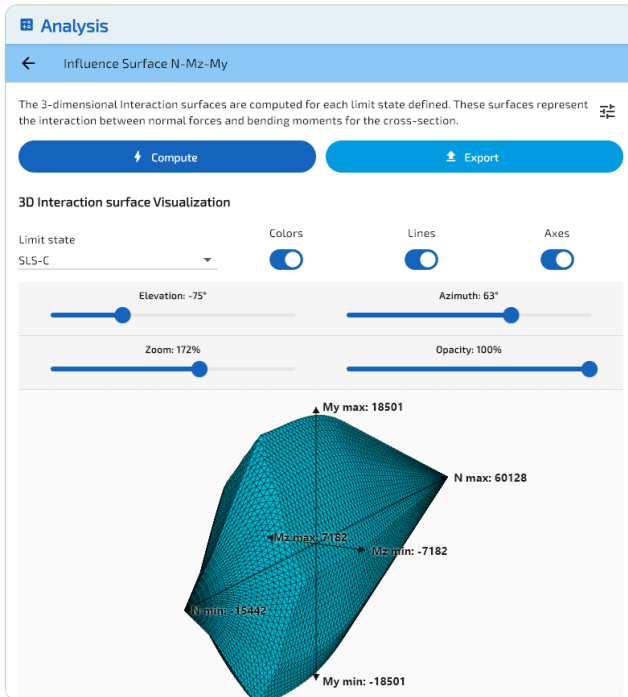


Figura 4: Superficie di interazione allo SLE, triangoli colorati.

Figura 5: Superficie di interazione allo SLE, vista wireframe.

Riquadro delimitante

	Sforzo normale N (kN)	Momento M_z (kN·m)	Momento M_y (kN·m)
SLU min	-17987	-12154	-32317
SLU max	70669	12154	32317
SLE min	-15442	-7182	-18501
SLE max	60128	7182	18501

- La sezione è più larga che alta ($b_1 = 2\{, \}00$ m, $h_1 = 1\{, \}00$ m), quindi M_y raggiunge valori estremi superiori a M_z (asse forte verticale).
- La superficie SLU è più grande della SLE, poiché la legge non lineare del calcestruzzo offre una capacità superiore alla legge elastica dello SLE.

Sezione ellittica (ACI 318)

Dati di ingresso

Calcestruzzo

- Sezione trasversale ellittica
- Larghezza = 3{,}00 m (asse forte)
- Altezza = 2{,}00 m (asse debole)

Armature

- 40 barre lungo il perimetro
- Diametro $\varphi = 40$ mm
- Copriferro 50 mm, 1 strato

Leggi dei materiali (ACI 318)

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

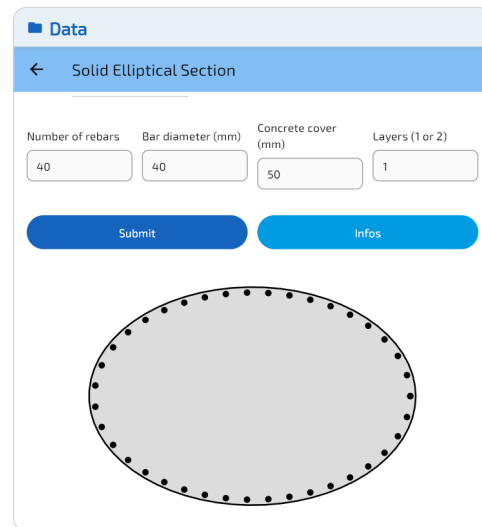


Figura 6: Sezione ellittica: geometria e disposizione delle armature.

Allo SLU, la distribuzione delle tensioni è sostituita dal blocco di Whitney ($\beta_1 = 0{,}832$). I fattori φ ($0{,}90/0{,}65$) e il limite $\varphi_N = 0{,}80$ vengono applicati. Con $\rho = 1{,}07\%$ superiore all'1 %, si mobilita la tensione piena del blocco.

SLU

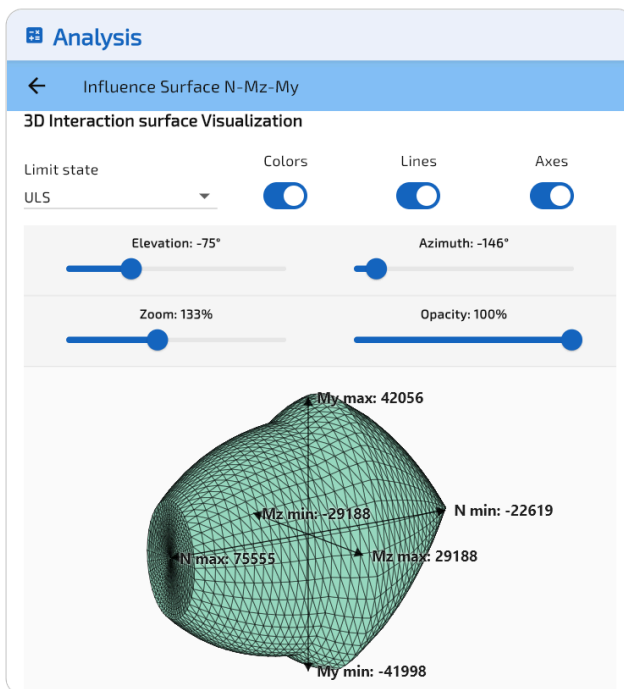


Figura 7: Superficie di interazione allo SLU, triangoli colorati.

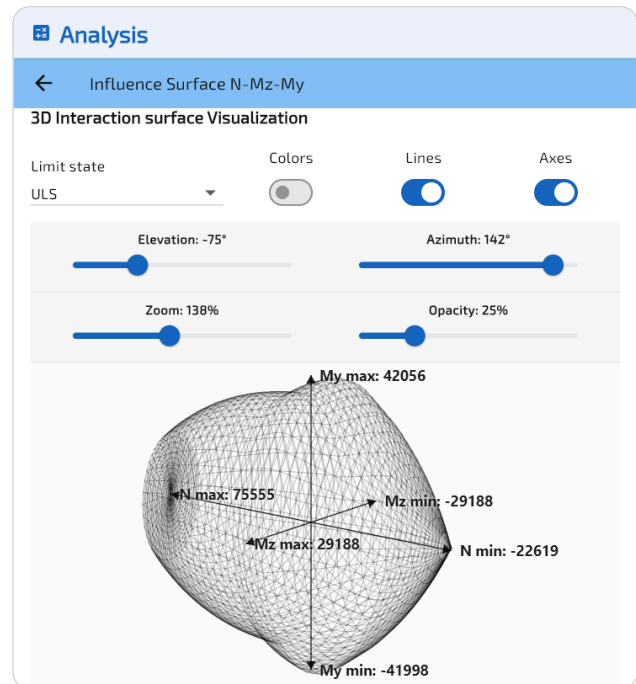


Figura 8: Superficie di interazione allo SLU, vista wireframe.

SLE

Allo SLE, entrambi i materiali seguono leggi elastiche con tensioni ammissibili ($\sigma_c = 11\{, \}5$ MPa, $\sigma_s = 250$ MPa), il che spiega la superficie più piccola rispetto allo SLU.

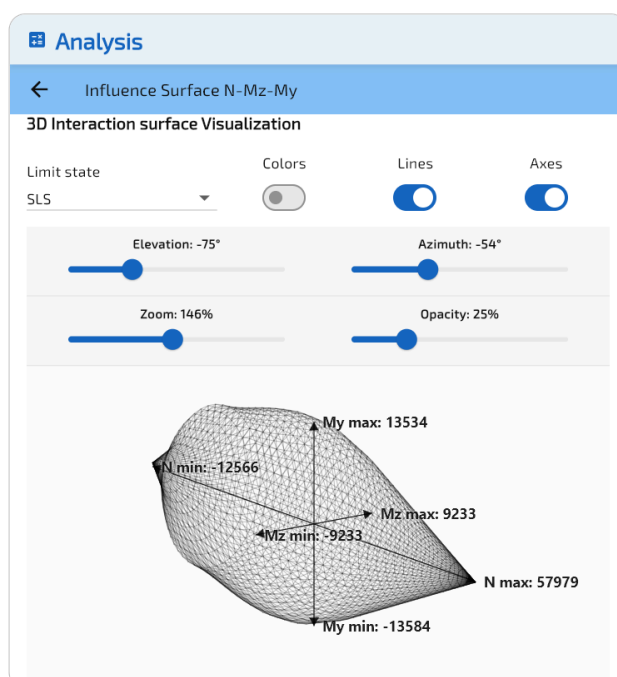
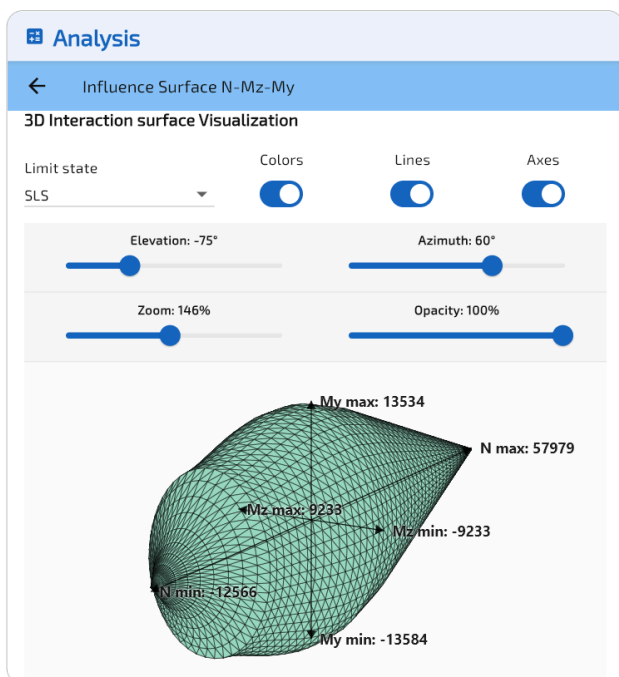


Figura 9: Superficie di interazione allo SLE, triangoli colorati. Figura 10: Superficie di interazione allo SLE, vista wireframe.

Riquadro delimitante

	Sforzo normale N (kN)	Momento M_z (kN·m)	Momento M_y (kN·m)
SLU min	-22619	-29188	-41998
SLU max	75555	29188	42056
SLE min	-12566	-9233	-13584
SLE max	57979	9233	13534

- La sezione è più larga che alta ($3\{, \}00 \times 2\{, \}00$ m), quindi M_y supera M_z , ma la superficie conserva una forma arrotondata grazie alla geometria ellittica.
- La superficie SLU è più grande della SLE. I fattori φ ($\varphi = 0\{, \}65$, $\varphi_N = 0\{, \}80$) danno un fattore effettivo di $0\{, \}52$. Allo SLE, la tensione ammissibile ($\sigma_c = 11\{, \}5$ MPa) limita la capacità a compressione.

Esportazione

SectionPro esporta la superficie in tre formati: PDF (riquadro delimitante + viste 3D), Excel (coordinate dei nodi e connettività dei triangoli per stato limite) e testo (colonne a larghezza fissa).

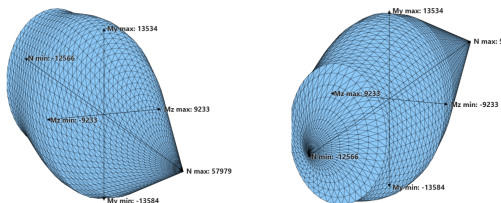
INFLUENCE SURFACE CALCULATION RESULTS

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-16 22:30

Below are figures allowing 3D visualization of the resistance domains of the studied reinforced concrete section. The bounding boxes represent the extreme values of the resisting forces.

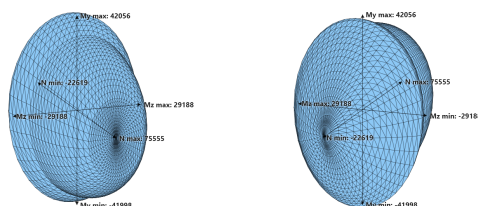
SLS : Serviceability limit state

Bounding box	Axial force N (kN)	Moment Mz (kN-m)	Moment My (kN-m)
Minimum value	-12566	-9232.7	-13584
Maximum value	57979	9232.7	13534



ULS : Ultimate limit state

Bounding box	Axial force N (kN)	Moment Mz (kN-m)	Moment My (kN-m)
Minimum value	-22619	-29188	-41998
Maximum value	75555	29188	42056



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

INFLUENCE SURFACE CALCULATION RESULTS

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-16 22:32

INFLUENCE SURFACE NODES

ID	SLS N kN	SLS Mz kN-m	SLS My kN-m	ULS N kN	ULS Mz kN-m	ULS My kN-m
1	-12566.37	0.00	455.54	-22619.47	0.00	819.97
2	-11126.67	735.28	403.35	-19892.39	2557.77	811.22
3	-11126.67	729.70	297.26	-19892.39	2516.78	108.24
4	-11126.67	714.06	192.56	-19892.39	2391.21	-557.84
5	-11126.67	689.11	90.35	-19892.39	2204.62	-1146.42
6	-11126.67	655.70	-8.52	-19892.39	1985.45	-1625.51
7	-11126.67	613.41	-104.44	-19892.39	1741.43	-2023.96
8	-11126.67	562.89	-196.03	-19892.39	1489.98	-2328.95
9	-11126.67	501.17	-280.80	-19892.39	1275.81	-2547.72
10	-11126.67	429.11	-355.88	-19892.39	926.37	-2780.14
11	-11126.67	348.12	-422.33	-19892.39	704.46	-2900.77
12	-11126.67	257.87	-478.01	-19892.39	456.63	-2996.54
13	-11126.67	158.72	-517.58	-19892.39	281.52	-3046.76
14	-11126.67	53.15	-534.98	-19892.39	78.28	-3072.02
15	-11126.67	-54.09	-534.86	-19892.39	-78.28	-3072.02
16	-11126.67	-159.62	-517.22	-19892.39	-281.52	-3046.76
17	-11126.67	-258.70	-477.68	-19892.39	-456.63	-2996.54
18	-11126.67	-348.90	-421.81	-19892.39	-704.46	-2900.77
19	-11126.67	-429.75	-355.24	-19892.39	-926.37	-2780.14
20	-11126.67	-501.72	-280.06	-19892.39	-1275.81	-2547.72
21	-11126.67	-563.41	-195.32	-19892.39	-1489.98	-2328.95
22	-11126.67	-613.84	-103.63	-19892.39	-1741.43	-2023.96
23	-11126.67	-656.03	-7.68	-19892.39	-1985.45	-1625.51
24	-11126.67	-689.34	91.23	-19892.39	-2204.62	-1146.42
25	-11126.67	-714.20	193.48	-19892.39	-2391.21	-557.84
26	-11126.67	-729.84	298.18	-19892.39	-2516.78	108.24
27	-11126.67	-735.33	404.28	-19892.39	-2557.77	811.22
28	-11126.67	-732.29	510.75	-19892.39	-2511.26	1542.12
29	-11126.67	-720.56	617.04	-19892.39	-2384.84	2227.62
30	-11126.67	-700.44	722.57	-19892.39	-2200.96	2795.51
31	-11126.67	-671.42	826.17	-19892.39	-1977.22	3277.78
32	-11126.67	-630.20	926.34	-19892.39	-1738.23	3662.90
33	-11126.67	-579.44	1021.31	-19892.39	-1507.85	3960.63
34	-11126.67	-518.39	1111.70	-19892.39	-1238.45	4214.13
35	-11126.67	-447.15	1195.20	-19892.39	-1039.81	4368.97
36	-11126.67	-364.46	1268.31	-19892.39	-770.16	4517.62
37	-11126.67	-269.76	1325.50	-19892.39	-572.99	4603.18
38	-11126.67	-166.18	1367.41	-19892.39	-322.42	4665.74
39	-11126.67	-55.99	1391.86	-19892.39	-122.30	4694.04
40	-11126.67	56.98	1391.86	-19892.39	122.30	4694.04
41	-11126.67	167.13	1367.14	-19892.39	322.42	4665.74
42	-11126.67	270.60	1325.03	-19892.39	572.99	4603.18
43	-11126.67	365.22	1267.64	-19892.39	770.16	4517.62
44	-11126.67	447.84	1194.58	-19892.39	1039.81	4368.97
45	-11126.67	518.97	1110.97	-19892.39	1238.45	4214.13
46	-11126.67	579.90	1020.51	-19892.39	1507.85	3960.63
47	-11126.67	630.56	925.45	-19892.39	1738.23	3662.90
48	-11126.67	671.68	825.27	-19892.39	1977.22	3277.78
49	-11126.67	700.69	721.67	-19892.39	2200.96	2795.51
50	-11126.67	720.72	616.12	-19892.39	2384.84	2227.62
51	-11126.67	732.34	509.81	-19892.39	2511.26	1542.12
52	-11126.67	735.28	403.35	-19892.39	2557.77	811.22
53	-9686.97	1470.57	351.16	-17165.31	5075.23	836.95

Figura 11: Esportazione PDF: riquadro delimitante e viste 3D.

Figura 12: Esportazione Excel: coordinate dei nodi e triangoli.

Prestazioni

Il calcolo della superficie di interazione è istantaneo nella pratica. La tabella seguente mostra i tempi di calcolo puri (escluso il rendering grafico) misurati su un PC desktop per le due sezioni di questo articolo, a tre risoluzioni della mesh (25 × 25, 50 × 50 e 100 × 100).

Sezione	Grossolana (1.2k tri)	Media (4.9k tri)	Fine (19.8k tri)
Ottagonale – EC2	7 ms	17 ms	24 ms
Ellittica – ACI 318	7 ms	6 ms	10 ms

Il nucleo EC2 produce cinque superfici in un'unica chiamata, ACI 318 due in chiamate separate. Tutte le superfici vengono calcolate in meno di 25 ms, anche alla risoluzione più fine.

Conclusione

La superficie di interazione consente di visualizzare l'intero dominio di resistenza in flessione deviata. Il modulo di verifica di SectionPro proietta ogni combinazione di carichi su questa superficie e restituisce il coefficiente di sicurezza, che sarà oggetto del prossimo articolo.

I due esempi illustrano come la geometria e il codice normativo modellano il dominio. I formati di esportazione (PDF, Excel, testo) forniscono i dati necessari per le relazioni di calcolo.

