



Dimensionamiento de armaduras mediante superficies de interacción

Tutorial SectionPro: determinación del diámetro mínimo de armadura para un conjunto de combinaciones de carga usando el dominio de resistencia 3D

BridgeKernel · 2026

Introducción

SectionPro ofrece dos flujos de verificación: el solucionador de equilibrio de sección (Artículo #3), que procesa cualquier número de combinaciones de carga y devuelve el estado detallado de tensiones/deformaciones para cada una individualmente; y la verificación por superficie de interacción (Artículo #5), que construye el dominio de resistencia 3D (N, M_z, M_y) y evalúa todas las cargas simultáneamente midiendo su distancia normalizada η a la superficie. Ambos responden a la pregunta de verificación: ¿es la sección adecuada para un φ_s dado?

Este artículo aborda el problema inverso, el dimensionamiento: dada una disposición de la armadura y un conjunto de combinaciones de carga, encontrar el diámetro mínimo de barra φ_s tal que toda carga quede dentro de la superficie de interacción. El algoritmo busca el diámetro que produce una superficie donde la carga más crítica llega exactamente a la frontera ($\eta = 1$), dentro de un criterio de tolerancia numérica. Cada estado límite se resuelve de forma independiente y SectionPro reporta φ_s por estado así como el valor gobernante entre todos los estados.

Para ACI 318, CSA A23.3 y AASHTO, la superficie se construye nativamente a partir del bloque de compresión Whitney con factores de reducción de resistencia. Dado que las cargas se evalúan geoméricamente en lugar de por convergencia iterativa, este método resulta significativamente más rápido para grandes envolventes de carga (ver Sección 5).

Resultados calculados

SectionPro reporta tres categorías de resultados:

Dimensionamiento de armadura

φ_s : diámetro de barra requerido
 A_s : área de acero requerida por barra
Un resultado por estado límite
 φ_s gobernante entre todos los estados límite

Distancias y vista 3D

η : distancia normalizada por carga
Estado: **Interno** / **Frontera**
Dispersión 3D en la superficie final
Una superficie por estado límite

Exportaciones

PDF: vistas 3D + tabla de dimensionamiento
XLS: φ_s , cargas, distancias, estado
TXT: resultados tabulares (columnas)

Sección octogonal (Eurocode 2)

Datos de entrada

La geometría de la sección, la disposición de la armadura y las leyes de materiales son idénticas a las utilizadas en los Artículos #4 y #5. Se definen 30 combinaciones de carga: 15 en ULS-F (Fundamental) y 15 en SLS-C (Característica).

Hormigón

- Sección transversal octogonal
- $b_1 = 2.00$ m, $b_2 = 0.50$ m
- $h_1 = 1.00$ m, $h_2 = 0.60$ m

Disposición de la armadura

- 48 posiciones de barras, separación uniforme 150 mm
- Recubrimiento 50 mm, 1 capa
- Diámetro φ_s : a determinar

Leyes de materiales (EC2)

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

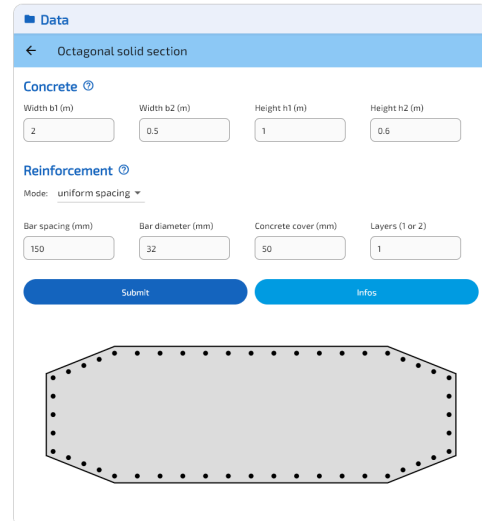


Figura 1: Sección octogonal: geometría y disposición de la armadura.

Resultados de dimensionamiento

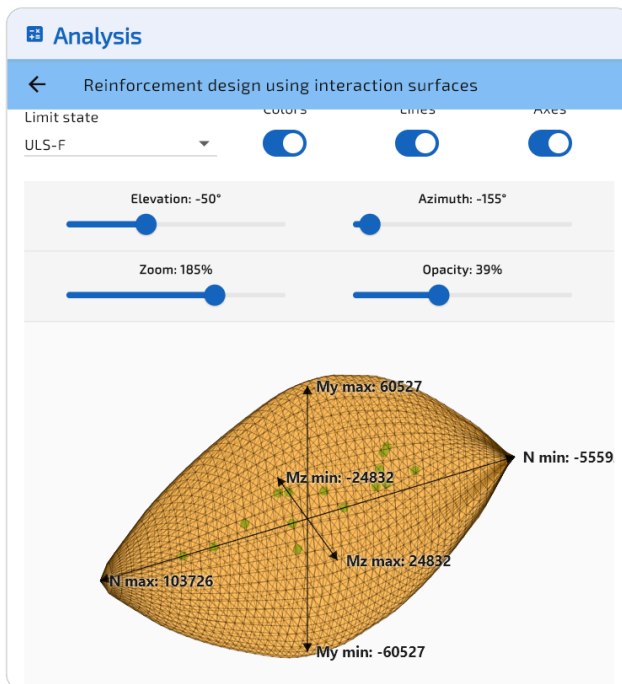


Figura 2: ULS-F: superficie de interacción con φ_s convergido.

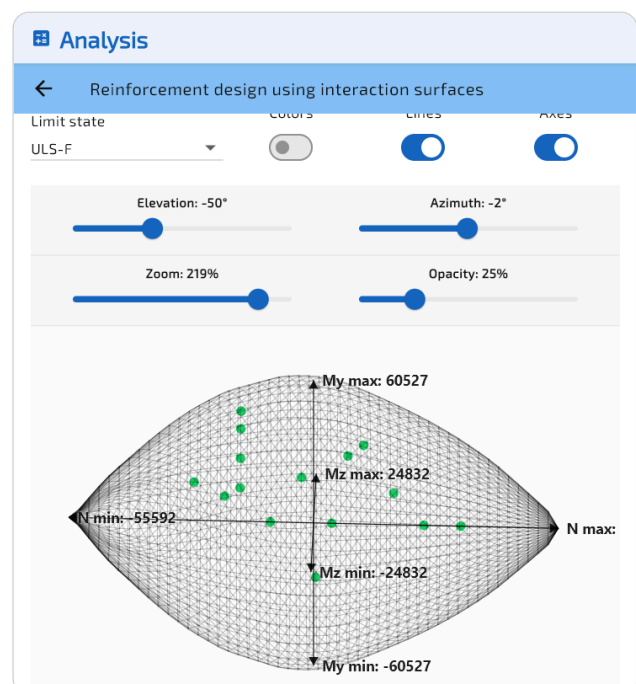


Figura 3: ULS-F, rotado.

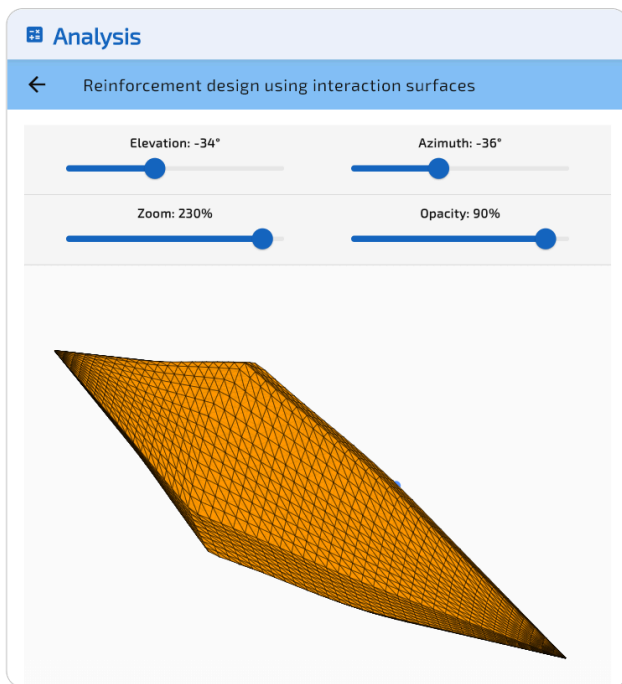


Figura 4: SLS-C: superficie de interacción con φ_s convergido.

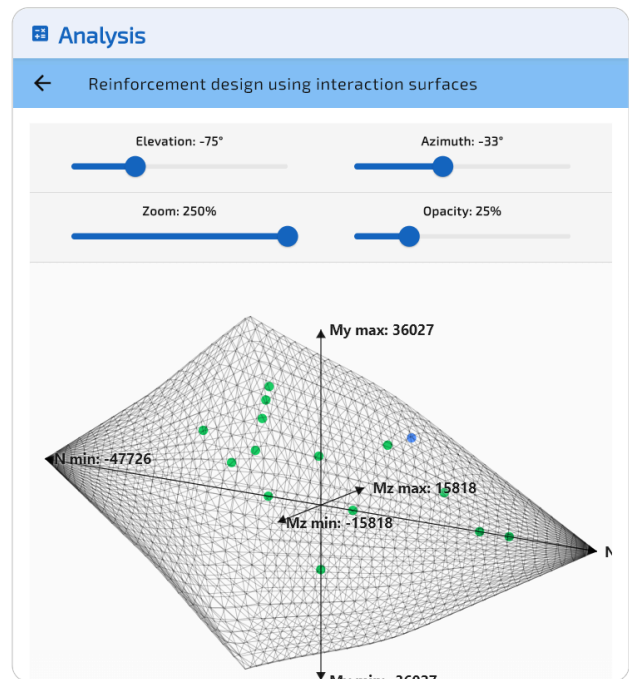


Figura 5: SLS-C, rotado.

SLS-C gobierna con $\varphi_s = 56.26$ mm (vs 55.09 mm en ULS-F). Con el diámetro gobernante, la carga frontera SLS-C (#26) es visible en azul sobre la superficie, mientras que todas las cargas ULS-F son internas (verde).

Estado	φ_s (mm)	η_{worst}	Carga crítica	Estado
ULS-F	55.09	0.970	#8	Interno
SLS-C	56.26	1.000	#26	Frontera

Distancias con la armadura gobernante

Una vez determinado el $\varphi_s = 56.26$ mm gobernante (SLS-C controla), SectionPro reconstruye la superficie de interacción para cada estado límite con este diámetro y calcula las distancias para las 30 cargas. Toda carga debe ser Interno ($\eta < 1$) o estar en la frontera ($\eta \approx 1$).

Carga	Estado	N (kN)	M_z (kN·m)	M_y (kN·m)	η	Estado
26	SLS-C	35000	6000	15000	1.000	Frontera
8	ULS-F	0	14000	35000	0.970	Interno
23	SLS-C	0	8000	20000	0.883	Interno
7	ULS-F	0	11000	30000	0.820	Interno
25	SLS-C	30000	5000	13000	0.815	Interno
22	SLS-C	0	6800	17500	0.797	Interno
28	SLS-C	-13000	4000	10000	0.796	Interno
11	ULS-F	40000	10000	25000	0.727	Interno
29	SLS-C	45000	2500	6000	0.716	Interno
4	ULS-F	72000	0	0	0.603	Interno

Las 20 cargas restantes tienen $\eta < 0.60$. La tabla completa puede exportarse mediante el software en formatos PDF, TXT y XLS.

Sección elíptica (ACI 318)

Datos de entrada

La geometría de la sección, la armadura y las leyes de materiales son idénticas a las utilizadas en el artículo de verificación por superficie de interacción. Se definen 30 combinaciones de carga: 15 en ULS y 15 en SLS. El bloque de compresión Whitney de ACI 318 se utiliza nativamente para construir la superficie de interacción ULS, incluyendo los factores de reducción de resistencia ($\varphi = 0.90$ controlado por tracción, $\varphi = 0.65$ controlado por compresión, $\varphi_N = 0.80$ límite). La superficie SLS utiliza comportamiento elástico lineal con tensiones admisibles ($\sigma_c = 11.5$ MPa, $\sigma_s = 250$ MPa).

Hormigón

- Sección transversal elíptica
- Ancho = 3.00 m, Altura = 2.00 m

Disposición de la armadura

- 40 barras a lo largo del perímetro
- Recubrimiento 50 mm
- Diámetro φ_s : a determinar

Leyes de materiales (ACI 318)

- Hormigón: $f'_c = 30$ MPa
- Acero: $f_y = 500$ MPa
- Bloque Whitney: $\beta_1 = 0.832$

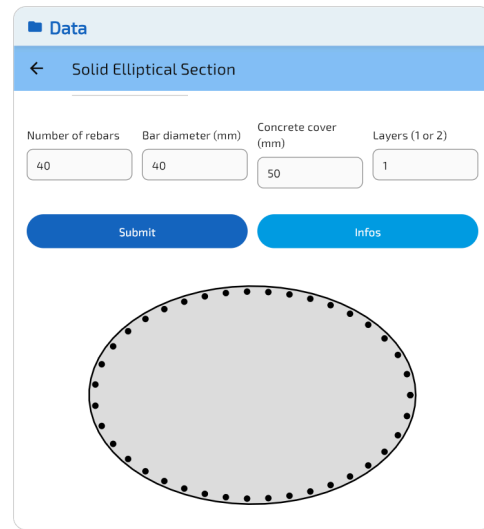


Figura 6: Sección elíptica: geometría y disposición de la armadura.

Resultados de dimensionamiento

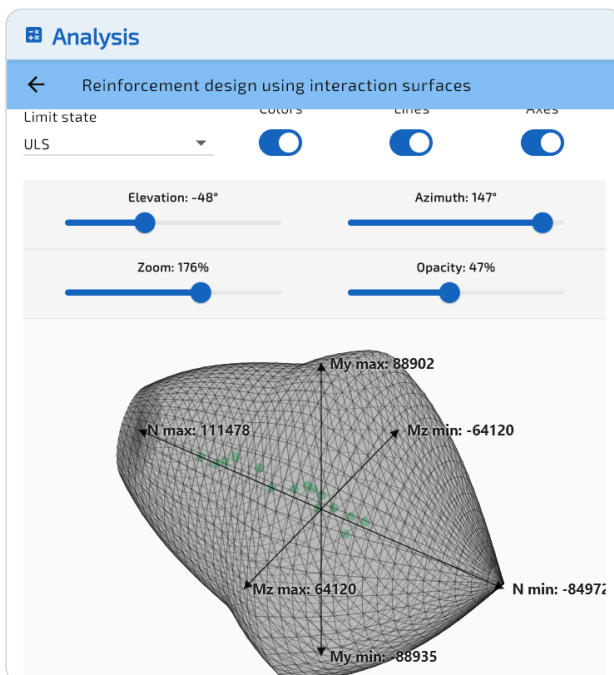


Figura 7: ULS: superficie de interacción con φ_s convergido.

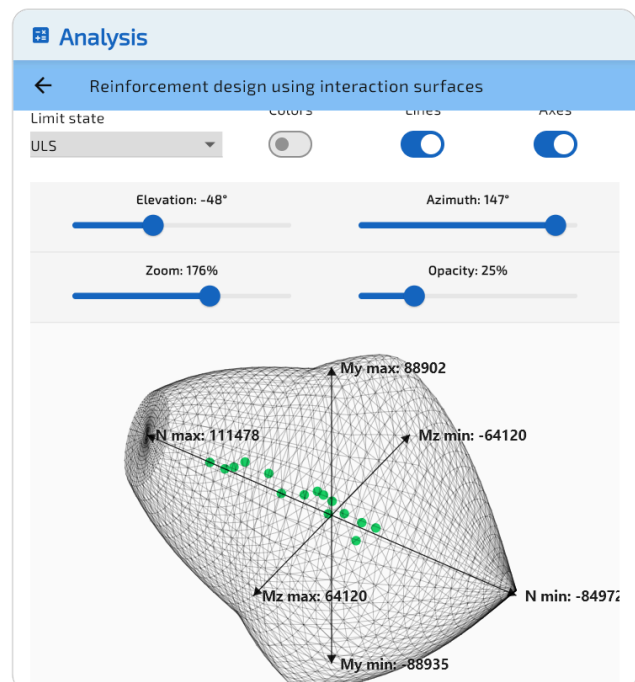


Figura 8: ULS, rotado.

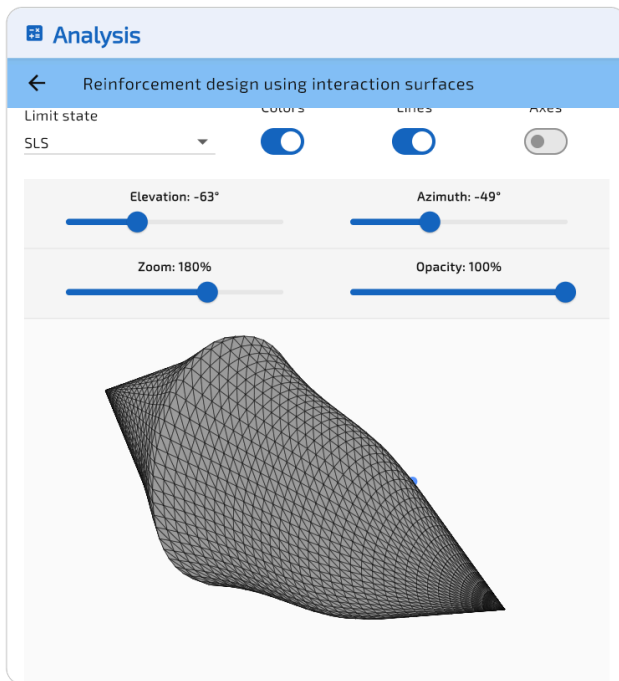


Figura 9: SLS: superficie de interacción con φ_s convergido.

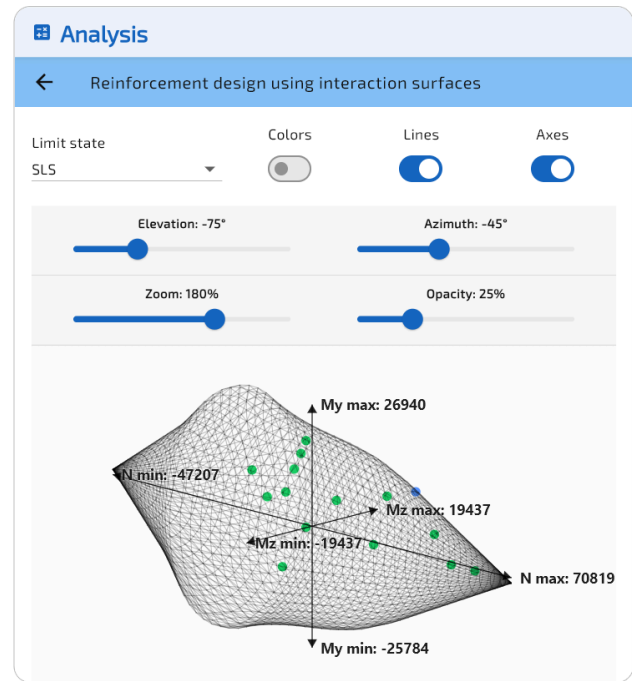


Figura 10: SLS, rotado.

SLS gobierna con $\varphi_s = 77.53$ mm (vs 64.71 mm en ULS). La carga frontera SLS (#26) es visible en azul sobre la superficie, mientras que todas las cargas ULS son internas (verde).

Estado	φ_s (mm)	η_{worst}	Carga crítica	Estado
ULS	64.71	0.781	#8	Interno
SLS	77.53	1.000	#26	Frontera

Distancias con la armadura gobernante

Con el $\varphi_s = 77.53$ mm gobernante (SLS controla), las 30 cargas son Interno. Las 10 cargas más críticas son:

Carga	Estado	N (kN)	M_z (kN·m)	M_y (kN·m)	η	Estado
26	SLS	35000	7500	11000	1.000	Frontera
23	SLS	0	10000	15000	0.866	Interno
19	SLS	60000	0	0	0.835	Interno
29	SLS	45000	3000	4500	0.812	Interno
8	ULS	0	32000	45000	0.781	Interno
25	SLS	28000	6000	9000	0.766	Interno
18	SLS	53000	0	0	0.712	Interno
11	ULS	45000	22000	33000	0.710	Interno
7	ULS	0	27000	39000	0.699	Interno
22	SLS	0	8500	12500	0.695	Interno

Validación cruzada con la verificación por superficie de interacción (Artículo #5)

La verificación por superficie de interacción (Artículo #5) analizó las mismas dos secciones con diámetros de barra fijos ($\varphi = 32$ mm para el octógono, $\varphi = 40$ mm para la elipse). Con esos diámetros, varias cargas fueron clasificadas como Externas ($\eta > 1$), lo que significa que la capacidad de la sección fue excedida. El módulo de dimensionamiento (este artículo) debe por tanto devolver valores de φ_s superiores a esos diámetros fijos.

Sección octogonal (EC2, $\varphi = 32$ mm fijo en Art. #5)

Con $\varphi = 32$ mm, 7 de las 15 cargas ULS-F eran Externas y 8 de las 15 cargas SLS-C eran Externas. El módulo de dimensionamiento devuelve $\varphi_s = 55.09$ mm (ULS-F) y $\varphi_s = 56.26$ mm (SLS-C), ambos muy por encima de 32 mm, confirmando que el diámetro fijo era insuficiente. El diámetro gobernante SLS-C es un 76% mayor que el diámetro de verificación.

Estado límite	φ Art.#5 (mm)	φ_s dim. (mm)	Externas en Art.#5
ULS-F	32	55.09	7 / 15
SLS-C	32	56.26	8 / 15

Sección elíptica (ACI 318, $\varphi = 40$ mm fijo en Art. #5)

De manera similar, con $\varphi = 40$ mm, 7 de las 15 cargas ULS y 8 de las 15 cargas SLS eran Externas. El módulo de dimensionamiento devuelve $\varphi_s = 64.71$ mm (ULS) y $\varphi_s = 77.53$ mm (SLS). El diámetro gobernante SLS es un 94% mayor que el diámetro de verificación.

Estado límite	φ Art.#5 (mm)	φ_s dim. (mm)	Externas en Art.#5
ULS	40	64.71	7 / 15
SLS	40	77.53	8 / 15

En ambos casos, el módulo de dimensionamiento devuelve correctamente diámetros que superan el diámetro de verificación siempre que había cargas externas presentes, confirmando la plena consistencia entre los flujos de verificación y dimensionamiento.

Validación cruzada con el solucionador de equilibrio de sección (Artículo #3)

El solucionador de equilibrio de sección (Artículo #3) calculó el φ_s requerido para casos de carga individuales en una sección hexagonal maciza (EC2, C30/37, 30 barras, separación 150 mm). Se analizaron dos casos de carga en ULS-F: una carga biaxial combinada y un caso de flexión uniaxial. Ejecutando el módulo de dimensionamiento en la misma sección con estas dos cargas como envolvente, el φ_s gobernante debe coincidir con el mayor diámetro encontrado por el solucionador directo.

Sección hexagonal, envolvente de dos cargas

Carga	N (kN)	M_z (kN·m)	M_y (kN·m)	φ_s^{NR} (mm)	φ_s^{SI} (mm)
ULS	2000	3000	1800	10.73	—
SLS	500	1000	0	6.40	—
Gob.				10.73	10.82

Ambos solucionadores convergen al mismo diámetro gobernante: $\varphi_s = 10.73$ mm (equilibrio) vs $\varphi_s = 10.82$ mm (superficie de interacción).

Benchmark de rendimiento

La siguiente tabla compara el tiempo de cálculo en la sección octogonal EC2 (5 estados límite, 48 barras), escalando el número de combinaciones de carga de 2 a 1 000 000. Las cargas se distribuyen aleatoriamente entre todos los estados límite. El solucionador de equilibrio realiza una convergencia iterativa por carga. El método de superficie de interacción construye la superficie y evalúa todas las cargas geoméricamente.

Cargas	Solucionador directo (ms)	Dimensionamiento SI (ms)	Aceleración
2	2.1	154	0.01 ×
100	5.6	382	0.01 ×
1000	23	441	0.05 ×
10000	167	526	0.32 ×
100000	1688	1306	1.29 ×

Ambos métodos ofrecen un rendimiento similar a todas las escalas, con el solucionador de equilibrio más rápido para envolventes pequeñas y el método de superficie de interacción alcanzándolo alrededor de 100000 cargas. Los valores de φ_s coinciden con una diferencia inferior al 0.1% a todas las escalas. La ventaja práctica del enfoque por superficie de interacción no es la velocidad bruta sino la salida visual: el diagrama de dispersión 3D en la superficie gobernante ofrece una confirmación inmediata de que todas las cargas están contenidas, lo que el solucionador de equilibrio no proporciona.

Conclusión

El dimensionamiento por superficie de interacción proporciona un método eficiente para determinar el diámetro mínimo de armadura para toda una envolvente de cargas:

- Una ejecución, todas las cargas: el algoritmo procesa cualquier número de combinaciones de carga en una sola pasada.
- Whitney nativo para códigos americanos: para ACI 318, CSA A23.3 y AASHTO, la superficie se construye directamente a partir del bloque de compresión Whitney con factores de reducción de resistencia.
- Validación cruzada: los resultados de dimensionamiento coinciden con la verificación por superficie de interacción (Artículo #5: las cargas que eran Externas con el diámetro fijo ahora requieren un φ_s mayor) y con el solucionador de equilibrio de sección (Artículo #3: ambos métodos convergen al mismo diámetro gobernante dentro de la tolerancia numérica).

- Confirmación visual: el diagrama de dispersión 3D con el φ_s gobernante muestra inmediatamente que todas las cargas están contenidas, con la carga crítica en la frontera.
- Complementario al solucionador de equilibrio: el solucionador de equilibrio devuelve el estado completo de tensiones/deformaciones, mientras que el método de superficie de interacción proporciona una verificación visual de la envolvente con un coste computacional similar.

Exportación

SectionPro exporta los resultados de dimensionamiento en formatos PDF, TXT y XLS. El informe PDF incluye vistas 3D de la superficie de interacción final con los puntos de carga dispersos y una tabla de resultados.

Reinforcement design based on IS

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-28 07:17

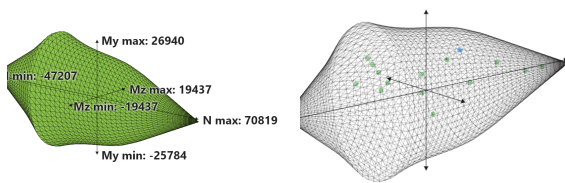
Minimum reinforcement diameters ϕ_s for each limit state:

State	SLS	ULS
ϕ_s (mm)	77.53	64.71
Load	#26	#8

The calculation performed allows dimensioning the reinforcement diameters such that the reinforced concrete section strictly satisfies the resistance requirements with respect to the given loads.

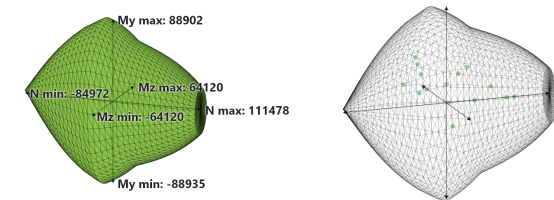
SLS : Serviceability limit state ($\phi_s = 77.53$ mm)

14 loads are internal to the N-Mz-My surface. Scattered in green
 0 loads are external to the N-Mz-My surface. Scattered in red
 1 load is on the boundary of the N-Mz-My surface. Scattered in blue



ULS : Ultimate limit state ($\phi_s = 64.71$ mm)

15 loads are internal to the N-Mz-My surface. Scattered in green
 0 loads are external to the N-Mz-My surface. Scattered in red
 0 loads are on the boundary of the N-Mz-My surface. Scattered in blue



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figura 11: Exportación PDF página 1: vistas 3D.

Distances of loads to surface

Load case #26 is the most unfavorable

Distances are calculated considering the largest calculated ϕ_s .

Load	Limit state	N (kN)	Mz (kN-m)	My (kN-m)	SF	Status
26	SLS	35000.0	7500.0	11000.0	1.000	Boundary
23	SLS	0.0	10000.0	15000.0	0.866	Internal
19	SLS	60000.0	0.0	0.0	0.835	Internal
29	SLS	45000.0	3000.0	4500.0	0.812	Internal
8	ULS	0.0	32000.0	45000.0	0.781	Internal
25	SLS	28000.0	6000.0	9000.0	0.766	Internal
18	SLS	53000.0	0.0	0.0	0.712	Internal
11	ULS	45000.0	22000.0	33000.0	0.710	Internal
7	ULS	0.0	27000.0	39000.0	0.699	Internal
22	SLS	0.0	8500.0	12500.0	0.695	Internal
13	ULS	-20000.0	15000.0	20000.0	0.647	Internal
28	SLS	-11000.0	5000.0	7500.0	0.620	Internal
6	ULS	0.0	20000.0	30000.0	0.587	Internal
4	ULS	78000.0	0.0	0.0	0.539	Internal
10	ULS	35000.0	18000.0	28000.0	0.521	Internal
21	SLS	0.0	6500.0	9500.0	0.492	Internal
30	SLS	8000.0	-5000.0	-8000.0	0.490	Internal
15	ULS	10000.0	-15000.0	-25000.0	0.472	Internal
12	ULS	-8000.0	8000.0	12000.0	0.470	Internal
5	ULS	0.0	10000.0	15000.0	0.434	Internal
3	ULS	70000.0	0.0	0.0	0.429	Internal
24	SLS	15000.0	4000.0	6000.0	0.407	Internal
14	ULS	60000.0	8000.0	12000.0	0.398	Internal
27	SLS	-4000.0	2500.0	3500.0	0.375	Internal
20	SLS	0.0	4000.0	5000.0	0.367	Internal

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figura 12: Exportación PDF página 2: tabla de resultados.