



Dimensionamiento de armadura

Tutorial SectionPro — Armadura necesaria para secciones hexagonal, cuadrada hueca y viga en U bajo cargas ELS y ELU (EC2, NBR-6118, BAEL 91)

BridgeKernel · 2026

Introducción

Dadas unas fuerzas internas impuestas (N, M_y, M_z) y una disposición de barras predefinida (posiciones y espaciado), SectionPro determina el diámetro mínimo φ_s que satisface los límites normativos en cada posición de barra. Es el problema inverso de la verificación de tensiones (Artículo #2): en vez de comprobar si una armadura dada es suficiente, el software encuentra la armadura que logra el equilibrio bajo las cargas impuestas.

El solucionador itera sobre φ_s hasta que el estado de deformación ($\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$) satisface el equilibrio interno con los límites de deformación normativos exactamente alcanzados. Cuando el hormigón solo puede resistir las cargas impuestas sin armadura, el resultado es $A_s = 0$ — no se necesita acero.

Este artículo usa las mismas tres secciones y los mismos casos de carga del Artículo #2. En el Artículo #2, la armadura estaba fijada y algunos casos superaban la capacidad de la sección ($FS > 1$, verificación KO). Aquí determinamos la armadura necesaria. La correlación es directa: un mayor FS en el Artículo #2 implica un mayor φ_s requerido en el Artículo #3.

Resultados calculados

SectionPro reporta tres categorías de resultados por caso de carga:

Tensiones y deform. + diseño

σ_c — Tensión extrema hormigón
 $\sigma_{s, \min}, \sigma_{s, \max}$ — Tensiones acero
 ε_c — Deformación extrema hormigón
 $\varepsilon_{s, \min}, \varepsilon_{s, \max}$ — Deform. acero
Pivote — Modo de rotura (A, B, $A_s = 0$)
 φ_s — Diámetro requerido

Fuerzas internas

N_c — Resultante compresión
 N_t — Resultante tracción
 (x_C, y_C) — Centroides compresión
 (x_T, y_T) — Centroides tracción
 z — Brazo de palanca

Convergencia

N_{iter} — Iteraciones
Tol — Tolerancia
 $N_{\text{int}}, M_{z, \text{int}}, M_{y, \text{int}}$ — Fuerzas internas
 $\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$ — Estado deformación

Pivotes de rotura

El pivote indica qué material alcanza primero su deformación última:

- **Pivot A — Rotura del acero.** El acero alcanza ε_{su} antes de que el hormigón se aplaste. Típico de secciones poco armadas. Deformación gobernante: $\varepsilon_s = \varepsilon_{su}$.
- **Pivot B — Rotura del hormigón.** El hormigón alcanza ε_{cu} antes de que el acero plastifique. Típico de secciones muy cargadas. Deformación gobernante: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$.
- **Pivot C — Compresión fuerte.** Sección fuertemente comprimida. La deformación alcanza $\varepsilon_c = \varepsilon_{c2}$ a $(1 - \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h$ de la fibra más comprimida ($3h/7$ para $\varepsilon_{c2} = 2\text{‰}$ y $\varepsilon_{cu2} = 3.5\text{‰}$). Raro en la práctica.
- **Pivot $A_s = 0$ — Sin armadura.** El hormigón solo resiste las cargas. Área de acero requerida: cero.

Sección hexagonal maciza

Datos de entrada

Hormigón

- Sección hexagonal
- Ancho $B = 2.00$ m
- Espesor mínimo $h_1 = 0.60$ m
- Espesor máximo $h_2 = 1.00$ m

Armadura

- Espaciado uniforme 150 mm
- 30 posiciones de barras
- Recubrimiento 50 mm — 1 capa
- Diámetro φ_s : a determinar

Materiales (EC2)

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

Figura 1: Sección hexagonal.

ELS — Flexión compuesta ($N + M_z$)

Cargas impuestas: $N = 500$ kN, $M_z = 1000$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q Details

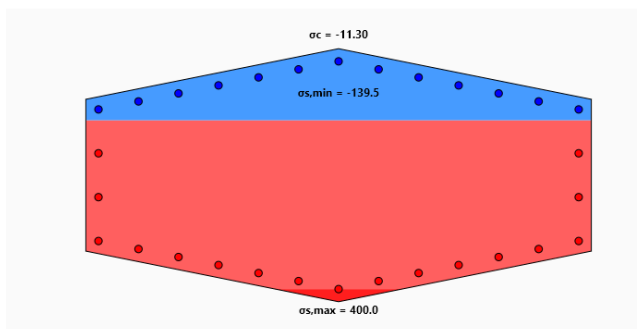


Figura 2: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q Details

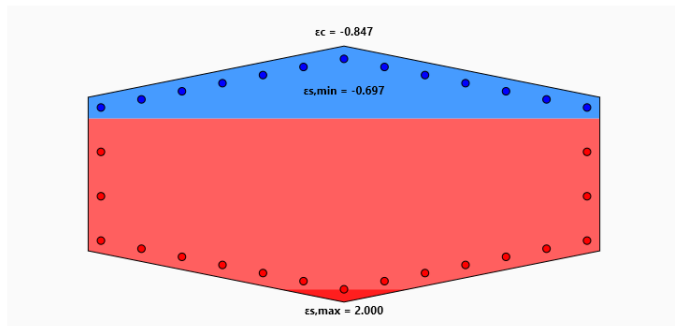


Figura 3: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deform. + diseño

σ_c	-11.30 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-139.49 MPa
$\sigma_{s, \max}$	400.00 MPa
ε_c	-0.847‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0.697‰
$\varepsilon_{s, \max}$	2.000‰
Pivot	A
φ_s	17.60 mm

Esfuerzos internos

N_c	1697.8 kN
N_t	-1197.8 kN
x_C	0.000 m
y_C	0.364 m
x_T	0.000 m
y_T	-0.320 m
z	0.683 m

Convergencia

N_{iter}	4
Tol	3.57×10^{-8}
N_{int}	500.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0.0 kN · m
ε_0	0.651×10^{-3}
κ_x	-2.997×10^{-3}
κ_y	0.000×10^{-3}

Pivot A: el acero gobierna ($\varepsilon_{s, \max} = 2.000\text{‰} = \varepsilon_{su}$). El diámetro requerido es $\varphi_s = 17.60$ mm para las 30 posiciones de barras.

ELU — Flexión biaxial ($N + M_y + M_z$)

Cargas impuestas: $N = 2000$ kN, $M_z = 3000$ kN · m, $M_y = 1800$ kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 2 σ ε N Q R Details

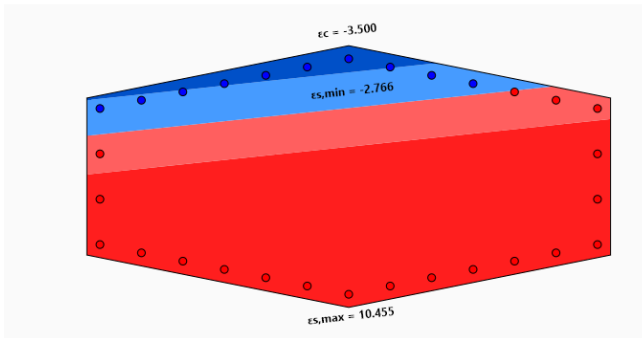


Figura 4: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

Load 2 σ ε N Q R Details

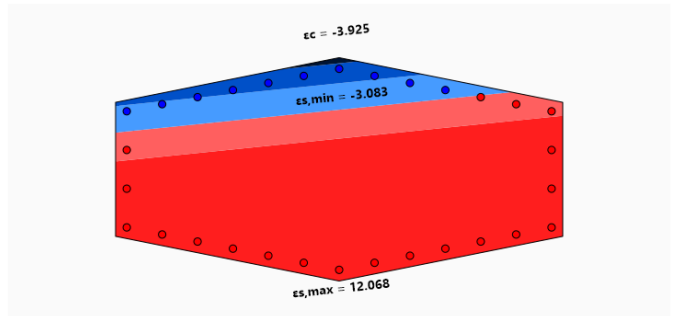


Figura 5: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deform. + diseño

σ_c	-20.00 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-435.21 MPa
$\sigma_{s, \max}$	440.81 MPa
ε_c	-3.500‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-2.766‰
$\varepsilon_{s, \max}$	10.455‰
Pivot	B
φ_s	25.12 mm

Esfuerzos internos

N_c	5827.2 kN
N_t	-3827.2 kN
x_C	-0.255 m
y_C	0.355 m
x_T	0.082 m
y_T	-0.243 m
z	0.687 m

Convergencia

N_{iter}	43
Tol	3.66×10^{-8}
N_{int}	2000.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	3000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	1800.0 kN · m
ε_0	3.845×10^{-3}
κ_x	-14.689×10^{-3}
κ_y	-1.556×10^{-3}

Pivot B: el hormigón gobierna ($\varepsilon_c = -3.500\text{‰} = \varepsilon_{cu}$). El diámetro requerido es $\varphi_s = 25.12$ mm para la carga biaxial ELU.

Sección cuadrada hueca

Datos de entrada

Hormigón

- Sección cuadrada hueca
- Lado exterior $a = 2.0$ m
- Espesor de pared $t = 0.30$ m

Armadura

- Espaciado uniforme 150 mm
- 64 posiciones de barras
- Recubrimiento 40 mm
- 1 capa por cara (interior + exterior)
- Diámetro φ_s : **a determinar**

Materiales (NBR-6118)

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

The screenshot shows a software interface for defining a hollow square section. The 'Concrete' section has 'Side length (m)' set to 2 and 'Thickness (m)' set to 0.3. The 'Reinforcement' section has 'Mode' set to 'uniform spacing', 'Bar spacing (mm)' set to 200, 'Bar diameter (mm)' set to 20, 'Concrete cover (mm)' set to 40, and 'Layers (1 or 2)' set to 1. Below the form is a diagram of a hollow square section with a grid of reinforcement bars.

Figura 6: Sección cuadrada hueca — geometría y disposición de la armadura.

ELS — Flexión biaxial ($N + M_y + M_z$)

Cargas impuestas: $N = -400$ kN, $M_z = 900$ kN · m, $M_y = 400$ kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q Q Details

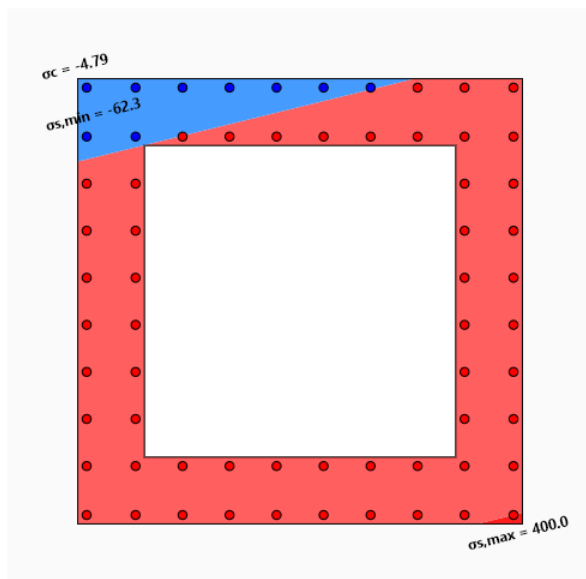


Figura 7: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q Q Details

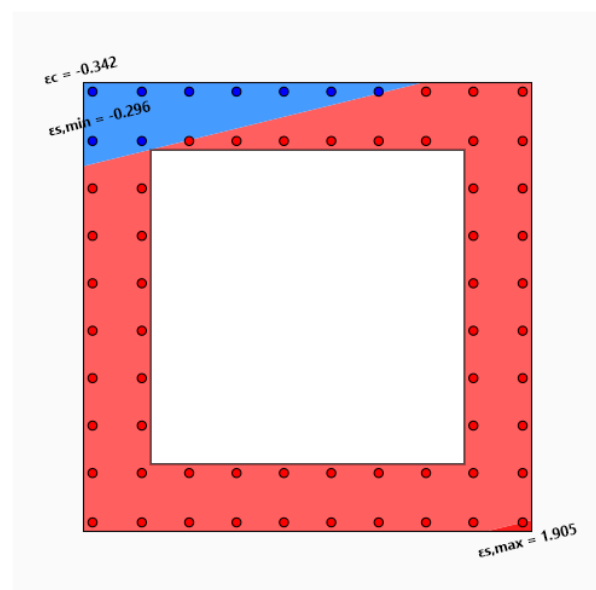


Figura 8: Distribución de deformaciones.

Sección personalizada — Viga en U

Datos de entrada

Esta sección usa la funcionalidad de **geometría sólida personalizada**. El contorno exterior se define como una lista de puntos XY, y la disposición de la armadura se proporciona como una tabla de posiciones (x, y) . Este es el procedimiento recomendado para geometrías no estándar que no encajan en las formas paramétricas predefinidas.

Hormigón

- Viga en U con almas inclinadas
- Altura total $h = 1.20$ m

Armadura

- Espaciado uniforme 150 mm
- Losa inferior: 11 posiciones
- Almas: 49 posiciones
- 2 capas por alma
- Diámetro φ_s : **a determinar**

Materiales (BAEL 91)

- Hormigón: $f_{c28} = 30$ MPa, $\theta = 0.85$
- Acero fe500: $f_e = 500$ MPa

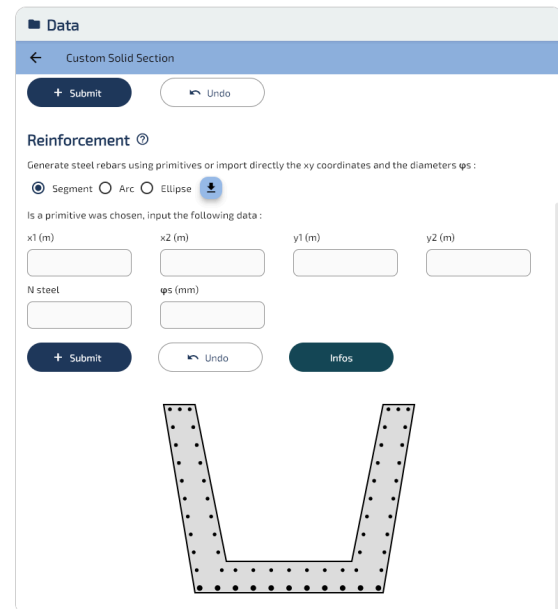


Figura 11: Viga en U — geometría y disposición de la armadura.

ELS — Flexión simple (M_z)

Cargas impuestas: $N = 0$ kN, $M_z = 1500$ kN · m, $M_y = 0$

Visualization of stresses and strains

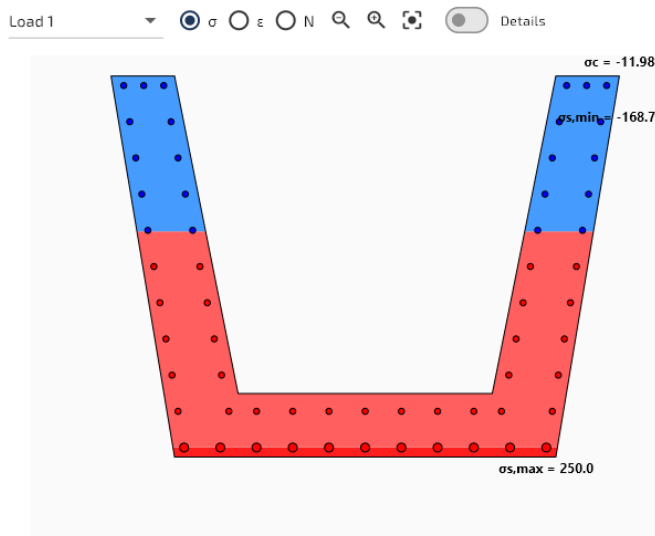


Figura 12: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

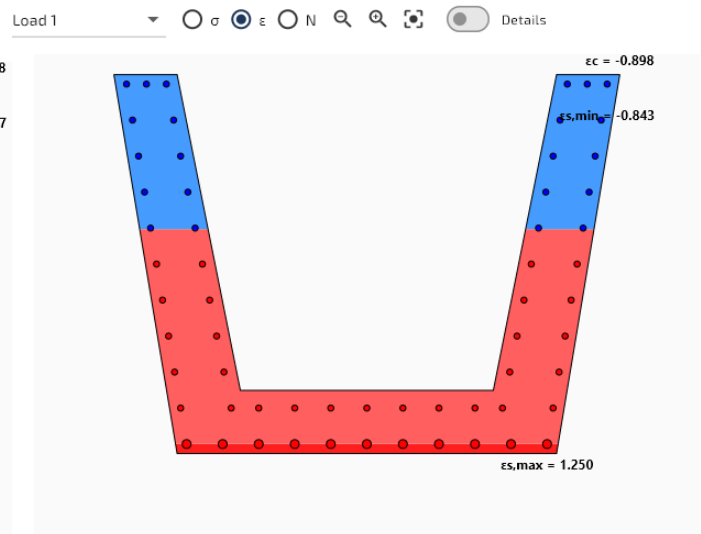


Figura 13: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deform. + diseño

σ_c	-11.98 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-168.65 MPa
$\sigma_{s, \max}$	250.00 MPa
ε_c	-0.898‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0.843‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1.250‰
Pivot	A
φ_s	17.88 mm

Esfuerzos internos

N_c	1680.9 kN
N_t	-1680.9 kN
x_C	0.000 m
y_C	0.571 m
x_T	0.000 m
y_T	-0.321 m
z	0.892 m

Convergencia

N_{iter}	4
Tol	2.21×10^{-7}
N_{int}	0.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1500.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0.0 kN · m
ε_0	0.434×10^{-3}
κ_x	-1.836×10^{-3}
κ_y	0.000×10^{-3}

Pivot A: el acero gobierna ($\sigma_{s, \max} = 250.00 \text{ MPa} = \bar{\sigma}_s$, la tensión admisible del BAEL para fisuración perjudicial). El diámetro requerido es $\varphi_s = 17.88 \text{ mm}$ aplicado uniformemente a las 60 posiciones de barras.

ELU — Flexión biaxial ($M_y + M_z$)

Cargas impuestas: $N = 0 \text{ kN}$, $M_z = 2000 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_y = 500 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Visualization of stresses and strains

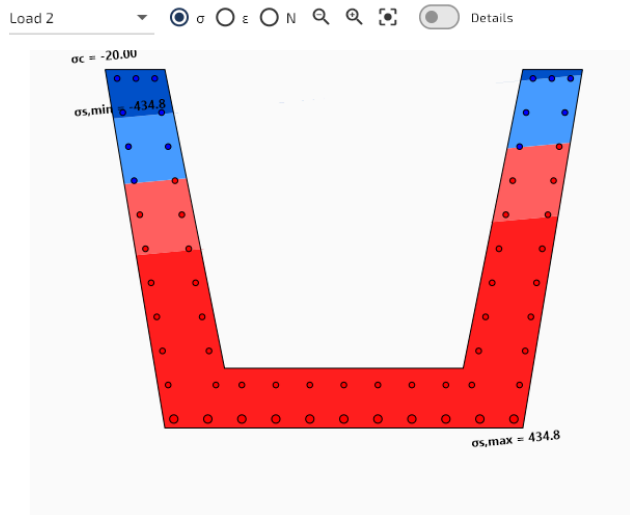


Figura 14: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

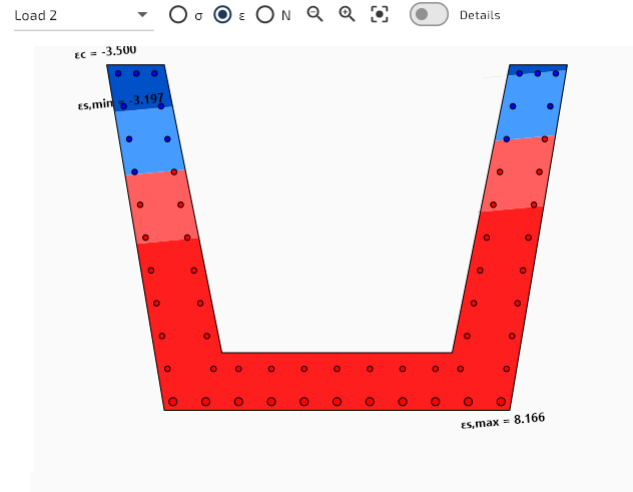


Figura 15: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deform. + diseño

σ_c	-20.00 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-434.78 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434.78 MPa
ε_c	-3.500‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-3.197‰
$\varepsilon_{s, \max}$	8.166‰
Pivot	B
φ_s	13.26 mm

Esfuerzos internos

N_c	2386.2 kN
N_t	-405.4 kN
x_C	-0.142 m
y_C	0.596 m
x_T	-0.060 m
y_T	0.191 m
z	0.413 m

Convergencia

N_{iter}	39
Tol	3.29×10^{-8}
N_{int}	0.0 kN
$M_{z, \text{int}}$	2000.0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	500.0 kN · m
ε_0	3.693×10^{-3}
κ_x	-8.996×10^{-3}
κ_y	-0.833×10^{-3}

Pivot B: el hormigón gobierna ($\varepsilon_c = -3.500\%_0 = \varepsilon_{cu}$). El diámetro requerido es $\varphi_s = 13.26$ mm para la carga biaxial ELU.

Validación de resultados

Verificación del equilibrio interno

Las cargas impuestas (N, M_y, M_z) son la **entrada**. SectionPro encuentra φ_s y el estado de deformación ($\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z$) mediante resolución iterativa, luego integra las tensiones para obtener las fuerzas **internas** ($N_{\text{int}}, M_{y,\text{int}}, M_{z,\text{int}}$). En convergencia, deben coincidir con las cargas impuestas:

$$N_{\text{int}} \approx N \quad M_{y,\text{int}} \approx M_y \quad M_{z,\text{int}} \approx M_z$$

Sección	Carga	N (kN)	N_{int} (kN)	M_z (kN·m)	$M_{z,\text{int}}$ (kN·m)	Δ
Hexagonal	ELS	500.0	500.0	1000.0	1000.0	0.00 %
	ELU	2000.0	2000.0	3000.0	3000.0	0.00 %
Hueca	ELS	-400.0	-400.0	900.0	900.0	0.00 %
	ELU	0.0	0.0	6000.0	6000.0	0.00 %
Viga en U	ELS	0.0	0.0	1500.0	1500.0	0.00 %
	ELU	0.0	0.0	2000.0	2000.0	0.00 %

El equilibrio interno se satisface con precisión de máquina para los seis casos de carga — tres geometrías diferentes, tres códigos normativos distintos, y tanto leyes de material lineales (ELS) como no lineales (ELU).

Referencia cruzada con el Artículo #2

La tabla compara el factor de seguridad del Artículo #2 (armadura fija) con el φ_s calculado aquí. El dimensionamiento aplica un φ_s uniforme a todas las posiciones de barras.

Sección	Carga	φ_s (Art. #2)	FS (Art. #2)	Verif. (Art. #2)	Pivot	φ_s req.
Hexagonal	ELS	25 mm	0.527	OK	A	17.6 mm
	ELU	25 mm	1.121	KO	B	25.1 mm
Cuad. hueca	ELS	20 mm	0.274	OK	A	10.0 mm
	ELU	20 mm	0.634	OK	B	19.4 mm
Viga en U	ELS	20/12 mm	1.209	KO	A	17.9 mm
	ELU	20/12 mm	0.436	OK	B	13.3 mm

Para secciones con armadura uniforme (hexagonal y cuadrada hueca), la correlación es directa: FS > 1 implica $\varphi_{s,\text{required}} > \varphi_{s,\text{original}}$ y viceversa. Para la viga en U, que tenía diámetros mixtos, la comparación debe hacerse sobre el área total de acero en lugar del φ_s solo.

Benchmark — 100 000 casos de carga

Para demostrar la idoneidad de SectionPro para el dimensionamiento sistemático de armadura, ejecutamos 100 000 casos de carga en **cada una de las tres secciones** definidas anteriormente. Los

casos combinan ELS y ELU, flexión uniaxial y biaxial. El benchmark mide el tiempo de cálculo puro, excluyendo la interfaz gráfica. Convergencia obtenida en los 300 000 casos.

Métrica	Hexagonal	Cuadrada hueca	Viga en U
Casos de carga	100 000	100 000	100 000
Tiempo de cálculo	5.26 s	5.30 s	5.35 s
Tasa	19 000 cargas/s	18 900 cargas/s	18 700 cargas/s

Las tres secciones se completan en aproximadamente 5.3 segundos para 100 000 casos — tasas de 18 700 a 19 000 diseños por segundo. Esto es más lento que la verificación de tensiones (Artículo #2), lo cual es esperable: el dimensionamiento añade un bucle externo sobre φ_s , cada iteración con una resolución completa de $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$.

Convergencia obtenida en los 300 000 casos, tres geometrías, códigos normativos y estados límite. A pesar de esta capa adicional, SectionPro dimensiona 100 000 casos en menos de 6 segundos, práctico para el dimensionamiento sistemático de grandes envolventes de carga.

Exportación

SectionPro exporta los resultados en tres formatos: **PDF**, **texto** (columnas de ancho fijo) y **Excel** (.xlsx). Los datos exportados incluyen, por caso de carga: tensiones y deformaciones, el pivote de rotura, el diámetro de barra requerido φ_s , fuerzas internas (con centroides y brazo de palanca), e información completa de convergencia.

REINFORCEMENT DESIGN RESULTS
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-13 13:49

Load case #2 is the most unfavorable

ε , σ and φ_s

φ_s is the calculated reinforcement diameter. σ and ε are the stresses and strains of concrete and steel (indices c and s). The pivot indicates the limit strain reached (A: steel, B: concrete, AS0: concrete alone sufficient).

Param	Unit	#2	#1
σ_c	MPa	-20.00	-11.30
$\sigma_{s,min}$	MPa	-435.21	-139.49
$\sigma_{s,max}$	MPa	440.81	400.00
ε_c	‰	-3.500	-0.847
$\varepsilon_{s,min}$	‰	-2.766	-0.697
$\varepsilon_{s,max}$	‰	10.455	2.000
Pivot	-	B	A
φ_s	mm	25.12	17.60

Internal forces

Nc and Nt are the compression and tension forces resulting from the integration of stresses over the section. The application coordinates of these forces are given by xy. The lever arm z is the distance between these forces.

Param	Unit	#2	#1
Nc	kN	5827.2	1697.8
Nt	kN	-3827.2	-1197.8
xC	m	-0.255	-0.000
yC	m	0.355	0.363
xT	m	0.082	0.000
yT	m	-0.243	-0.320
z	m	0.687	0.683

Convergence

Given below are the number of iterations necessary for convergence of the solution algorithm, the tolerance achieved, the internal forces (N,Mz,My) and the deformation state of the section ($\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$).

Param	Unit	#2	#1
N_iter	-	43	4
Tol	-	3.66e-8	3.57e-8
N_int	kN	2000.0	500.00
Mz_int	kN-m	3000.0	1000.00
My_int	kN-m	1800.0	0.0
ε_0	‰	3.845	0.651
κ_x	‰	-14.689	-2.997
κ_y	‰	-1.556	-0.000

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

REINFORCEMENT DESIGN RESULTS
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-13 13:49

Given below are figures representing graphically the previous tabular results.

Load case n°2: $\varphi_s = 25.12$ mm (σ , ε and Nc,Nt displayed below)

Load case n°1: $\varphi_s = 17.60$ mm (σ , ε and Nc,Nt displayed below)

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figura 16: Exportación PDF — pág. 1: tablas.

Figura 17: Exportación PDF — pág. 2: figuras.

| Conclusión

En la práctica, un ingeniero estructural enfrenta típicamente dos problemas complementarios: verificar una sección con armadura conocida — como se trató en el Artículo #2 — o determinar la armadura necesaria para resistir un conjunto dado de cargas. La funcionalidad de dimensionamiento de armadura aborda directamente el segundo caso. Cuando la disposición de barras es conocida pero el diámetro aún no está fijado, SectionPro encuentra el φ_s mínimo tal que la sección quede cargada exactamente al 100% de su capacidad bajo los límites de deformación normativos. Esto proporciona al ingeniero la armadura estrictamente mínima como punto de partida, a partir del cual se puede seleccionar un diámetro de barra práctico.

Los resultados son consistentes con la formulación del problema inverso: el equilibrio interno se satisface con precisión de máquina para todos los casos de carga, tres geometrías diferentes, tres códigos normativos, y ambos estados límite ELS y ELU. El solucionador converge de forma fiable en todos los casos. En cuanto al rendimiento, el benchmark de 100 000 casos de carga sirve como cota superior — en la práctica, un ingeniero trabaja típicamente con unos pocos cientos de combinaciones de carga. A la tasa medida de 19 000 diseños por segundo, 500 combinaciones se completan en menos de 30 milisegundos: el cálculo es esencialmente instantáneo.