



Tensiones y deformaciones

Tutorial SectionPro — Secciones hexagonal, cuadrada hueca & viga en U bajo cargas ELS y ELU según tres códigos normativos (EC2, NBR-6118, BAEL 91)

BridgeKernel · 2026

Introducción

Para esfuerzos impuestos (N, M_y, M_z) , SectionPro calcula iterativamente el estado de deformación $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$ en equilibrio interno. Del estado convergido se extraen tensiones y deformaciones en las fibras extremas, fuerzas internas y un coeficiente de seguridad (CS).

Se analizan tres geometrías y normas — **sección hexagonal** (EC2), **cuadrada hueca** (NBR-6118) y **viga en U** (BAEL 91) — en ELS (lineal) y ELU (no lineal). Los casos de carga producen resultados OK y KO.

Resultados calculados

SectionPro reporta tres categorías de resultados para cada caso de carga:

Tensiones & deform.

σ_c — Tensión extr. hormigón
 $\sigma_{s, \min}, \sigma_{s, \max}$ — Tensiones acero
 ε_c — Deform. extr. hormigón
 $\varepsilon_{s, \min}, \varepsilon_{s, \max}$ — Deform. acero
CS — Coeficiente de seguridad
Verificación — OK / KO

Esfuerzos internos

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

Convergencia

N_{iter} — Iteraciones
Tol — Tolerancia de convergencia
 $N_{\text{int}}, M_{z, \text{int}}, M_{y, \text{int}}$ — Esfuerzos internos
 $\varepsilon_0, \kappa_x, \kappa_y$ — Estado de deformación

Escenarios de prueba

Cada sección se analiza en ELS (lineal-elástico) y ELU (no lineal: parábola-rectángulo para hormigón, bilineal para acero), sin resistencia a tracción del hormigón. Los casos incluyen flexión uniaxial $(N + M_z)$ y biaxial $(N + M_y + M_z)$, con resultados OK y KO.

Sección	ELS (lineal)	ELU (no lineal)	¿Biaxial?	Norma
Hexagonal	OK	KO	Sí (ELU)	EC2
Cuadrada hueca	OK	OK	Sí	NBR-6118
Viga en U	KO	OK	Sí (ELU)	BAEL 91

Sección hexagonal sólida

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

- Espaciamiento uniforme 150 mm
- 30 armaduras
- Diámetro 25 mm
- Recubrimiento 50 mm
- 1 capa

Leyes de material (EC2)

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

Figura 1: Sección hexagonal — geometría y armadura.

ELS — Flexión compuesta ($N + M_z$)

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

Visualization of stresses and strains

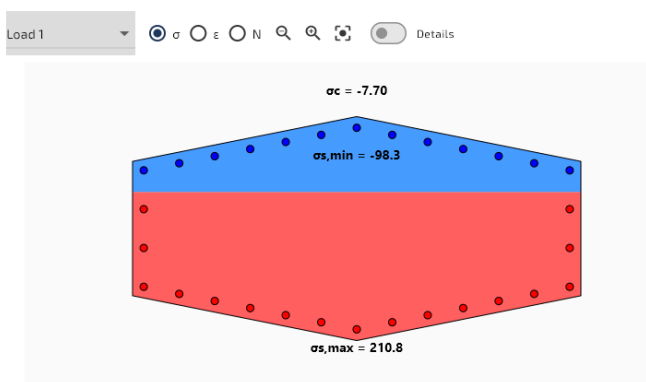


Figura 2: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

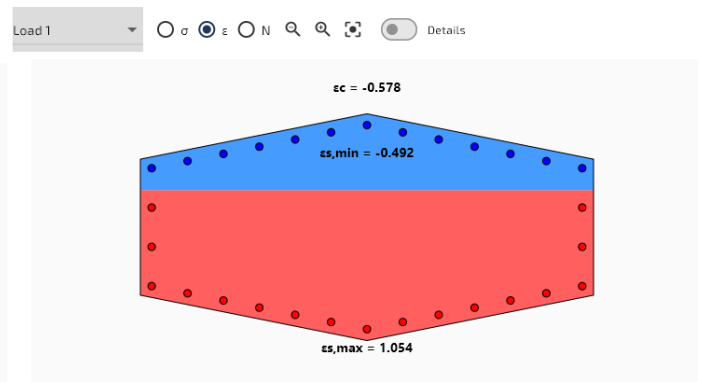


Figura 3: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deformaciones

σ_c -7,70 MPa

Esfuerzos internos

N_c 1731,2 kN

Convergencia

N_{iter} 4

$\sigma_{s, \min}$	-98,33 MPa	N_t	-1231,2 kN	Tol	$3,91 \times 10^{-9}$
$\sigma_{s, \max}$	210,77 MPa	x_C	0,000 m	N_{int}	500,0 kN
ε_c	-0,578‰	y_C	0,345 m	$M_{z, \text{int}}$	1000,0 kN · m
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,492‰	x_T	0,000 m	$M_{y, \text{int}}$	0,0 kN · m
$\varepsilon_{s, \max}$	1,054‰	y_T	-0,327 m	ε_0	$0,281 \times 10^{-3}$
CS	0,527	z	0,672 m	κ_x	$-1,717 \times 10^{-3}$
Verificación	OK			κ_y	$0,000 \times 10^{-3}$

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

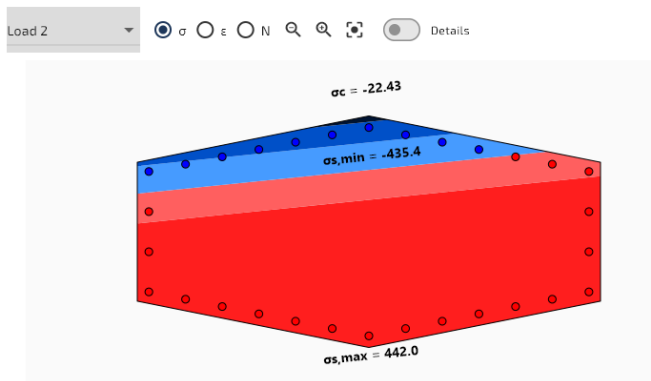


Figura 4: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

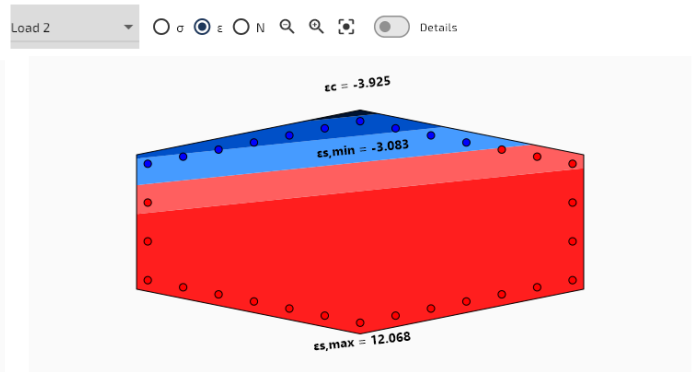


Figura 5: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deformaciones

σ_c	-22,43 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-435,44 MPa
$\sigma_{s, \max}$	441,98 MPa
ε_c	-3,925‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-3,083‰
$\varepsilon_{s, \max}$	12,068‰
CS	1,121

Verificación

KO

Esfuerzos internos

N_c	5871,9 kN
N_t	-3871,9 kN
x_C	-0,252 m
y_C	0,356 m
x_T	0,083 m
y_T	-0,235 m
z	0,679 m

Convergencia

N_{iter}	8
Tol	$6,84 \times 10^{-9}$
N_{int}	2000,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	3000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	1800,0 kN · m
ε_0	$4,492 \times 10^{-3}$
κ_x	$-16,834 \times 10^{-3}$
κ_y	$-1,721 \times 10^{-3}$

Cuando $CS > 1$, las cargas impuestas exceden la capacidad de la sección. Aquí, el hormigón está aplastado ($\varepsilon_c = 3,925\text{‰} > \varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$). Más allá de la rotura, un módulo secante prolonga la ley de material para alcanzar un equilibrio ficticio post-rotura, cuantificando la excedencia ($CS = 1,121$).

Sección cuadrada hueca

Datos de entrada

Hormigón

- Sección cuadrada hueca
- Lado exterior $a = 2,0$ m
- Espesor de pared $t = 0,30$ m

Armadura

- Espaciamiento uniforme 150 mm
- 64 armaduras
- Diámetro 20 mm
- Recubrimiento 40 mm
- 1 capa por cara (interior + exterior)

Leyes de material (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 'Data' tab is selected, and the section is identified as a 'Hollow Square Section'. The concrete properties are set to a side length of 2 meters and a thickness of 0.3 meters. The reinforcement is configured with a uniform spacing mode, 200 mm bar spacing, 20 mm bar diameter, 40 mm concrete cover, and 1 layer. A diagram below the form illustrates the square section with a grid of reinforcement bars.

Figura 6: Sección cuadrada hueca — geometría y 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

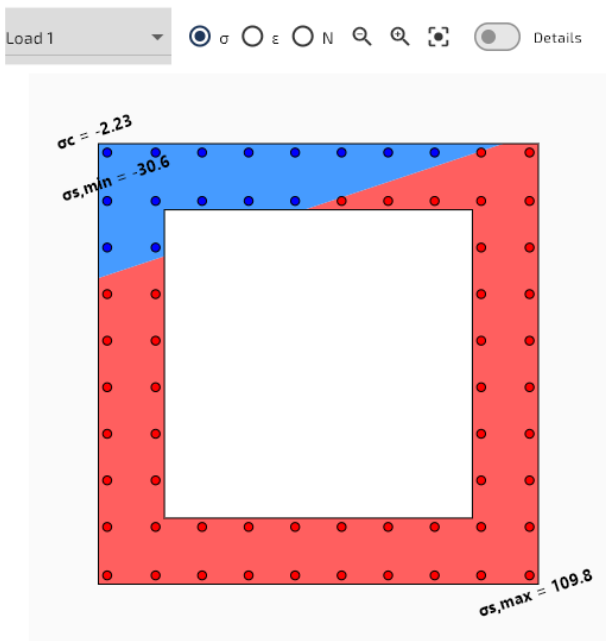


Figura 7: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

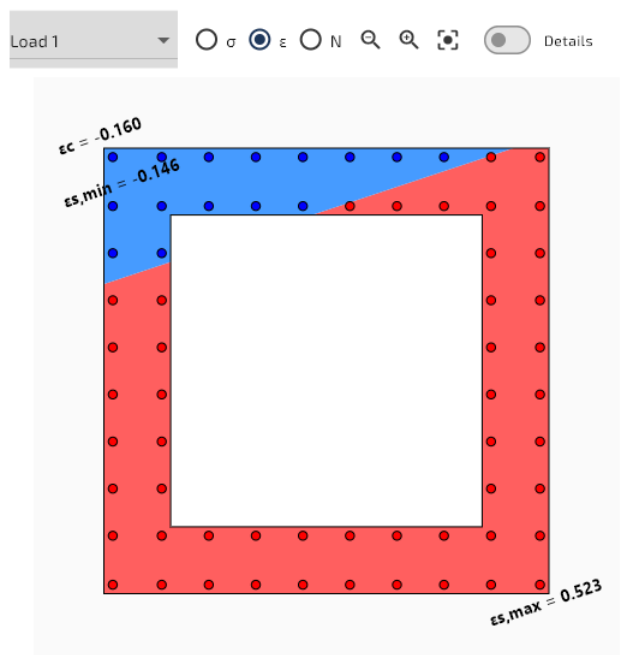


Figura 8: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deformaciones

σ_c	-2,23 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-30,57 MPa
$\sigma_{s, \max}$	109,79 MPa
ε_c	-0,160‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,146‰
$\varepsilon_{s, \max}$	0,523‰
CS	0,274
Verificación	OK

Esfuerzos internos

N_c	458,9 kN
N_t	-858,9 kN
x_C	-0,541 m
y_C	0,859 m
x_T	0,177 m
y_T	-0,589 m
z	1,616 m

Convergencia

N_{iter}	4
Tol	$7,72 \times 10^{-10}$
N_{int}	-400,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	900,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	400,0 kN · m
ε_0	$0,189 \times 10^{-3}$
κ_x	$-0,261 \times 10^{-3}$
κ_y	$-0,087 \times 10^{-3}$

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

Cargas impuestas: $N = 0$ kN, $M_z = 6000$ kN · m, $M_y = 6000$ kN · m

Visualization of stresses and strains

Load 2 σ ε N Q M Details

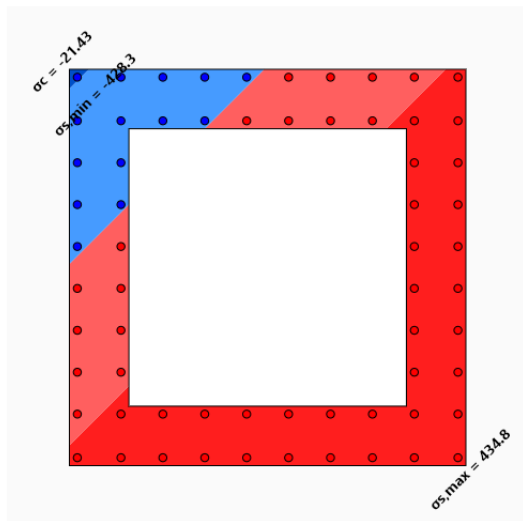


Figura 9: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

Load 2 σ ε N Q M Details

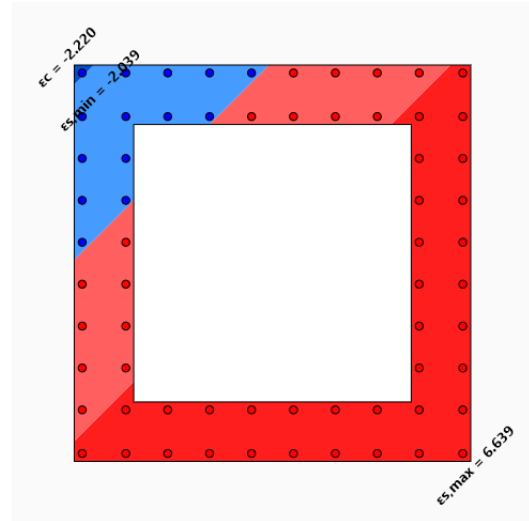


Figura 10: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deformaciones

σ_c	-21,43 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-428,28 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434,78 MPa
ε_c	-2,220‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-2,039‰
$\varepsilon_{s, \max}$	6,639‰
CS	0,634
Verificación	OK

Esfuerzos internos

N_c	5800,7 kN
N_t	-1293,2 kN
x_C	-0,751 m
y_C	0,751 m
x_T	-0,085 m
y_T	0,265 m
z	0,824 m

Convergencia

N_{iter}	9
Tol	$2,35 \times 10^{-7}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	6000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	6000,0 kN · m
ε_0	$2,300 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,260 \times 10^{-3}$
κ_y	$-2,260 \times 10^{-3}$

Sección personalizada — Viga en U

Datos de entrada

Geometría definida mediante **contorno personalizado** (puntos XY) y tabla de armadura (x, y, φ) — para formas no estándar.

Hormigón

- Viga en U con almas inclinadas
- Altura total $h = 1,20$ m

Armadura

- Espaciamiento uniforme 150 mm
- Losa inferior: 11 armaduras, diámetro 20 mm
- Almas: 49 armaduras, diámetro 12 mm
- 2 capas por alma

Leyes de material (BAEL 91)

- Hormigón: $f_{c28} = 30$ MPa, $\theta = 0,85$
- Acero fe500: $f_e = 500$ MPa

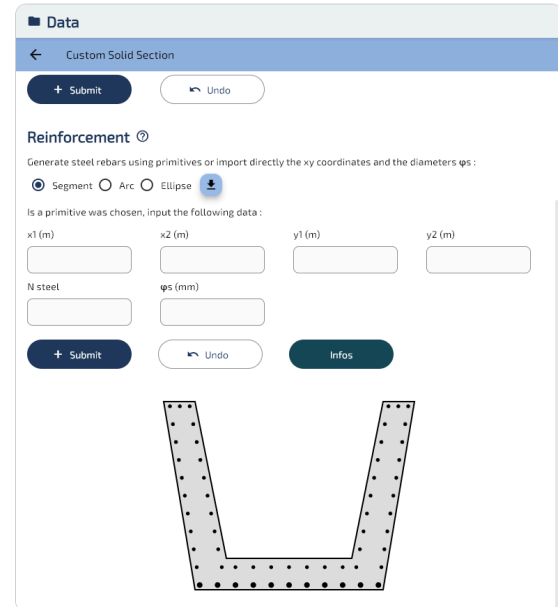


Figura 11: Viga en U — geometría y armadura.

ELS — Flexión simple (M_z)

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

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q M Details

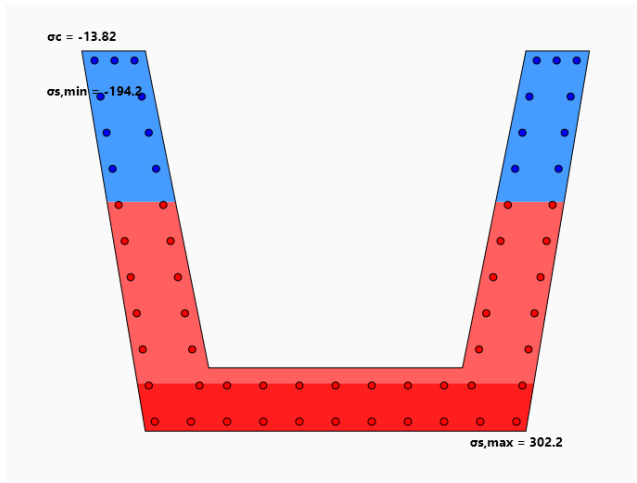


Figura 12: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

Load 1 σ ε N Q M Details

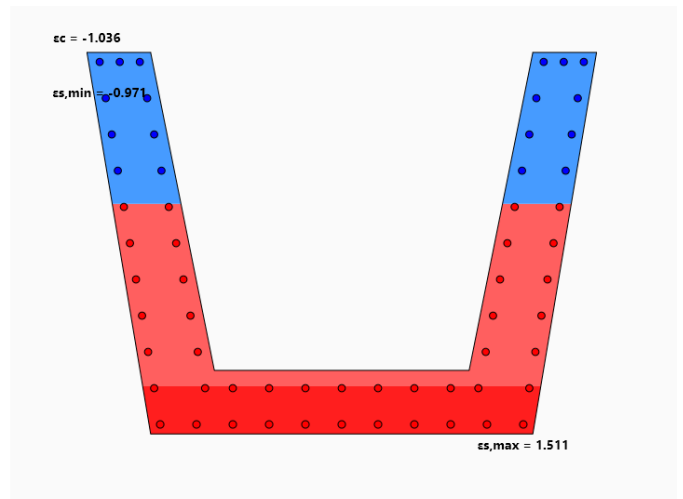


Figura 13: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deformaciones

σ_c	-13,82 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-194,19 MPa
$\sigma_{s, \max}$	302,23 MPa
ε_c	-1,036‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-0,971‰
$\varepsilon_{s, \max}$	1,511‰
CS	1,209
Verificación	KO

Esfuerzos internos

N_c	1593,2 kN
N_t	-1593,2 kN
x_C	0,000 m
y_C	0,571 m
x_T	0,000 m
y_T	-0,371 m
z	0,942 m

Convergencia

N_{iter}	4
Tol	$2,26 \times 10^{-13}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	1500,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	0,0 kN · m
ε_0	$0,543 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,177 \times 10^{-3}$
κ_y	$0,000 \times 10^{-3}$

En ELS, la verificación es KO: $\sigma_{s, \max} = 302,2$ MPa supera la tensión admisible BAEI $\bar{\sigma}_s = 250,0$ MPa (fisuración perjudicial, $\eta = 1,60$), dando CS = 1,209.

ELU — Flexión biaxial ($M_y + M_z$)

Cargas impuestas: $N = 0$ kN, $M_z = 2000$ kN · m, $M_y = 500$ kN · m

Visualization of stresses and strains

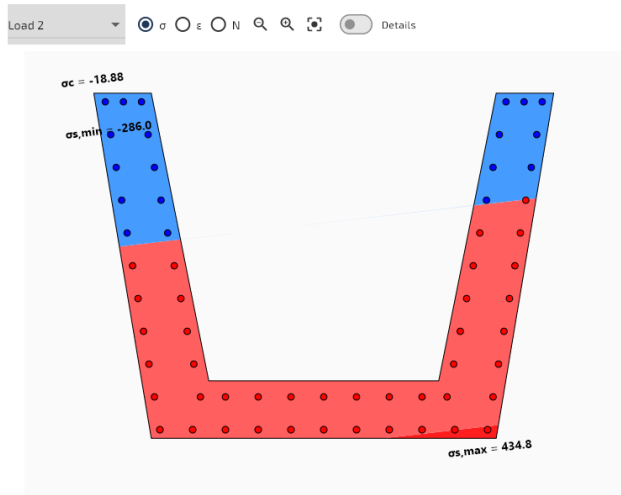


Figura 14: Distribución de tensiones.

Visualization of stresses and strains

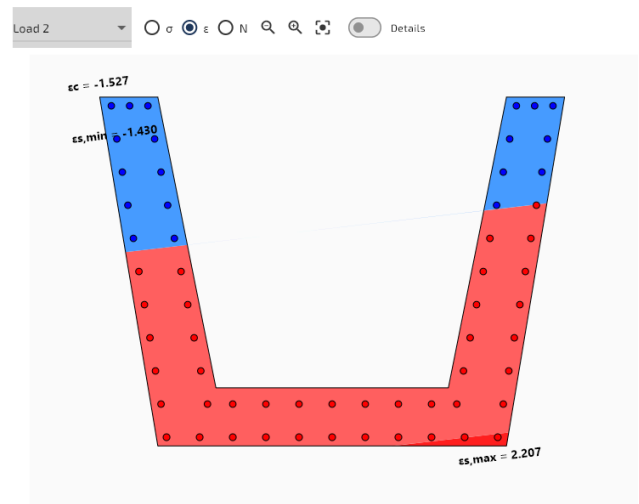


Figura 15: Distribución de deformaciones.

Tensiones y deformaciones

σ_c	-18,88 MPa
$\sigma_{s, \min}$	-286,01 MPa
$\sigma_{s, \max}$	434,78 MPa
ε_c	-1,527‰
$\varepsilon_{s, \min}$	-1,430‰
$\varepsilon_{s, \max}$	2,207‰
CS	0,436
Verificación	OK

Esfuerzos internos

N_c	2158,2 kN
N_t	-2158,2 kN
x_C	-0,192 m
y_C	0,562 m
x_T	0,039 m
y_T	-0,365 m
z	0,955 m

Convergencia

N_{iter}	4
Tol	$5,50 \times 10^{-9}$
N_{int}	0,0 kN
$M_{z, \text{int}}$	2000,0 kN · m
$M_{y, \text{int}}$	500,0 kN · m
ε_0	$0,772 \times 10^{-3}$
κ_x	$-2,811 \times 10^{-3}$
κ_y	$-0,325 \times 10^{-3}$

Validación de resultados

Verificación del equilibrio interno

Las cargas impuestas (N, M_y, M_z) son la entrada. SectionPro encuentra iterativamente el estado de deformación e integra las tensiones para obtener los esfuerzos internos ($N_{\text{int}}, M_{y,\text{int}}, M_{z,\text{int}}$). En convergencia:

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

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 %
Cuadrada 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.

Benchmark de rendimiento — 100.000 casos de carga

100.000 casos de carga (ELS/ELU, uniaxial/biaxial, OK/KO) se ejecutan en **cada una de las tres secciones**. El benchmark mide el tiempo de cálculo puro. Convergencia obtenida para los 300.000 casos.

Métrica	Hexagonal	Cuadrada hueca	Viga en U
Casos de carga	100.000	100.000	100.000
Tiempo de cálculo	0,173 s	0,304 s	0,260 s
Velocidad	578.000 cargas/s	329.000 cargas/s	385.000 cargas/s

Las tres secciones se completan en menos de 0,3 s (329.000–578.000 casos/s), adecuado para verificaciones sistemáticas de envolventes de software de elementos finitos.

Exportación

SectionPro exporta resultados en **PDF**, **texto** y **Excel** (.xlsx) — con tensiones, esfuerzos internos, convergencia y figuras de distribución.

STRESS AND STRAIN VERIFICATION RESULTS $\sigma - \epsilon$

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-04 13:27

Load case #1 is the most unfavorable

Stresses and strains $\sigma - \epsilon$

σ and ϵ are the stresses and strains of concrete and steel (indices c and s). The safety factor reflects the ratio between maximum strain and limit strain. SF=1 therefore indicates non-verification of the material.

Param	Unit	#1	#2
σ_c	MPa	-13.82	-18.88
$\sigma_{s,min}$	MPa	-194.19	-286.01
$\sigma_{s,max}$	MPa	302.23	434.78
ϵ_c	‰	-1.036	-1.527
$\epsilon_{s,min}$	‰	-0.971	-1.430
$\epsilon_{s,max}$	‰	1.511	2.207
SF	-	1.209	0.436
Check	-	Ko	Ok

Internal forces

N_c and N_t 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	#1	#2
N_c	kN	1593.2	2158.2
N_t	kN	-1593.2	-2158.2
x_C	m	0.000	-0.192
y_C	m	0.571	0.561
x_T	m	0.000	0.039
y_T	m	-0.371	-0.365
z	m	0.942	0.955

Convergence

Given below are the number of iterations necessary for convergence of the solution algorithm, the tolerance achieved, the internal forces (N, M_z, M_y) and the deformation state of the section ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$).

Param	Unit	#1	#2
N_{iter}	-	4	4
Tol	-	9.99e-9	9.99e-9
N_{int}	kN	0.0	0.0
M_z_{int}	kN-m	1500.0	2000.0
M_y_{int}	kN-m	-0.0	500.00
ϵ_o	‰	0.543	0.772
ϵ_{xx}	‰	-2.177	-2.811
ϵ_{yy}	‰	-0.000	-0.325

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

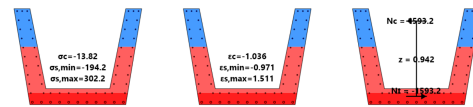
Figura 16: Exportación PDF — página 1: tablas de resultados.

STRESS AND STRAIN VERIFICATION RESULTS $\sigma - \epsilon$

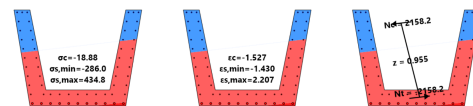
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-03-04 13:27

Given below are figures representing graphically the previous tabular results.

Load case n°1 - Safety Factor = 1.209 (σ, ϵ and N_c, N_t)



Load case n°2 - Safety Factor = 0.436 (σ, ϵ and N_c, N_t)



GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figura 17: Exportación PDF — página 2: figuras.

Conclusión

SectionPro identifica correctamente los casos que exceden la capacidad, con equilibrio interno exacto. Tres normas (EC2, NBR-6118, BAEL 91), geometrías y leyes de material son cubiertas.

Sección	Caso de carga	Norma	Verificación	Equilibrio Δ
Hexagonal	ELS (lineal)	EC2	OK	0,00 %
	ELU (no lineal)	EC2	KO	0,00 %
Cuadrada hueca	ELS (lineal)	NBR-6118	OK	0,00 %
	ELU (no lineal)	NBR-6118	OK	0,00 %
Viga en U	ELS (lineal)	BAEL 91	KO	0,00 %
	ELU (no lineal)	BAEL 91	OK	0,00 %

El benchmark muestra 0,17–0,30 s por sección (329.000–578.000 casos/s, 300.000 convergidos), adecuado para verificaciones de envolventes de software de elementos finitos.