

Secciones avanzadas

Modelado de secciones complejas en SectionPro

Aplicación a la sección sobre apoyo de un puente cajón pretensado

BridgeKernel · 2026

I Introducción

Las secciones estándar de vigas, columnas y muros generalmente se describen mediante un contorno único y un refuerzo uniforme. Las estructuras reales a menudo combinan varios materiales, huecos, capas de refuerzo separadas, tendones de pretensado o miembros de acero incrustados. Su análisis requiere una representación que preserve tanto la geometría como la ley constitutiva de cada componente.

Las secciones avanzadas de SectionPro responden a esta necesidad. Una sección avanzada se compone de dominios geométricos, armaduras pasivas, acero de pretensado, perfiles de acero estructural y placas delgadas. A cada componente se le asigna la ley de material utilizada en los análisis. La misma descripción se emplea después para calcular las propiedades de la sección, verificar tensiones y deformaciones bajo los esfuerzos de sección aplicados, calcular la abertura de fisuras y generar dominios de interacción.

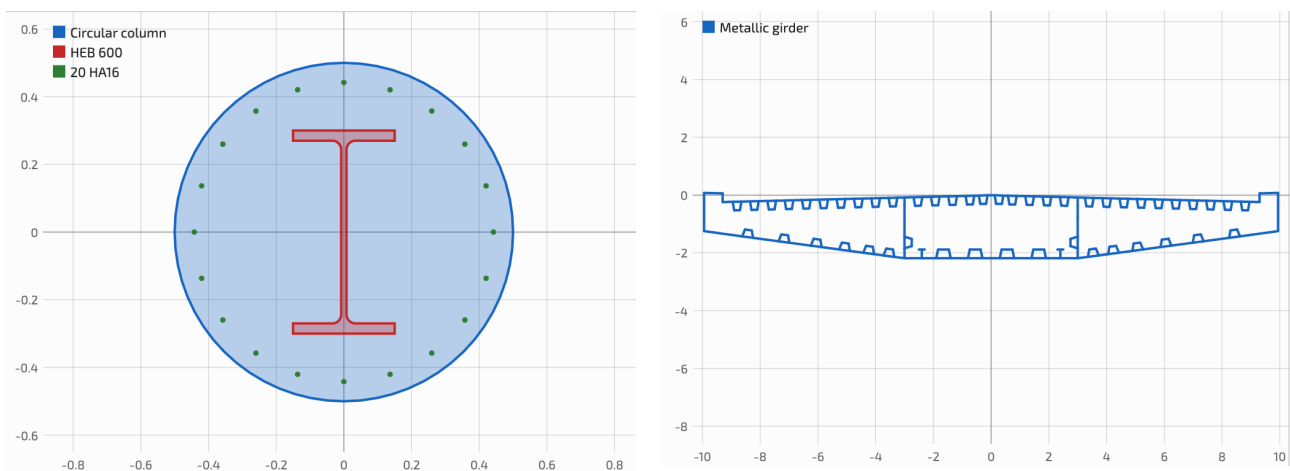
Este artículo presenta primero el modelo de datos de una sección avanzada. A continuación se utiliza como ejemplo una sección crítica sobre un apoyo en una viga cajón de hormigón pretensado. Esta geometría combina un gran vacío, refuerzos distribuidos a lo largo de varias caras y grupos de tendones dentro de un modelo.

I Definición de una sección avanzada

Una sección avanzada combina varias familias de objetos mecánicos. El solucionador conserva su posición en el sistema de coordenadas de la sección y evalúa su contribución utilizando la ley asignada a cada objeto.

- Un dominio geométrico, o GeoDomain, está definido por un contorno exterior y puede contener varios huecos. Una sección puede contener varios dominios, cada uno con su propia ley de material.
- El refuerzo pasivo se organiza en capas independientes. Cada barra tiene una posición, un diámetro y una ley del acero, lo que permite representar capas, caras y grados de acero separados.

- El acero de pretensado se agrupa en familias de tendones definidas por sus posiciones, áreas, parámetros de adherencia y estado inicial.
- Los perfiles de acero estructural pueden seleccionarse de la biblioteca integrada de 535 referencias, que cubre once familias europeas: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP y perfiles huecos cuadrados, rectangulares y circulares. Pueden representarse mediante un GeoDomain integrado sobre el área real, incluidas las transiciones curvas y los redondeos, o mediante un conjunto de elementos TSP.
- Un elemento TSP describe la línea media recta o curva de una placa y su espesor. Su contribución se obtiene mediante integración lineal, suponiendo una tensión uniforme en el espesor. Esta representación es adecuada para placas delgadas, perfiles de acero estructural y cajones multicelulares.
- Las leyes de material se asignan directamente a los componentes. Pueden utilizar los modelos normativos de SectionPro o una relación tensión-deformación general definida por el usuario para los estados límite considerados.



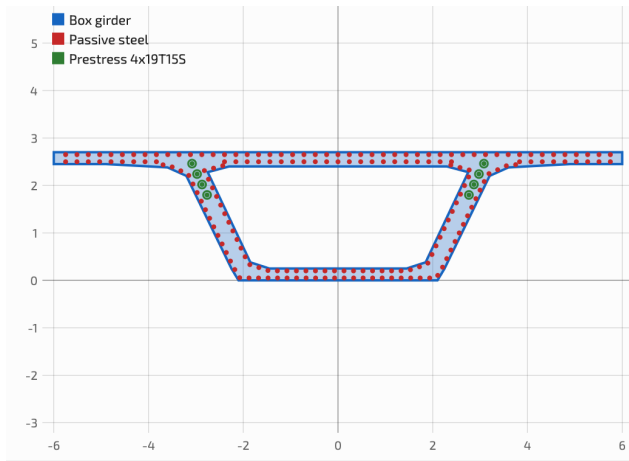
Pilar mixto: hormigón, sección HEB y armadura pasiva.

Viga cajón de acero: 267 elementos TSP y 51 celdas Bredt.

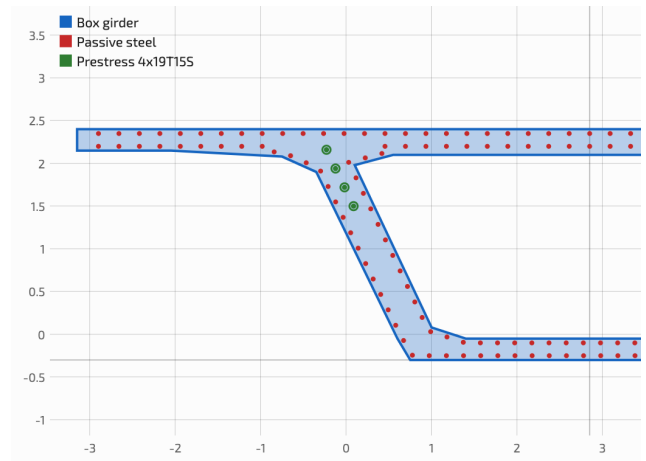
Figura 1: Ejemplos de secciones avanzadas mostradas en SectionPro.

| Ejemplo: viga cajón de puente

La sección estudiada es una sección crítica sobre apoyo de un cajón unicelular. Tiene 12,00 m de ancho y 2,70 m de canto. La losa superior, las almas inclinadas, las cartelas y la losa inferior forman un único dominio de hormigón. La celda central se define como un hueco interior.



(a) Vista general de la sección.



(b) Detalle de la cartela superior izquierda.

Figura 2: Modelo SectionPro: dominio de hormigón, armadura pasiva y grupos de pretensado.

Componente	Material	Definición en ejemplo
GeoDomain 1	Hormigón C45/55	Contorno del cajón, una celda interior, área bruta de 6,759 m ²
Armadura pasiva	B500B	186 barras HA16 distribuidas a 50 mm de los paramentos
Pretensado	Y1860	Ocho tendones 19T15S, cuatro a lo largo de cada alma, 2.850 mm ² por tendón y vainas de 100 mm

La sección contiene 186 barras de armadura y ocho tendones de pretensado. Las cuatro vainas dispuestas a lo largo de cada alma se alinean con su dirección y penetran en la cartela superior. Sus coordenadas se generan mediante un script y se guardan en el archivo de la sección avanzada. El mismo archivo se utiliza para todos los análisis presentados a continuación.

Esfuerzos de sección y pretensado

El vector total de esfuerzos de sección se descompone en los efectos de las cargas permanentes G , las cargas variables Q y el pretensado P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Para la sección considerada, el modelo estructural de elementos finitos desarrollado en nuestro software LFEM proporciona los siguientes vectores de esfuerzos $G + Q$, en MN y MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ELS}} = (0; -58,650; 0)$ y $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ELU}} = (0; -92,650; 0)$.

En SectionPro, el pretensado se considera en dos niveles. Su acción sobre la estructura, incluidos el efecto primario y el posible efecto secundario, debe incluirse en el vector de esfuerzos aplicado. La simetría transversal de la sección y del trazado de los tendones anula aquí el momento respecto a y ; por tanto, $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{primario}} + M_{z,P}^{\text{secundario}}, 0)$.

La tensión efectiva del tendón define el estado inicial asociado con la acción de pretensado. En el cálculo de la resistencia, el estado de deformación de equilibrio cambia la tensión del tendón: el alargamiento produce un incremento positivo de la tensión y aumenta la contribución del tendón, mientras que el acortamiento produce una disminución de la tensión.

En el ejemplo, la tensión efectiva después de las pérdidas es de 1116 MPa. La acción correspondiente produce una fuerza axial de 25,445 MN. En la sección de apoyo, los tendones se encuentran por

encima del centroide, dando un momento primario de $+8,994 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Para este perfil de tendón, el modelo estructural da un momento secundario del mismo signo, igual a $+4,400 \text{ MN} \cdot \text{m}$. El momento de pretensado introducido en la sección es por tanto $+13,394 \text{ MN} \cdot \text{m}$.

Vector final de esfuerzos	$N \text{ [MN]}$	$M_z \text{ [MN} \cdot \text{m]}$	$M_y \text{ [MN} \cdot \text{m]}$
ELS	25,445	$-45,256$	0,000
ELU	25,445	$-79,256$	0,000

Resultados del modelo completo

Características mecánicas

SectionPro calcula las propiedades de las secciones bruta, neta y homogeneizada. En este ejemplo, de la sección neta solo se deducen las vainas de pretensado; se conserva la armadura pasiva. En la sección homogeneizada, tanto el acero pasivo como el acero de pretensado utilizan el coeficiente de equivalencia $n = 5$.

Sección	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$y_G \text{ [m]}$	$I_{zz} \text{ [m}^4\text{]}$	$I_{yy} \text{ [m}^4\text{]}$
Bruto	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Neto	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Homogeneizada	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

Las propiedades de torsión y cortante de la sección bruta se dan a continuación.

$J \text{ [m}^4\text{]}$	$A_{sy} \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{sz} \text{ [m}^2\text{]}$	$y_T \text{ [m]}$	$\Gamma \text{ [m}^6\text{]}$
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

El campo mostrado a continuación corresponde a las tensiones tangenciales producidas por un momento torsor unitario.

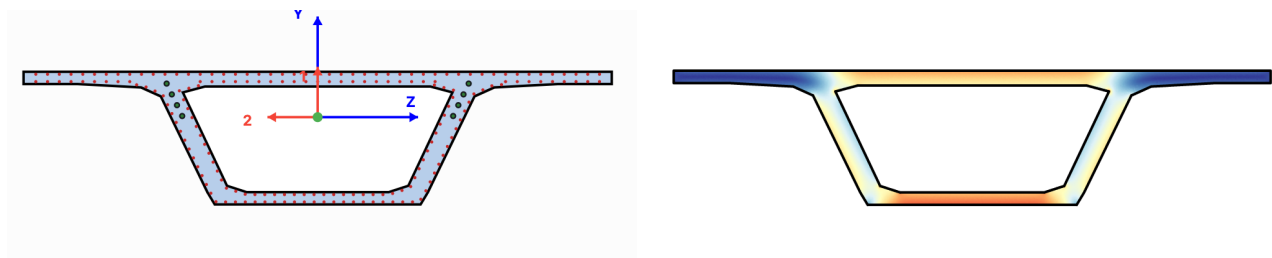


Figura 3: Ejes baricéntricos y principales (izquierda) y campo de tensiones tangenciales bajo torsión unitaria (derecha).

Equilibrio en ELS y ELU

El solver determina el estado de deformación de la sección que equilibra los esfuerzos aplicados. Las tensiones se obtienen después a partir de las respectivas leyes constitutivas del hormigón, la armadura pasiva y los tendones. Los resultados presentados corresponden a la combinación característica de ELS y a la combinación fundamental de ELU.

Para tendones, la tensión final se evalúa a partir de la deformación acumulada $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. El término ε_0 es la deformación asociada con la tensión efectiva de 1116 MPa; $\Delta\varepsilon_1$ representa cualquier descompresión del hormigón adyacente al tendón; y $\Delta\varepsilon_2$ es la deformación obtenida del equilibrio de la sección. El efecto de descompresión está habilitado en este ejemplo.

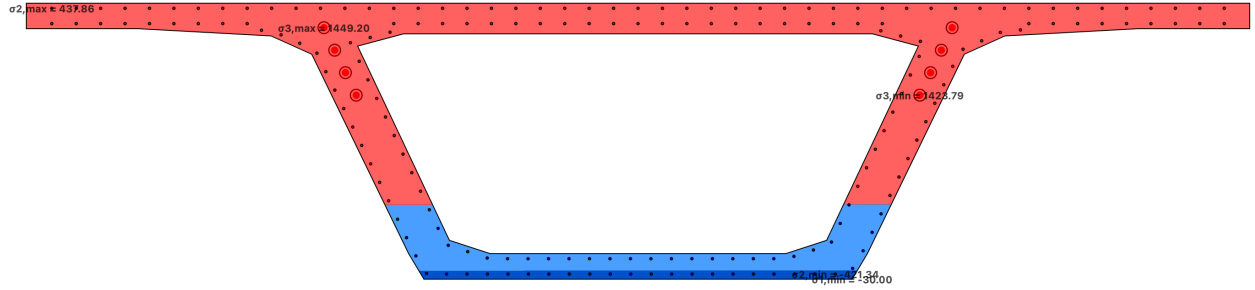


Figura 4: Campo de tensiones normales en ELU obtenido mediante la verificación no lineal del vector final de esfuerzos.

Resultado	Unidad	ELS característico	ELU fundamental
Hormigón			
Deformación mínima, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	-0,531	-2,262
Tensión mínima, $\sigma_{b, \min}$	MPa	-19,264	-30,000
Aceros pasivos			
Deformación mínima, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	-0,512	-2,107
Deformación máxima, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Tensión mínima, $\sigma_{s, \min}$	MPa	-102,31	-421,34
Tensión máxima, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Pretensado			
Deformación mínima, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Tensión total mínima, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Incremento de tensión mínimo, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Deformación máxima, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Tensión total máxima, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Incremento de tensión máximo, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Resolución			
Iteraciones		4	6
Residual de convergencia		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Convergencia		Sí	Sí

En el ELU fundamental, el hormigón de la losa inferior alcanza localmente su meseta plástica en compresión, mientras se desarrolla una zona de tracción importante en la losa superior y en la parte superior de las almas. Los tendones están fuertemente movilizados, con incrementos de tensión comprendidos entre 307,8 y 333,2 MPa.

En el ELS característico se satisfacen las comprobaciones de tensiones: la compresión máxima del hormigón es de 19,264 MPa, la tracción máxima en la armadura pasiva de 99,09 MPa y la tensión total máxima de los tendones de 1198,23 MPa. La abertura de fisura, $w_k = 0,174$ mm, sigue siendo reducida aunque aquí se evalúe bajo la combinación característica.

Dominios de interacción

La geometría avanzada y las leyes de material también se utilizan para calcular los dominios de resistencia. La curva $N-M_z$ es un corte del dominio para $M_y = 0$. La superficie $N-M_z-M_y$ extiende el cálculo a todas las direcciones de flexión.

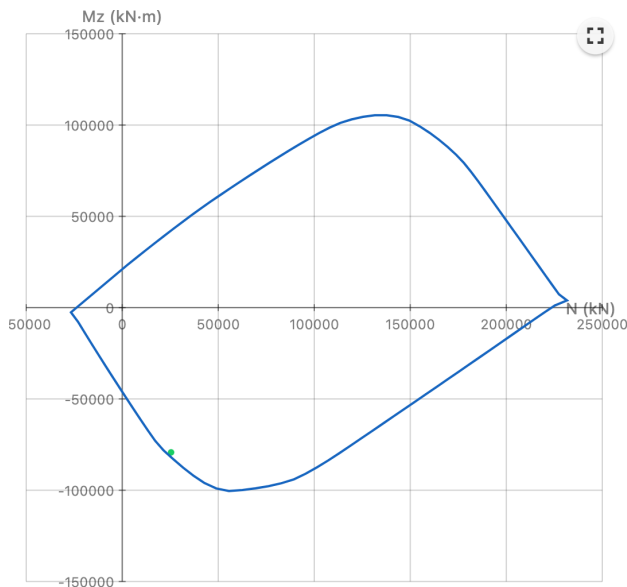


Figura 5: Curva de interacción $N-M_z$ en ELU para $M_y = 0$, con el vector final de esfuerzos.

La siguiente tabla muestra el cuadro delimitador de la superficie de interacción, definido por los valores mínimo y máximo de cada uno de sus tres componentes.

Componente	Mínimo	Máximo
N	-26,70 MN	231,62 MN
M_z	-100,41 MN · m	105,35 MN · m
M_y	-287,82 MN · m	287,82 MN · m

Las capacidades positivas y negativas respecto a M_y coinciden, de acuerdo con la simetría transversal de la sección. La diferencia entre las capacidades positivas y negativas respecto a M_z refleja la distinta geometría y armadura de las losas superior e inferior. El vector final de esfuerzos se encuentra muy próximo al límite del dominio de resistencia. El módulo de distancia al dominio da $FS = 0,983$: ligeramente inferior a la unidad, pero muy próximo al límite.

Rendimiento

La siguiente tabla muestra los tiempos de ejecución de las llamadas al núcleo de SectionPro para el modelo de cajón. Estos valores excluyen la interfaz gráfica y la representación de los resultados.

Análisis	Tiempo de cálculo
Características mecánicas	28,3 ms
Estado de tensiones y deformaciones	0,73 ms
Cálculo de apertura de grietas	2,38 ms
Curva de interacción $N-M_z$, 200 puntos	1,11 ms
Superficie de interacción $N-M_z-M_y$, malla 50×50	208 ms

Estos resultados ilustran uno de los puntos fuertes de SectionPro: la optimización exhaustiva del núcleo mantiene tiempos de cálculo extremadamente bajos, incluso para los análisis no lineales y la construcción de dominios de resistencia tridimensionales. Las comprobaciones y las iteraciones

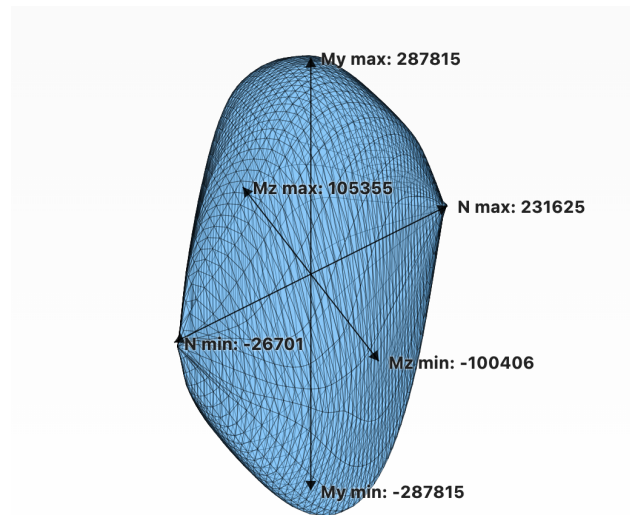


Figura 6: Superficie de interacción $N-M_z-M_y$ en ELU.

de diseño devuelven por tanto un resultado casi inmediato, lo que contribuye directamente a una experiencia de usuario fluida.

Conclusión

Las secciones avanzadas combinan en un único modelo varios dominios geométricos y sus huecos, capas de armadura pasiva, grupos de acero de pretensado, perfiles de acero estructural y placas delgadas. Cada componente conserva su propia ley de material en los distintos estados límite.

El cajón estudiado ilustra esta representación. Su sección sobre apoyo combina un dominio de hormigón con un hueco interior, armaduras distribuidas en los paramentos y tendones de pretensado dispuestos a lo largo de las almas. El pretensado se incorpora al vector de esfuerzos aplicado mediante sus efectos primario y secundario. La contribución resistente de los tendones se evalúa a partir de la variación de su tensión, teniendo en cuenta el pretensado inicial, la posible descompresión del hormigón adyacente y el estado de deformación de equilibrio de la sección.

Por lo tanto, el modo avanzado puede analizar prácticamente cualquier sección transversal, independientemente de la complejidad geométrica o de los materiales con los que esté ensamblada. Esta generalidad naturalmente permanece sujeta a los supuestos del análisis de secciones transversales, en particular que las secciones planas permanecen planas y que los componentes vinculados satisfacen la compatibilidad de deformaciones. Gracias al núcleo de cálculo optimizado, incluso estos modelos detallados conservan tiempos de respuesta casi instantáneos.