

Secções avançadas

Modelação de secções complexas no SectionPro

Aplicação à secção sobre apoio de uma ponte em caixão pré-esforçado

BridgeKernel · 2026

I Introdução

As secções padrão de vigas, pilares e paredes são geralmente descritas por um único contorno e armadura uniforme. Estruturas reais muitas vezes combinam vários materiais, vazios, camadas de reforço separadas, tendões de pré-esforço ou elementos de aço embutidos. A sua análise requer uma representação que preserve tanto a geometria como a lei constitutiva de cada componente.

As secções avançadas do SectionPro respondem a esta necessidade. Uma secção avançada é composta por domínios geométricos, armadura passiva, aço de pré-esforço, perfis de aço estrutural e chapas finas. A cada componente é atribuída a lei do material utilizada nas análises. A mesma descrição serve depois para calcular as propriedades da secção, verificar tensões e extensões sob os esforços de secção aplicados, calcular a abertura de fissuras e gerar domínios de interação.

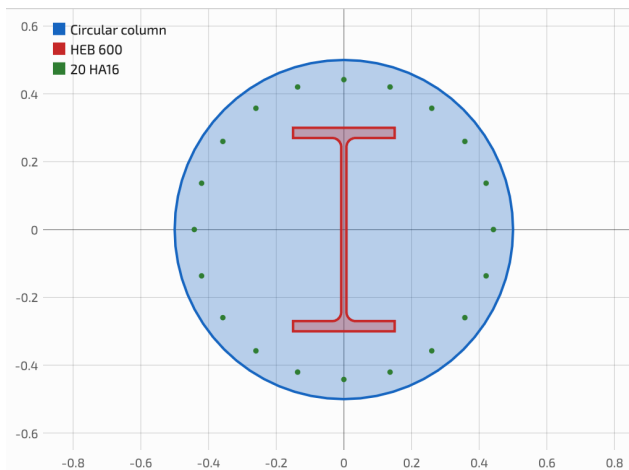
Este artigo apresenta primeiro o modelo de dados de uma secção avançada. Uma secção crítica sobre um apoio em uma viga caixão de betão protendido é então usada como exemplo. Esta geometria combina um grande vazio, armaduras distribuídas ao longo de várias faces e grupos de cabos dentro de um modelo.

I Definição de uma secção avançada

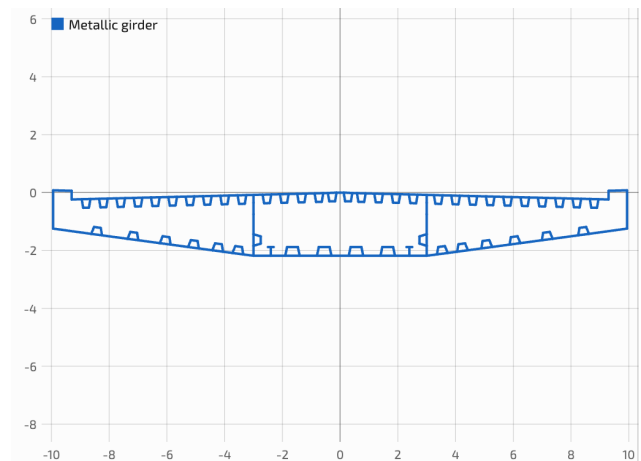
Uma secção avançada combina diversas famílias de objetos mecânicos. O solucionador preserva sua posição no sistema de coordenadas da secção e avalia sua contribuição usando a lei atribuída a cada objeto.

- Um domínio geométrico, ou GeoDomain, é definido por um contorno externo e pode conter vários vazios. Uma secção pode conter vários domínios, cada um com sua própria lei material.
- O reforço passivo é organizado em camadas independentes. Cada barra possui uma posição, um diâmetro e uma lei de aço, permitindo a representação de camadas, faces e classes de aço separadas.
- Os aços de pré-esforço são agrupados em famílias de cabos definidas pelas posições, áreas, parâmetros de aderência e estado inicial.

- Os perfis de aço estrutural podem ser selecionados na biblioteca integrada de 535 referências, que abrange onze famílias europeias: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP e perfis tubulares quadrados, retangulares e circulares. Podem ser representados por um GeoDomain integrado sobre a área real, incluindo transições curvas e concordâncias, ou por um conjunto de elementos TSP.
- Um elemento TSP descreve a linha média reta ou curva de uma placa e sua espessura. Sua contribuição é obtida pela integração linear, com a tensão assumida como uniforme ao longo da espessura. Esta representação é adequada para chapas finas, perfis de aço estrutural e perfis de caixa multicélula.
- As leis dos materiais são atribuídas diretamente aos componentes. Podem utilizar os modelos normativos fornecidos pelo SectionPro ou uma relação tensão–extensão geral definida pelo utilizador para os estados limite considerados.



Pilar misto: betão, seção HEB e armadura passiva.

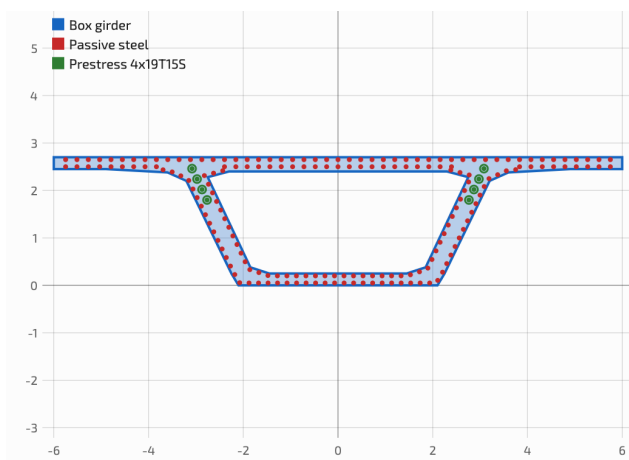


Viga caixão de aço: 267 elementos TSP e 51 células Bredt.

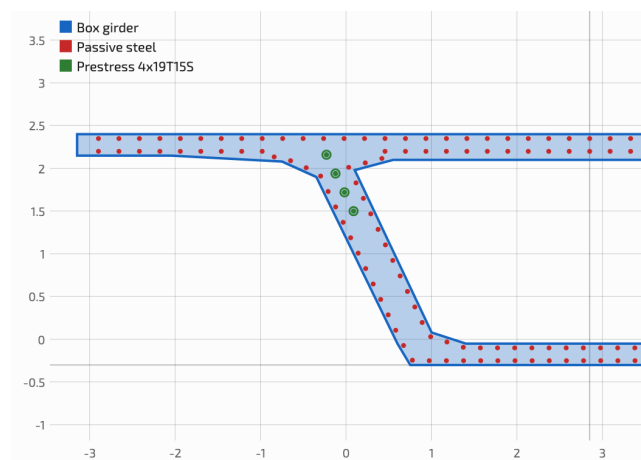
Figura 1: Exemplos de seções avançadas apresentadas no SectionPro.

Exemplo: ponte em caixão

A seção estudada é uma seção crítica sobre o apoio de um caixão unicelular. Tem 12,00 m de largura e 2,70 m de altura. A laje superior, as almas inclinadas, os esquadros e a laje inferior formam um único domínio de betão. A célula central é definida como vazio interior.



(a) Visão geral da seção.



(b) Detalhe do esquadro superior esquerdo.

Figura 2: Modelo SectionPro: domínio de betão, armadura passiva e grupos de pré-esforço.

Componente	Material	Definição no exemplo
GeoDomain 1	Betão C45/55	Contorno do caixão, uma célula interior, área bruta de 6,759 m ²
Armadura passiva	B500B	186 varões HA16 distribuídos a 50 mm das faces de betão
Pré-esforço	Y1860	Oito cabos 19T15S, quatro ao longo de cada alma, 2.850 mm ² por cabo e bainhas de 100 mm

A secção contém 186 varões de armadura e oito cabos de pré-esforço. As quatro bainhas ao longo de cada alma estão alinhadas com a direção da alma e prolongam-se até ao esquadro superior. As coordenadas são geradas por script e guardadas no ficheiro da secção avançada. O mesmo ficheiro é utilizado em todas as análises apresentadas de seguida.

Esforços de secção e pré-esforço

O vetor total de esforços de secção é decomposto nos efeitos das cargas permanentes G , das cargas variáveis Q e do pré-esforço P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Para a secção considerada, o modelo estrutural de elementos finitos desenvolvido no nosso software LFEM fornece os seguintes vetores de esforços $G + Q$, em MN e MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ELS}} = (0; -58,650; 0)$ e $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ELU}} = (0; -92,650; 0)$.

No SectionPro, o pré-esforço é considerado em dois níveis. A sua ação na estrutura, incluindo o efeito primário e o eventual efeito secundário, deve ser incluída no vetor de esforços aplicado. A simetria transversal da secção e do traçado dos cabos anula aqui o momento em torno de y ; portanto $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{primário}} + M_{z,P}^{\text{secundário}}, 0)$.

A tensão efetiva no tendão define o estado inicial associado à ação de pré-esforço. No cálculo da resistência, o estado de deformação de equilíbrio altera então a tensão do tendão: o alongamento produz um incremento de tensão positivo e aumenta a contribuição do tendão, enquanto o encurtamento produz uma diminuição da tensão.

No exemplo, a tensão efetiva após perdas é de 1116 MPa. A ação correspondente produz uma força axial de 25,445 MN. Na secção sobre apoio, os cabos encontram-se acima do centro de gravidade, gerando um momento primário de +8,994 MN · m. Para este traçado, o modelo estrutural fornece um momento secundário com o mesmo sinal, igual a +4,400 MN · m. O momento de pré-esforço introduzido na secção é, portanto, +13,394 MN · m.

Vetor final de esforços	N [MN]	M_z [MN·m]	M_y [MN·m]
ELS	25,445	-45,256	0,000
ELU	25,445	-79,256	0,000

Resultados no modelo completo

Características mecânicas

O SectionPro calcula as propriedades das secções bruta, líquida e homogeneizada. Neste exemplo, apenas as bainhas de pré-esforço são deduzidas da secção líquida; a armadura passiva é mantida. Na secção homogeneizada, tanto o aço passivo como o aço de pré-esforço utilizam o coeficiente de equivalência $n = 5$.

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

As propriedades de torção e cisalhamento da secção bruta são fornecidas abaixo.

J [m ⁴]	A_{sy} [m ²]	A_{sz} [m ²]	y_T [m]	Γ [m ⁶]
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

O campo apresentado abaixo corresponde às tensões de corte produzidas por um momento torsor unitário.

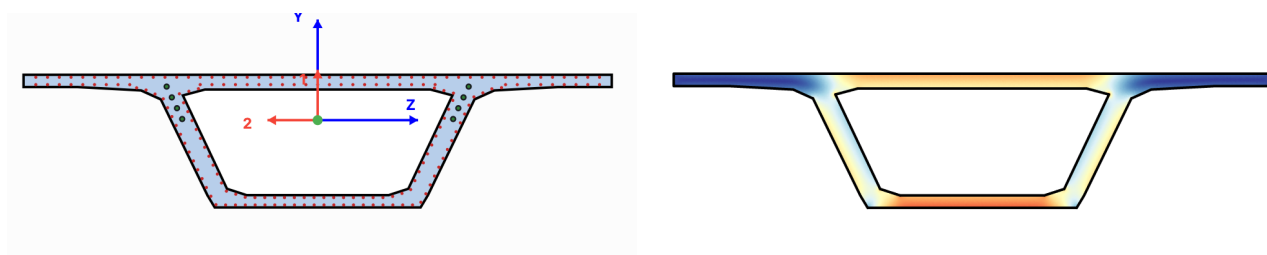


Figura 3: Eixos baricêntricos e principais (esquerda) e campo de tensões de corte sob torção unitária (direita).

Equilíbrio no ELS e ELU

O solver determina o estado de deformação da secção que equilibra os esforços aplicados. As tensões são depois obtidas a partir das respectivas leis constitutivas do betão, da armadura passiva e dos cabos. Os resultados apresentados correspondem à combinação característica de ELS e à combinação fundamental de ELU.

Para os cabos, a tensão final é avaliada a partir da extensão acumulada $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. O termo ε_0 é a extensão associada à tensão efetiva de 1116 MPa; $\Delta\varepsilon_1$ representa uma eventual descompressão do betão adjacente ao cabo; e $\Delta\varepsilon_2$ é a extensão obtida pelo equilíbrio da secção. O efeito de descompressão está ativado neste exemplo.

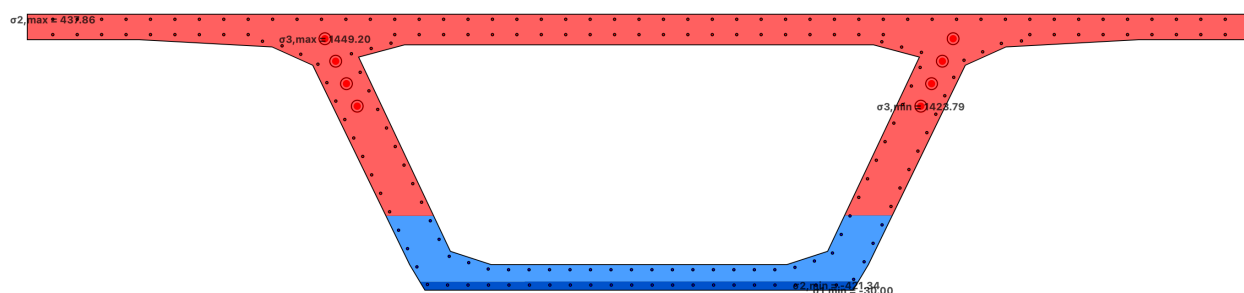


Figura 4: Campo de tensões normais no ELU obtido pela verificação não linear do vetor final de esforços.

Resultado	Unidade	ELS característico	ELU fundamental
Betão			
Deformação mínima, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	-0,531	-2,262
Tensão mínima, $\sigma_{b, \min}$	MPa	-19,264	-30,000
Aços passivos			
Deformação mínima, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	-0,512	-2,107
Deformação máxima, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Tensão mínima, $\sigma_{s, \min}$	MPa	-102,31	-421,34
Tensão máxima, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Pré-esforço			
Deformação mínima, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Tensão total mínima, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Incremento mínimo de tensão, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Deformação máxima, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Tensão total máxima, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Incremento máximo de tensão, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Resolução			
Iterações		4	6
Resíduo de convergência		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Convergência		Sim	Sim

No ELU fundamental, o betão da laje inferior atinge localmente o patamar plástico em compressão, enquanto se desenvolve uma zona de tração importante na laje superior e na parte superior das almas. Os cabos são fortemente mobilizados, com incrementos de tensão entre 307,8 e 333,2 MPa.

No ELS característico, as verificações de tensões são satisfeitas: a tensão máxima de compressão do betão é 19,264 MPa, a tensão máxima de tração na armadura passiva é 99,09 MPa e a tensão total máxima nos cabos é 1198,23 MPa. A abertura de fissura, $w_k = 0,174$ mm, permanece reduzida, embora seja avaliada aqui sob a combinação característica.

Domínios de interação

A geometria avançada e as leis dos materiais também são utilizadas para calcular os domínios de resistência. A curva $N-M_z$ é um corte do domínio para $M_y = 0$. A superfície $N-M_z-M_y$ estende o cálculo a todas as direções de flexão.

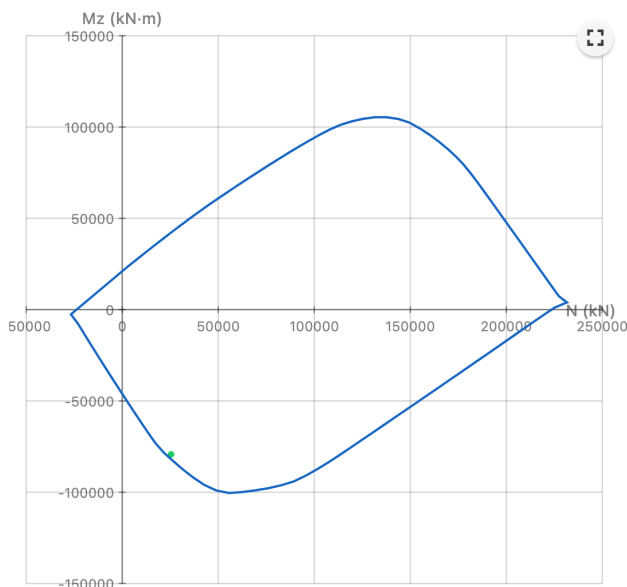


Figura 5: Curva de interação N - M_z no ELU para $M_y = 0$, com o vetor final de esforços.

A tabela a seguir fornece a caixa delimitadora da superfície de interação, definida pelos valores mínimo e máximo de cada um de seus três 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

As capacidades positivas e negativas em torno de M_y coincidem, de acordo com a simetria transversal da seção. A diferença entre as capacidades positivas e negativas em torno de M_z reflete a geometria e a armadura distintas das lajes superior e inferior. O vetor final de esforços situa-se muito próximo do limite do domínio de resistência. O módulo de distância ao domínio fornece $FS = 0,983$: ligeiramente inferior à unidade, mas muito próximo do limite.

Desempenho

A tabela abaixo apresenta os tempos de execução das chamadas ao núcleo do SectionPro para o modelo do caixão. Estes valores excluem a interface gráfica e a representação dos resultados.

Análise	Tempo de cálculo
Características mecânicas	28,3 ms
Estado de tensões e deformações	0,73 ms
Cálculo da abertura de fissuras	2,38 ms
Curva de interação N - M_z , 200 pontos	1,11 ms
Superfície de interação N - M_z - M_y , malha 50×50	208 ms

Estes resultados ilustram um dos pontos fortes do SectionPro: a otimização extensiva do núcleo mantém os tempos de cálculo extremamente baixos, inclusive nas análises não lineares e na construção de domínios de resistência tridimensionais. As verificações e as iterações de projeto fornecem assim resultados quase imediatos, contribuindo diretamente para uma experiência de utilização fluida.

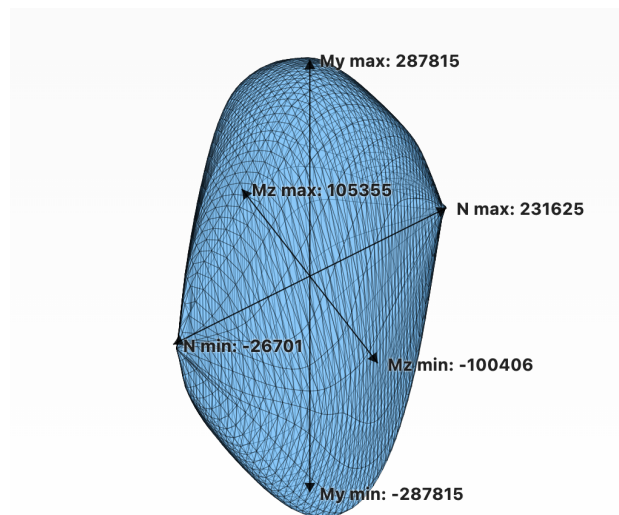


Figura 6: Superfície de interação N - M_z - M_y no ELU.

I Conclusão

As secções avançadas combinam, num único modelo, vários domínios geométricos e os respetivos vazios, camadas de armadura passiva, grupos de aço de pré-esforço, perfis de aço estrutural e chapas finas. Cada componente mantém a sua própria lei do material nos diferentes estados limite.

O caixão estudado ilustra esta representação. A sua secção sobre apoio combina um domínio de betão com vazio interior, armaduras distribuídas pelas faces e cabos de pré-esforço dispostos ao longo das almas. O pré-esforço entra no vetor de esforços aplicado através dos efeitos primário e secundário. A contribuição resistente dos cabos é avaliada a partir da variação da sua tensão, tendo em conta o pré-esforço inicial, uma eventual descompressão do betão adjacente e o estado de deformação de equilíbrio da secção.

O modo avançado pode, portanto, analisar praticamente qualquer secção transversal, independentemente da complexidade geométrica ou dos materiais a partir dos quais é montada. Esta generalidade permanece naturalmente sujeita aos pressupostos da análise de secção transversal, em particular que as secções planas permanecem planas e que os componentes ligados satisfazem a compatibilidade de deformações. Graças ao núcleo de cálculo otimizado, mesmo esses modelos detalhados mantêm tempos de resposta quase instantâneos.