

Seções avançadas

Modelagem de seções complexas no SectionPro

Aplicação à seção sobre apoio de uma ponte em caixão protendido

BridgeKernel · 2026

I Introdução

As seções 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 protensão ou elementos de aço embutidos. A sua análise requer uma representação que preserve tanto a geometria como a lei constitutiva de cada componente.

As seções avançadas do SectionPro atendem a essa necessidade. Uma seção avançada é montada a partir de domínios geométricos, armadura passiva, aço de protensão, perfis de aço estrutural e chapas finas. A cada componente é atribuída a lei de material utilizada nas análises. A mesma descrição é então usada para calcular as propriedades da seção, verificar tensões e deformações sob os esforços de seção aplicados, calcular a abertura de fissuras e gerar domínios de interação.

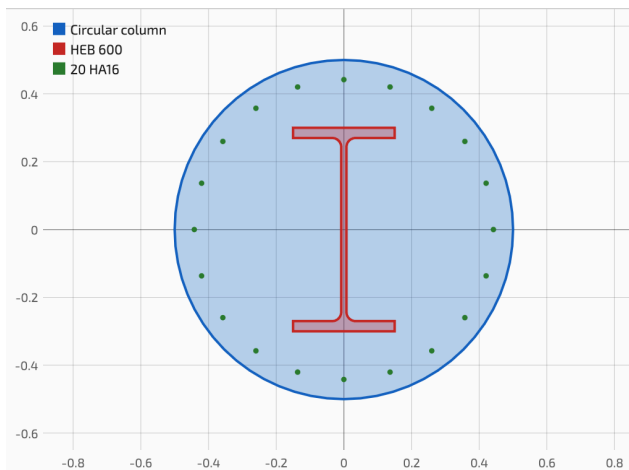
Este artigo apresenta primeiro o modelo de dados de uma seção avançada. Uma seção crítica sobre um apoio em uma viga caixão de concreto protendido é então usada como exemplo. Esta geometria combina um grande vazio, armaduras distribuídas ao longo de várias faces e grupos de cabos dentro de um modelo.

I Definição de uma seção avançada

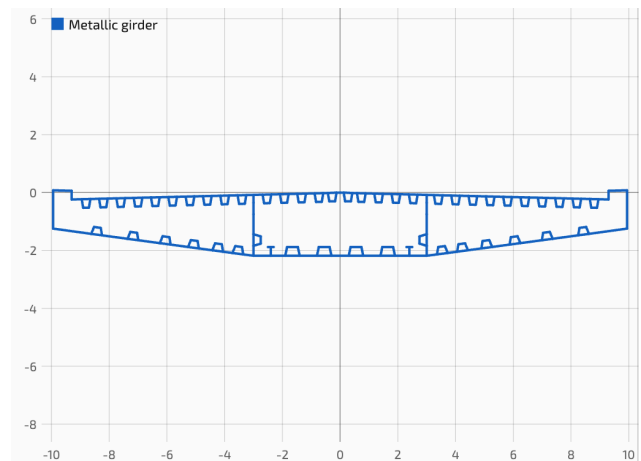
Uma seção avançada combina diversas famílias de objetos mecânicos. O solucionador preserva sua posição no sistema de coordenadas da seção e avalia sua contribuição usando a lei atribuída a cada objeto.

- Um domínio geométrico, ou GeoDomain, é definido por um contorno externo e pode conter vários vazios. Uma seção 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 protensão são agrupados em famílias de cabos definidas por suas 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 de material são atribuídas diretamente aos componentes. Podem utilizar os modelos normativos fornecidos pelo SectionPro ou uma relação tensão–deformação geral definida pelo usuário para os estados limites considerados.



Pilar misto: concreto, seção HEB e armadura passiva.

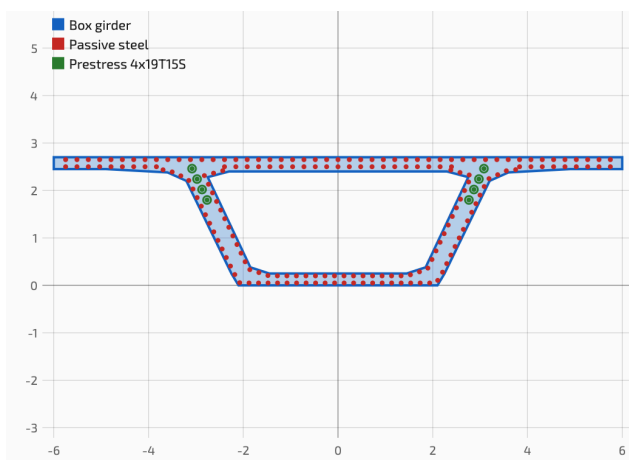


Viga caixão de aço: 267 elementos TSP e 51 células Bredt.

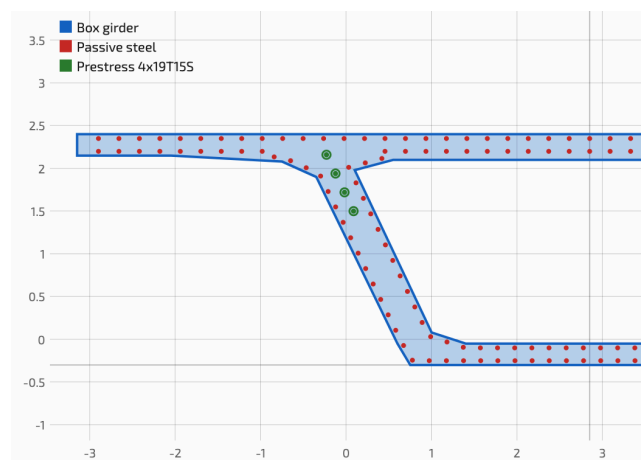
Figura 1: Exemplos de seções avançadas exibidas no SectionPro.

Exemplo: ponte em caixão

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



(a) Visão geral da seção.



(b) Detalhe da mísula superior esquerda.

Figura 2: Modelo SectionPro: domínio de concreto, armadura passiva e grupos de protensão.

Componente	Material	Definição no exemplo
GeoDomain 1	Concreto C45/55	Contorno do caixão, uma célula interior, área bruta de 6,759 m ²
Armadura passiva	B500B	186 barras HA16 distribuídas a 50 mm das faces de concreto
Protensão	Y1860	Oito tendões 19T15S, quatro ao longo de cada alma, 2.850 mm ² por tendão e bainhas de 100 mm

A seção contém 186 barras de armadura e oito tendões de protensão. As quatro bainhas ao longo de cada alma estão alinhadas com a direção da alma e se estendem até a mísula superior. Suas coordenadas são geradas por script e salvas no arquivo da seção avançada. O mesmo arquivo é utilizado em todas as análises apresentadas a seguir.

Esforços de seção e protensão

O vetor total de esforços de seção é decomposto nos efeitos das cargas permanentes G , das cargas variáveis Q e da protensão P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Para a seção considerada, o modelo estrutural de elementos finitos desenvolvido em 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, a protensão é considerada em dois níveis. 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 seção e do traçado dos tendões 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 protensão. 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 as perdas é de 1116 MPa. A ação correspondente produz uma força axial de 25,445 MN. Na seção sobre apoio, os tendões ficam acima do centroide, gerando um momento primário de +8,994 MN · m. Para esse traçado, o modelo estrutural fornece um momento secundário de mesmo sinal, igual a +4,400 MN · m. O momento de protensão introduzido na seção 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 seções bruta, líquida e homogeneizada. Neste exemplo, apenas as bainhas de protensão são deduzidas da seção líquida; a armadura passiva é mantida. Na seção homogeneizada, tanto o aço passivo quanto o aço de protensão utilizam o coeficiente de equivalência $n = 5$.

Seção	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 seção 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 mostrado abaixo corresponde às tensões de cisalhamento produzidas por um momento de torção unitário.

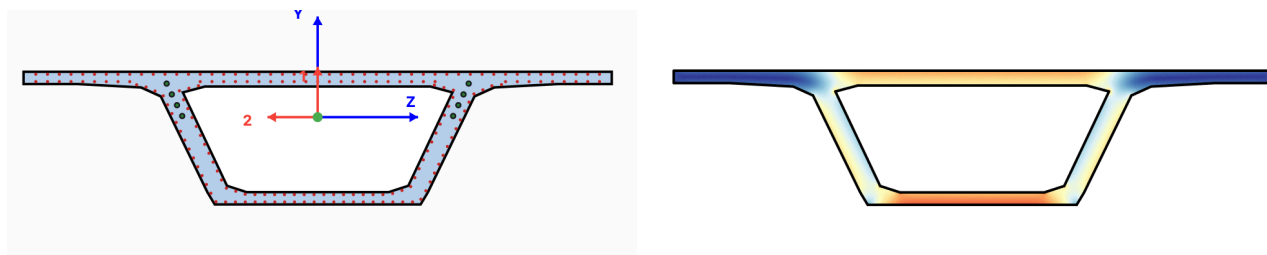


Figura 3: Eixos centroidais e principais (esquerda) e campo de tensões de cisalhamento sob torção unitária (direita).

Equilíbrio no ELS e ELU

O solucionador determina o estado de deformação da seção que equilibra os esforços aplicados. As tensões são então obtidas pelas respectivas leis constitutivas do concreto, da armadura passiva e dos tendões. Os resultados apresentados correspondem à combinação característica de ELS e à combinação fundamental de ELU.

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

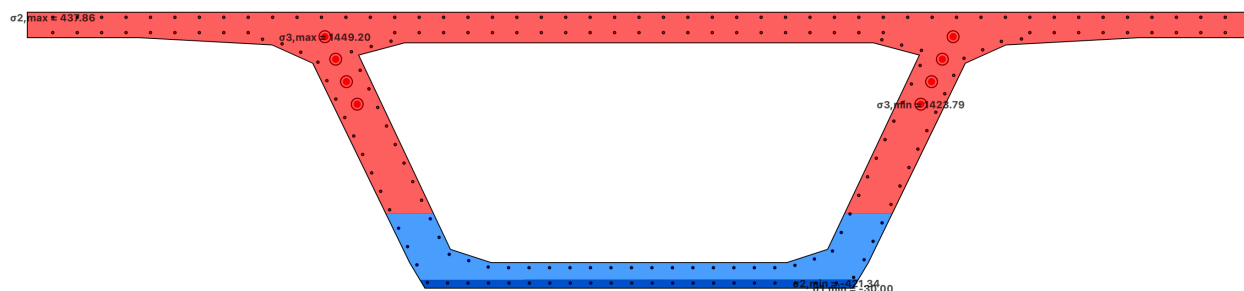


Figura 4: Campo de tensões normais no ELU obtido pela verificação não linear do vetor final de esforços.

Resultado	Unidade	ELS característico	ELU fundamental
Concreto			
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
Protensão			
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 concreto da laje inferior atinge localmente seu patamar plástico em compressão, enquanto uma zona de tração importante se desenvolve na laje superior e na parte superior das almas. Os tendões 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 concreto é 19,264 MPa, a tensão máxima de tração na armadura passiva é 99,09 MPa e a tensão total máxima nos tendões é 1198,23 MPa. A abertura de fissura, $w_k = 0,174$ mm, permanece pequena, embora seja avaliada aqui sob a combinação característica.

Domínios de interação

A geometria avançada e as leis de material também são usadas 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.

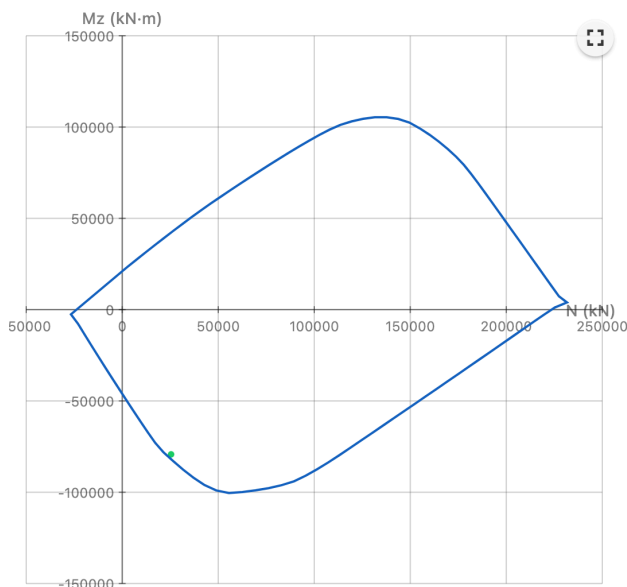


Figura 5: Curva de interação $N-M_z$ no ELU para $M_y = 0$, com o vetor final de esforços.

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 fica 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 mostra os tempos de execução das chamadas ao núcleo do SectionPro para o modelo do caixão. Esses 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

Esses 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. Assim, as verificações e as iterações de projeto fornecem resultados quase imediatos, contribuindo diretamente para uma experiência de uso fluida.

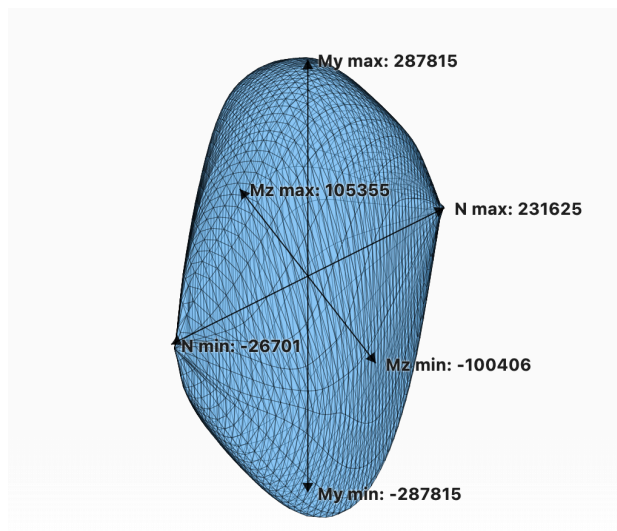


Figura 6: Superfície de interação $N-M_z-M_y$ no ELU.

I Conclusão

As seções avançadas combinam, em um único modelo, vários domínios geométricos e seus vazios, camadas de armadura passiva, grupos de aço de protensão, perfis de aço estrutural e chapas finas. Cada componente mantém sua própria lei de material nos diferentes estados limites.

O caixão estudado ilustra essa representação. Sua seção sobre apoio combina um domínio de concreto com vazio interno, armaduras distribuídas ao longo das faces e tendões de protensão dispostos junto às almas. A protensão entra no vetor de esforços aplicado por meio de seus efeitos primário e secundário. A contribuição resistente dos tendões é avaliada a partir da variação de sua tensão, levando em conta a protensão inicial, uma eventual descompressão do concreto adjacente e o estado de deformação de equilíbrio da seção.

O modo avançado pode, portanto, analisar praticamente qualquer seção transversal, independentemente da complexidade geométrica ou dos materiais que a compõem. Essa generalidade permanece naturalmente sujeita às hipóteses da análise de seções, em particular que as seções planas permanecem planas e que os componentes ligados satisfaçam a compatibilidade de deformações. Graças ao núcleo de cálculo otimizado, mesmo esses modelos detalhados mantêm tempos de resposta quase instantâneos.