

Secțiuni avansate

Modelarea secțiunilor complexe în SectionPro

Aplicație la secțiunea pe reazem a unui pod casetat precomprimat

BridgeKernel · 2026

Introducere

Secțiunile standard de grinzi, stâlpi și pereți sunt în general descrise printr-un singur contur și armătură uniformă. Structurile reale combină adesea mai multe materiale, goluri, straturi separate de armătură, tendoane de pretensionare sau elemente de oțel încorporate. Analiza lor necesită o reprezentare care să păstreze atât geometria, cât și legea constitutivă a fiecărei componente.

Secțiunile avansate din SectionPro răspund acestei necesități. O secțiune avansată este alcătuită din domenii geometrice, armătură pasivă, oțel de precomprimare, profile din oțel structural și plăci subțiri. Fiecărei componente i se atribuie legea de material utilizată în analize. Aceeași descriere este apoi folosită pentru calculul caracteristicilor secțiunii, verificarea tensiunilor și deformațiilor specifice sub eforturile secționale aplicate, calculul deschiderii fisurilor și generarea domeniilor de interacțiune.

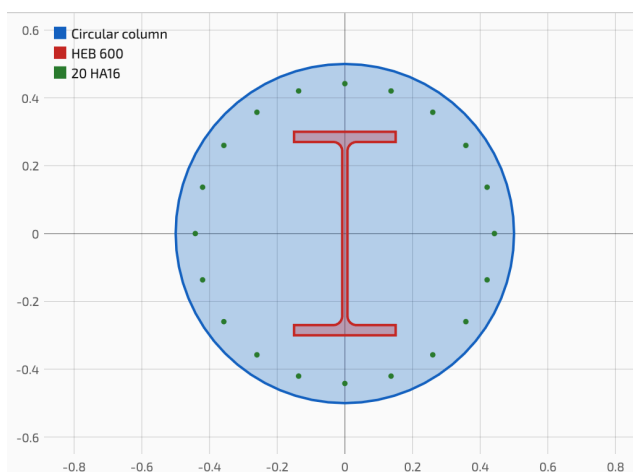
Articolul prezintă mai întâi modelul de date al unei secțiuni avansate. Ca exemplu este utilizată apoi o secțiune critică pe reazem a unei grinzi casetate din beton precomprimat. Această geometrie reunește într-un singur model un gol de mari dimensiuni, armături distribuite pe mai multe fețe și grupuri de cabluri.

Definirea unei secțiuni avansate

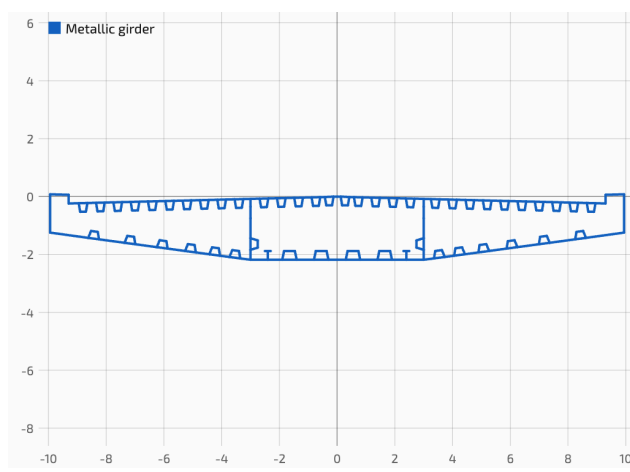
O secțiune avansată combină mai multe familii de obiecte mecanice. Solverul păstrează poziția acestora în sistemul de coordonate al secțiunii și evaluează contribuția lor folosind legea atribuită fiecărui obiect.

- Un domeniu geometric, sau GeoDomain, este definit de un contur exterior și poate conține mai multe goluri. O secțiune poate conține mai multe domenii, fiecare având propria sa lege materială.
- Armarea pasivă este organizată în straturi independente. Fiecare bară are o poziție, un diametru și o lege a oțelului, permițând să fie reprezentate straturi, fețe și clase de oțel separate.
- Oțelul de precomprimare este grupat în familii de cabluri definite prin poziții, arii, parametri de aderență și stare inițială.

- Profilele din oțel structural pot fi selectate din biblioteca integrată de 535 de referințe care acoperă unsprezece familii europene: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP și profile tubulare pătrate, dreptunghiulare și circulare. Ele pot fi reprezentate fie printr-un GeoDomain integrat pe aria reală, inclusiv racorduri curbe și raze de racordare, fie printr-un ansamblu de elemente TSP.
- Un element TSP descrie linia mediană dreaptă sau curbă a unei plăci și grosimea acesteia. Contribuția sa se obține prin integrare liniară, cu tensiunea considerată uniformă pe grosime. Această reprezentare este potrivită pentru plăci subțiri, profile din oțel structural și secțiuni casetate multicelulare.
- Legile materialelor sunt atribuite direct componentelor. Acestea pot utiliza modelele normative furnizate de SectionPro sau o relație generală tensiune-deformație specifică definită de utilizator pentru stările limită analizate.



Stâlp compozit: beton, secțiune HEB și armătură pasivă.

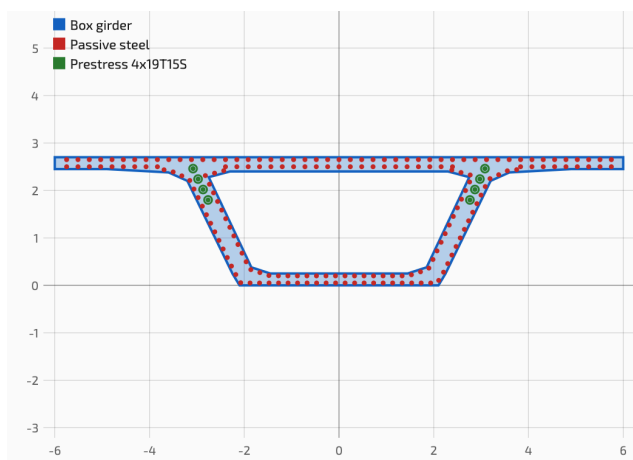


Grindă casetată din oțel: 267 elemente TSP și 51 celule Bredt.

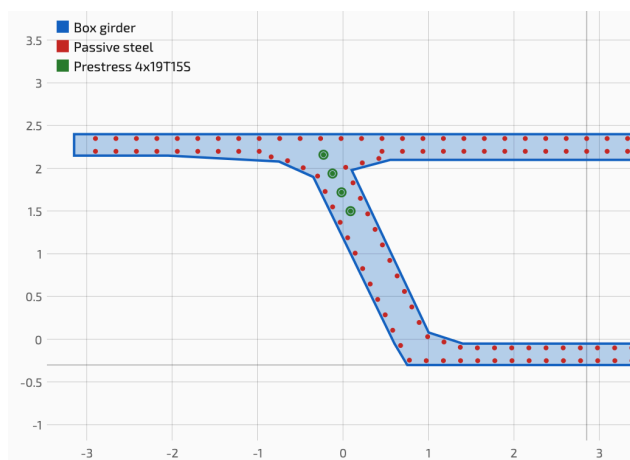
Figura 1: Exemple de secțiuni avansate afișate în SectionPro.

Exemplu: pod cu secțiune casetată

Secțiunea studiată este o secțiune critică pe reazem a unei grinzi casetate monocelulare. Are 12,00 m lățime și 2,70 m înălțime. Placa superioară, inimile înclinate, vutele și placa inferioară formează un singur domeniu de beton. Celula centrală este definită ca gol interior.



(a) Vedere de ansamblu a secțiunii.



(b) Detaliu al vutei superioare din stânga.

Figura 2: Model SectionPro: domeniu de beton, armătură pasivă și grupuri de precomprimare.

Componentă	Material	Definiție în exemplu
GeoDomain 1	Beton C45/55	Conturul casetei, o celulă interioară, aria brută 6,759 m ²
Armătură pasivă	B500B	186 bare HA16 distribuite la 50 mm de fețele betonului
Precomprimare	Y1860	Opt cabluri 19T15S, câte patru de-a lungul fiecărei inimi, 2.850 mm ² pe cablu și teci de 100 mm

Secțiunea conține 186 de bare de armătură și opt cabluri de precomprimare. Cele patru teci de-a lungul fiecărei inimi sunt aliniate cu direcția acestora și se prelungesc în vuta superioară. Coordonatele sunt generate prin script și salvate apoi în fișierul secțiunii avansate. Același fișier este utilizat pentru toate analizele prezentate mai jos.

Eforturi secționale și precomprimare

Vectorul total al eforturilor secționale este descompus în efectele sarcinilor permanente G , sarcinilor variabile Q și precomprimării P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Pentru secțiunea considerată, modelul structural cu elemente finite realizat în software-ul nostru LFEM furnizează următorii vectori ai eforturilor $G + Q$, în MN și MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{SLS}} = (0; -58,650; 0)$ și $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{ULS}} = (0; -92,650; 0)$.

În SectionPro, precomprimarea este considerată la două niveluri. Acțiunea sa asupra structurii, inclusiv efectul primar și eventualul efect secundar, trebuie inclusă în vectorul eforturilor aplicate. Simetria transversală a secțiunii și a traseului cablurilor anulează aici momentul în jurul axei y ; prin urmare $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{primar}} + M_{z,P}^{\text{secundar}}, 0)$.

Tensiunea efectivă a tendonului definește starea inițială asociată acțiunii de pretensionare. În calculul rezistenței, starea de deformare de echilibru modifică apoi solicitarea tendonului: alungirea produce o creștere pozitivă a tensiunii și crește contribuția tendonului, în timp ce scurtarea produce o scădere a tensiunii.

În exemplu, tensiunea efectivă după pierderi este de 1116 MPa. Acțiunea corespunzătoare produce o forță axială de 25,445 MN. În secțiunea de reazem, cablurile se află deasupra centrului de greutate, generând un moment primar de +8,994 MN · m. Pentru acest traseu, modelul structural furnizează un moment secundar de același semn, egal cu +4,400 MN · m. Momentul de precomprimare introdus în secțiune este deci +13,394 MN · m.

Vector final al eforturilor	N [MN]	M_z [MN·m]	M_y [MN·m]
SLS	25,445	-45,256	0,000
ULS	25,445	-79,256	0,000

Rezultate pe modelul complet

Caracteristici mecanice

SectionPro calculează proprietățile secțiunilor brută, netă și omogenizată. În acest exemplu, din secțiunea netă se scad numai tecile de precomprimare; armătura pasivă este păstrată. În secțiunea omogenizată, atât oțelul pasiv, cât și oțelul de precomprimare utilizează coeficientul de echivalență $n = 5$.

Secțiune	A [m ²]	y_G [m]	I_{zz} [m ⁴]	I_{yy} [m ⁴]
Brut	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Net	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Omogenizat	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

Proprietățile de torsiune și forfecare ale secțiunii brute sunt prezentate mai jos.

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

Câmpul prezentat mai jos corespunde tensiunilor de forfecare produse de un cuplu unitar.

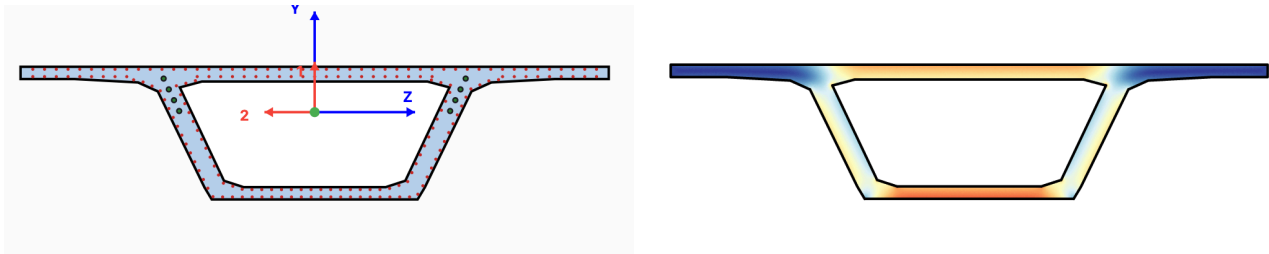


Figura 3: Axele centroidale și principale (stânga) și câmpul de forfecare sub torsiune unitară (dreapta).

Echilibru la SLS și ULS

Solverul determină starea de deformăție specifică a secțiunii care echilibrează eforturile aplicate. Tensiunile sunt apoi obținute din legile constitutive ale betonului, armăturii pasive și cablurilor. Rezultatele prezentate corespund combinației caracteristice SLS și combinației fundamentale ULS.

Pentru cabluri, tensiunea finală este evaluată din deformăția specifică cumulată $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. Termenul ε_0 este deformăția specifică asociată tensiunii efective de 1116 MPa; $\Delta\varepsilon_1$ reprezintă o eventuală decompresie a betonului adiacent cablului; iar $\Delta\varepsilon_2$ este deformăția specifică obținută din echilibrul secțiunii. Efectul de decompresie este activat în acest exemplu.

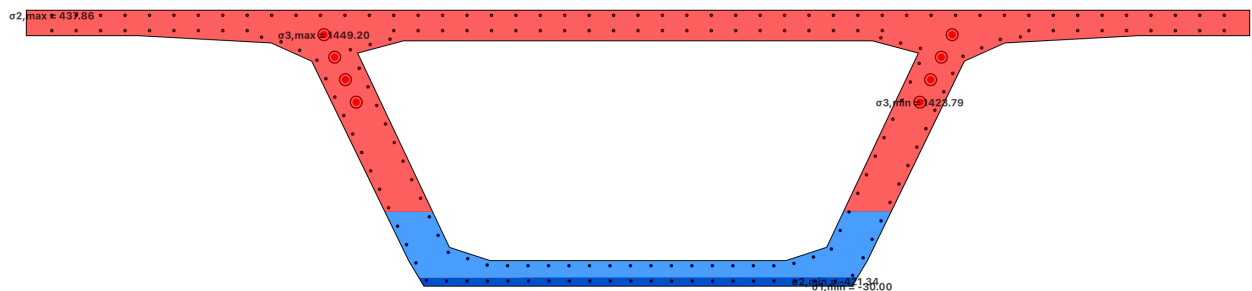


Figura 4: Câmpul tensiunilor normale la ULS obținut din verificarea neliniară a vectorului final al eforturilor.

Rezultat	Unitate	Caracteristic SLS	ULS fundamental
Beton			
Deformație specifică minimă, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	-0,531	-2,262
Tensiune minimă, $\sigma_{b, \min}$	MPa	-19,264	-30,000
Oțel pasiv			
Deformație specifică minimă, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	-0,512	-2,107
Deformație specifică maximă, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Tensiune minimă, $\sigma_{s, \min}$	MPa	-102,31	-421,34
Tensiune maximă, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Precomprimare			
Deformație specifică minimă, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Tensiune totală minimă, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Creștere minimă a tensiunii, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Deformație specifică maximă, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Tensiune totală maximă, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Creșterea maximă a tensiunii, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Soluție			
Iterații		4	6
Reziduu de convergență		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Convergență		Da	Da

La ULS fundamentală, betonul plăcii inferioare atinge local platoul plastic la compresiune, în timp ce în placa superioară și partea superioară a inimilor se dezvoltă o zonă întinsă importantă. Cablurile sunt puternic mobilizate, cu creșteri de tensiune cuprinse între 307,8 și 333,2 MPa.

La SLS caracteristică, verificările de tensiune sunt satisfăcute: tensiunea maximă de compresiune în beton este de 19,264 MPa, tensiunea maximă de întindere în armătura pasivă de 99,09 MPa, iar tensiunea totală maximă în cabluri de 1198,23 MPa. Deschiderea fisurii, $w_k = 0,174$ mm, rămâne redusă, deși este evaluată aici pentru combinația caracteristică.

Domenii de interacțiune

Geometria avansată și legile materialelor sunt utilizate și pentru calculul domeniilor de rezistență. Curba $N-M_z$ este o secțiune prin domeniu pentru $M_y = 0$. Suprafața $N-M_z-M_y$ extinde calculul la toate direcțiile de încovoiere.

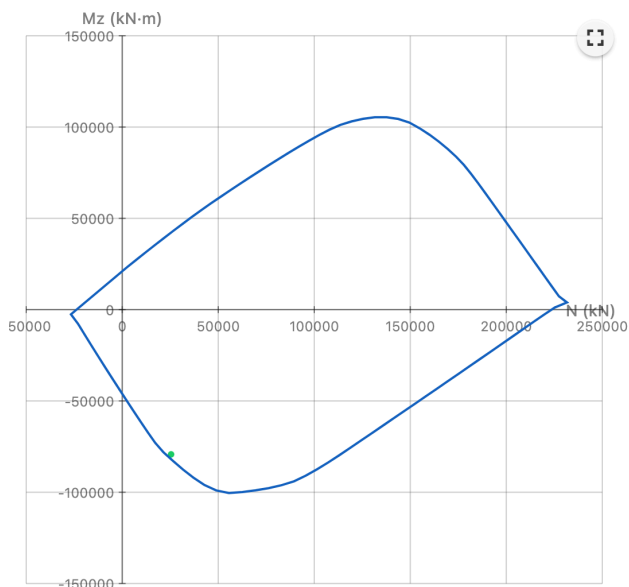


Figura 5: Curba de interacțiune $N-M_z$ la ULS pentru $M_y = 0$, cu vectorul final al eforturilor.

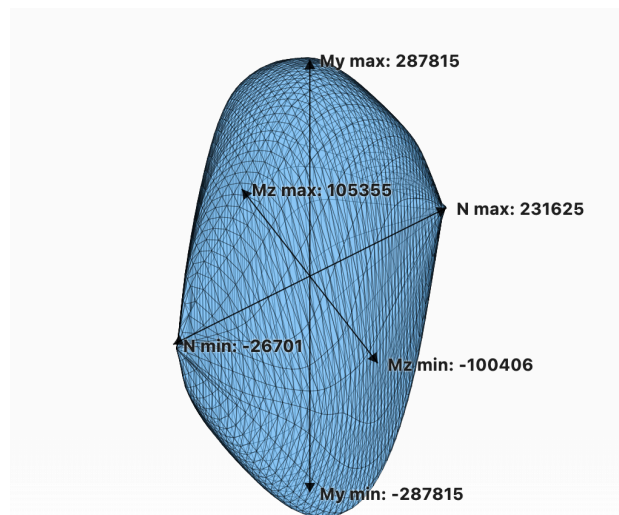


Figura 6: $N-M_z-M_y$ suprafață de interacțiune la ULS.

Următorul tabel oferă caseta de delimitare a suprafeței de interacțiune, definită de valorile minime și maxime ale fiecăreia dintre cele trei componente ale sale.

Componentă	Minim	Maxim
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

Capacitățile pozitive și negative în jurul lui M_y coincid, conform simetriei transversale a secțiunii. Diferența dintre capacitățile pozitive și negative în jurul lui M_z reflectă geometria și armarea diferite ale plăcilor superioară și inferioară. Vectorul final al eforturilor se află foarte aproape de limita domeniului de rezistență. Modulul de distanță până la domeniu furnizează $FS = 0,983$: puțin sub unitate, dar foarte aproape de limită.

Performanță

Tabelul de mai jos arată timpii de execuție ai apelurilor către nucleul SectionPro pentru modelul casetat. Aceste valori exclud interfața grafică și afișarea rezultatelor.

Analiză	Timp de calcul
Caracteristici mecanice	28,3 ms
Stare de tensiuni și deformații	0,73 ms
Calculul deschiderii fisurii	2,38 ms
Curba de interacțiune $N-M_z$, 200 de puncte	1,11 ms
Suprafață de interacțiune $N-M_z-M_y$, plasă 50×50	208 ms

Aceste rezultate ilustrează unul dintre punctele forte ale SectionPro: optimizarea extinsă a nucleului menține timpii de calcul extrem de mici, inclusiv pentru analizele neliniare și construirea domeniilor de rezistență tridimensionale. Verificările și iterațiile de proiectare oferă astfel rezultate aproape imediate, contribuind direct la o experiență fluidă a utilizatorului.

I Concluzie

Secțiunile avansate combină într-un singur model mai multe domenii geometrice și golurile acestora, straturi de armătură pasivă, grupuri de oțel de precomprimare, profile din oțel structural și plăci subțiri. Fiecare componentă își păstrează propria lege de material la diferitele stări limită.

Grinda casetată studiată ilustrează această reprezentare. Secțiunea sa pe reazem combină un domeniu de beton cu gol interior, armături distribuite pe fețe și cabluri de precomprimare dispuse de-a lungul inimilor. Precomprimarea intră în vectorul eforturilor aplicate prin efectele primar și secundar. Contribuția cablurilor la rezistență este evaluată din variația tensiunii acestora, ținând seama de precomprimarea inițială, de o eventuală decompresie a betonului adiacent și de starea de deformare de echilibru a secțiunii.

Prin urmare, modul avansat poate analiza practic orice secțiune transversală, indiferent de complexitatea geometriei sau de materialele din care este alcătuită. Această generalitate rămâne supusă ipotezelor analizei de secțiune, în special faptului că secțiunile plane rămân plane și că elementele conectate respectă compatibilitatea deformațiilor. Datorită nucleului de calcul optimizat, chiar și aceste modele detaliate păstrează timpi de răspuns aproape instantanei.