

Analiză termo-mecanică la foc

Capacitatea reziduală a secțiunii încălzite

Tutorial SectionPro · Rezistența reziduală a unei secțiuni la foc,
prin metoda izotermei de 500 °C din EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Introducere

Calculul la foc se desfășoară în două etape succesive. Prima etapă este termică, așa cum a fost descrisă în articolul anterior: SectionPro rezolvă problema de transfer de căldură pe secțiunea transversală reală și returnează câmpul de temperatură în beton, în armătură și în orice profil metalic înglobat, la fiecare moment cerut.

A doua etapă este mecanică. Pentru fiecare durată de foc selectată, modulele mecanice pornesc de la câmpul de temperatură corespunzător și derivă secțiunea rezistentă utilizată la verificare. Contribuția betonului este redusă în funcție de regiunea încălzită a secțiunii, în timp ce barele de armătură și profilul metalic înglobat primesc proprietăți mecanice dependente de temperatură. Secțiunea încălzită rezultată este apoi analizată în același spirit ca o secțiune la temperatură ambiantă: verificarea unui caz de încărcare, curbe și suprafață de interacțiune, distanțe, curbe de rigiditate și timp până la cedare.

Metoda izotermei de 500 °C

Pentru beton, SectionPro aplică metoda izotermei de 500 °C din EN 1992-1-2. Betonul încălzit peste 500 °C este eliminat; betonul care a rămas sub 500 °C este păstrat cu rezistența sa integrală la temperatură ambiantă și cu legea sa uzuală parabolă-dreptunghi ($\epsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\epsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). Geometria rezistentă se reduce astfel la regiunea delimitată de izoterma de 500 °C, care se micșorează pe măsură ce expunerea crește.

Fiecare bară de armătură este redusă la propria sa temperatură: limita sa de curgere și modulul devin $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ și $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, cu factorii de reducere din EN 1992-1-2 (Tabelele 3.2a și 3.2b). O bară situată în afara izotermei de 500 °C nu este eliminată; ea contribuie în continuare cu rezistența sa redusă.

Același tratament se aplică unui profil structural înglobat atunci când acesta este discretizat în etapa termică: fiecare element de oțel este citit la temperatura sa, redus prin $k_y(\theta)$ și $k_E(\theta)$, iar betonul pe care îl ocupă este înlăturat pentru a nu fi numărat de două ori. Odată construită secțiunea încălzită, verificarea mecanică se desfășoară ca o analiză de secțiune standard, focul afectând

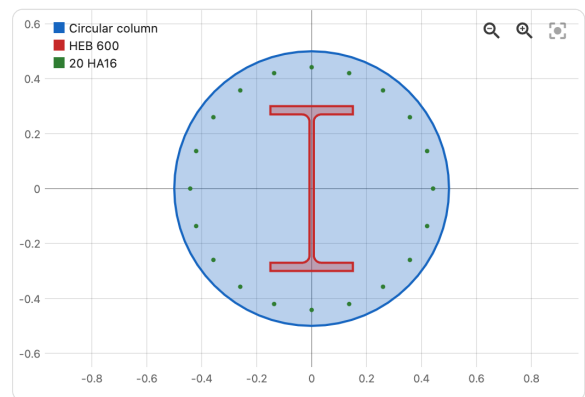
geometria rezistentă și legile de material utilizate la momentul selectat. Pe această secțiune redusă, SectionPro efectuează:

- Verificarea secțiunii: echilibrul unui caz de încărcare, cu câmpul complet de tensiuni și deformații la un moment dat.
- Curba de interacțiune: frontiera de rezistență într-un plan de forțe ales, cu o componentă fixată.
- Suprafața de interacțiune: domeniul de rezistență 3D complet în (N, M_z, M_y) .
- Distanțe: gradul de utilizare al fiecărei sarcini prin proiecție pe această suprafață.
- Rigiditate: răspunsul moment–curbură și rigiditatea la încovoiere secantă și tangentă.
- Timp până la cedare: timpul de expunere la care sarcina iese din domeniul de rezistență.

I Secțiunea de exemplu

Calcululele sunt ilustrate pe stâlpul compozit livrat împreună cu exemplele SectionPro:

- Secțiune circulară, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Profil HEB 600 înglobat, din oțel S235.
- 20 bare Ø16 B500B pe perimetru.
- Expunere la focul standardizat ISO 834.



I Verificarea secțiunii

Pentru o sarcină (N, M_z, M_y) specificată pentru verificare, SectionPro găsește starea de deformație $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, o deformație axială și două curburi, care satisface echilibrul intern cu forțele impuse. El rezolvă aceasta iterativ, integrând tensiunile pe secțiunea încălzită la fiecare pas: betonul păstrat pe contururile sale, barele și profilul discretizat ca fibre, fiecare guvernat de legea sa redusă.

Din starea de deformație convergentă, SectionPro extrage tensiunile și deformațiile la fiecare fibră, poziția axei neutre și un grad de utilizare definit ca raportul dintre deformația fibrei determinante și deformația ultimă a materialului respectiv. Un grad de utilizare sub 1 înseamnă că sarcina este preluată; o valoare de 1 sau peste înseamnă că secțiunea redusă nu o mai poate echilibra.

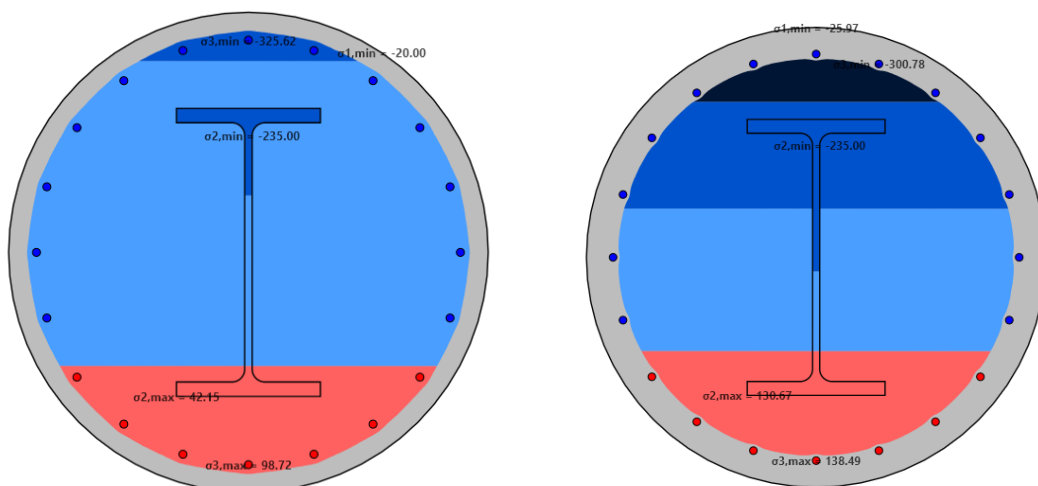


Figura 1: Starea de tensiuni și deformații convergentă la R120 și R240 sub sarcina $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, în kN și kN · m.

În exemplu, sarcina este $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, în kN și kN · m. Vederile R120 și R240 plasează aceeași sarcină pe o secțiune a cărei arie rezistentă se reduce odată cu expunerea: betonul din interiorul izotermei de 500 °C preia compresiunea, în timp ce barele și profilul înglobat, încă reci, echilibrează încovoierea. La R240, secțiunea ajunge la cedare prin strivirea betonului păstrat.

Curba de interacțiune N–M_z

Curba de interacțiune N – M_z este frontiera de rezistență a secțiunii la încovoiere uniaxială: mulțimea perechilor de forță axială și moment încovoiitor pe care le poate prelua în jurul axei studiate. Recalculate pentru fiecare durată de foc pe secțiunea redusă, curbele suprapuse oferă o imagine directă a capacității pierdute prin încălzire.

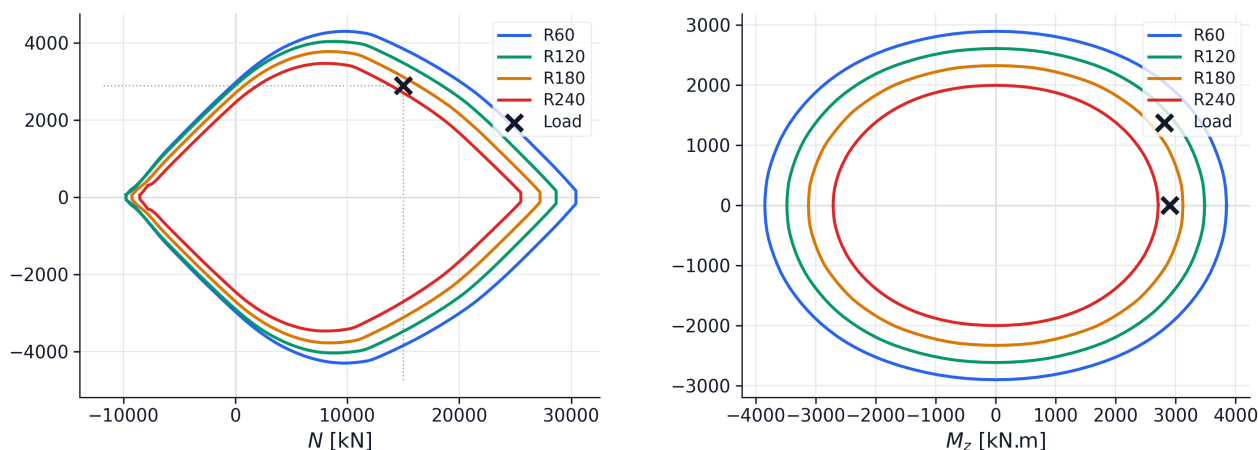


Figura 2: Curbe de interacțiune la foc N – M_z și M_y – M_z sub ISO 834.

Figurile arată pierderea de capacitate pe măsură ce temperatura crește: domeniile de rezistență se contractă progresiv odată cu durata de foc. Pentru sarcina selectată, cedarea survine între R180 și R240.

Suprafața de interacțiune 3D

La încovoiere biaxială, rezistența nu mai poate fi surprinsă printr-o singură curbă plană: ea devine o suprafață închisă în spațiul (N, M_z, M_y) , domeniul de rezistență al secțiunii. SectionPro calculează

această suprafață direct din stările de deformare ultimă ale secțiunii, luate pe toate direcțiile de încovoiere. Construită pe secțiunea încălzită, ea permite verificarea directă a oricărei sarcini biaxiale, fără a o reduce la o axă preferată: o sarcină din interiorul suprafeței este preluată, o sarcină din exterior depășește capacitatea.

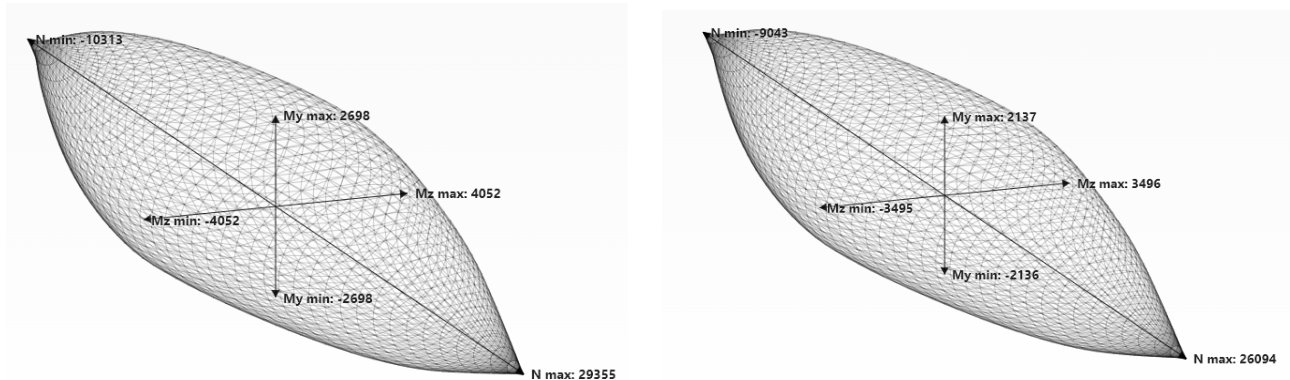


Figura 3: Suprafața de interacțiune de rezistență la foc (N - M_z - M_y) la R120 și R240.

I Distanțe

Modulul de distanțe verifică grafic mai multe cazuri de încărcare la încovoiere biaxială față de aceeași suprafață de interacțiune. Fiecare sarcină (N, M_z, M_y) este proiectată pe suprafață și returnată cu un grad de utilizare η , astfel încât inginerul poate citi dintr-o privire care sarcini rămân în interiorul domeniului de rezistență și care îl depășesc.

- $\eta < 1$: sarcina rămâne **intern** și secțiunea are rezervă de capacitate.
- $\eta = 1$: sarcina se află pe frontieră, exact la limită.
- $\eta > 1$: sarcina devine **extern** și capacitatea este depășită.

La foc, domeniul se contractă odată cu expunerea, astfel încât statutul aceleiași sarcini se poate schimba din interior în exterior pe măsură ce durată crește.

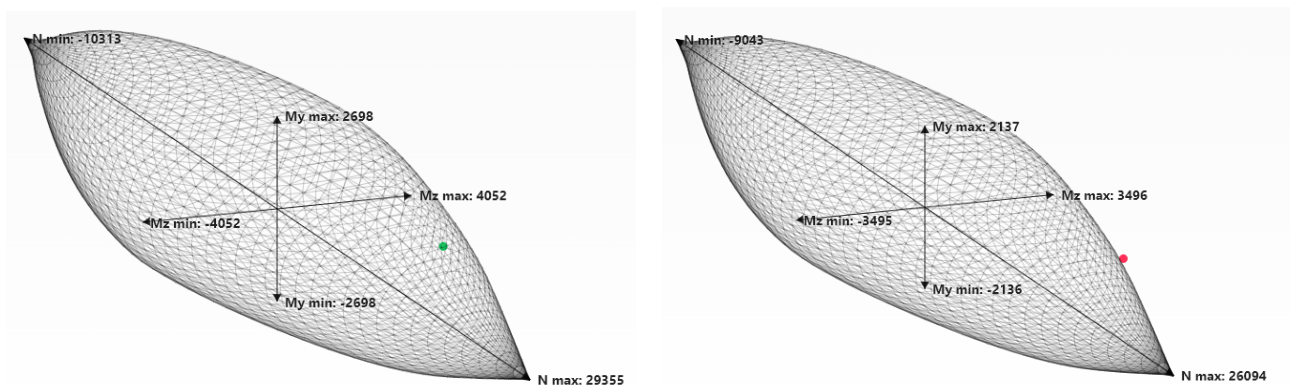


Figura 4: Verificare prin distanțe a unei sarcini la foc pe domeniul de rezistență 3D, la R120 (stânga) și R240 (dreapta). Domeniul se contractă odată cu expunerea; distanța normalizată η indică dacă sarcina rămâne **intern** ($\eta \leq 1$) sau devine **extern** ($\eta > 1$).

Punctul de sarcină trece din **intern** la R120 în **extern** la R240, ceea ce este consistent cu rezultatele verificării secțiunii și ale curbei de interacțiune.

Rigiditate la foc

Încălzirea reduce de asemenea rigiditatea la încovoiere a stâlpilor. Pe măsură ce curbura crește, această pierdere de rigiditate poate amplifica efectele de ordinul doi chiar înainte de atingerea rezistenței ultime.

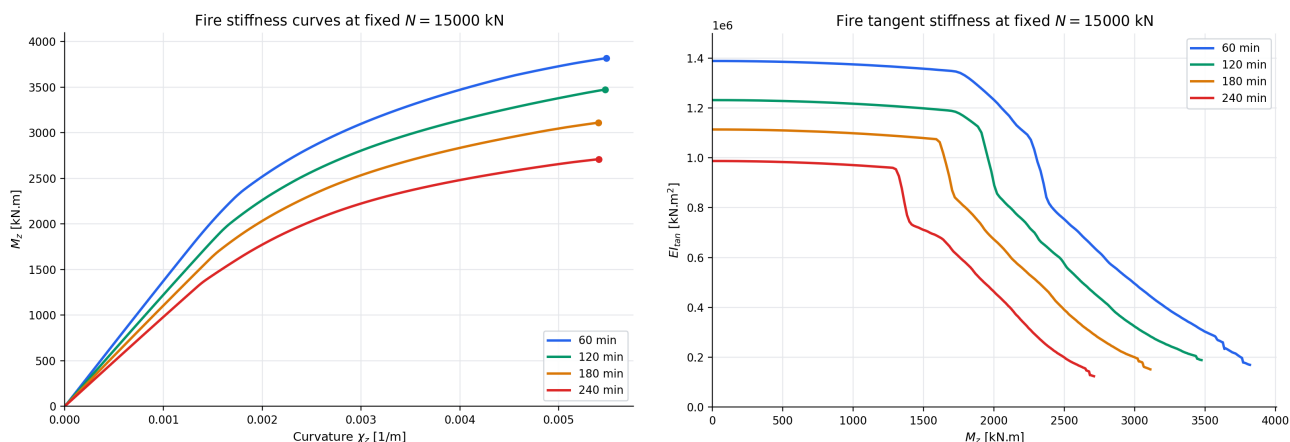


Figura 5: Rigiditate la foc la $N = 15000$ kN și $M_y = 0$. Stânga, răspunsul moment–curbură M_z – χ . Dreapta, rigiditatea tangentă EI_{tan} în funcție de M_z .

Curbele arată o degradare accentuată a rigidității odată cu durata de foc: răspunsul moment–curbură se aplatizează, iar rigiditatea tangentă scade brusc pe măsură ce secțiunea încălzită se apropie de cedare.

Timp până la cedare

Timpul până la cedare este calculul cel mai specific focului. Pentru o sarcină de serviciu fixată, SectionPro reconstruiește secțiunea redusă la fiecare moment de ieșire termică și rezolvă echilibrul pe aceasta. Capacitatea scade pe măsură ce izoterma de 500 °C se contractă și temperaturile oțelului cresc; timpul până la cedare este momentul la care sarcina iese din domeniul de rezistență, atunci când secțiunea redusă nu o mai poate echilibra în limitele de deformare ale materialelor.

În continuare, pe aceeași secțiune se efectuează un test de izolare pentru a verifica dacă protecția pasivă rezolvă această problemă specifică de rezistență la foc. Aceeași sarcină este evaluată mai întâi pe secțiunea neprotejată, apoi cu un strat izolant continuu pe perimetrul betonului.

Neprotejat

Protejat

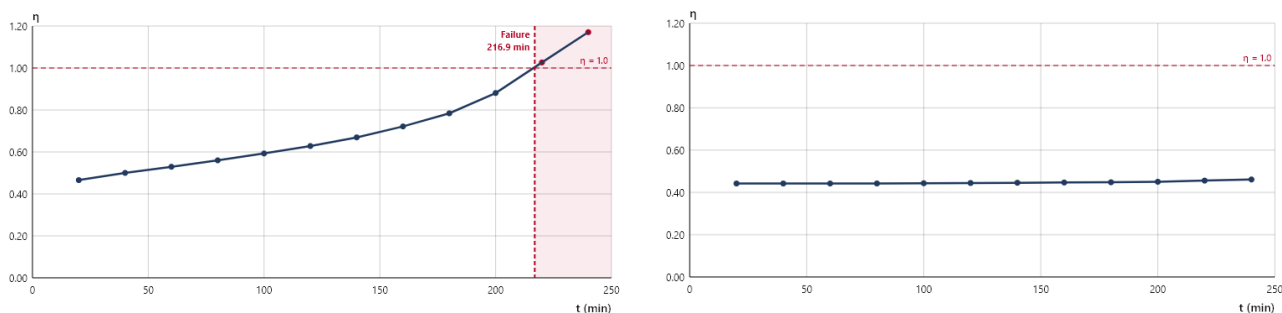


Figura 6: Timpul până la cedare sub sarcina $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, în kN și kN · m. Protecția pasivă împinge ieșirea din domeniul de rezistență dincolo de R240 în acest caz.

Protecția este modelată ca un strat pasiv continuu descris prin patru parametri termici. Pentru acest test de izolare au fost utilizate următoarele valori:

d	λ	ρ	c_p
20 mm	0,2 W/(m · K)	700 kg/m ³	1000 J/(kg · K)

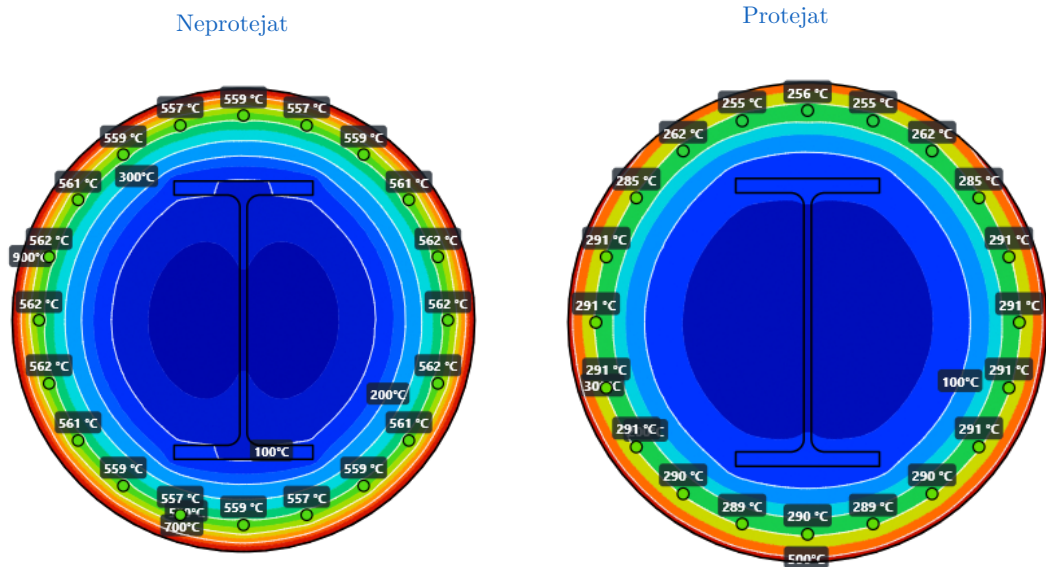


Figura 7: Câmp de temperatură la R240, neprotejat și protejat.

Protecția este foarte eficientă în acest caz: armăturile pasive scad de la circa 560 °C la circa 300 °C, iar betonul rămâne sub 500 °C chiar și după 240 min, astfel încât întreaga secțiune de beton este păstrată mecanic.

Performanța programului

Sarcina principală este calculul câmpului termic la duratele de foc cerute. Odată ce aceste câmpuri de temperatură sunt disponibile, verificările mecanice sunt rapide, iar întregul flux de lucru rămâne sub o secundă pentru acest exemplu.

Calcul	Timp
Câmp termic (2 pași, R120/R240)	0,20 s
Verificarea secțiunii (tensiuni-deformații)	+ 4 ms
Curba de interacțiune N-Mz (160 puncte)	+ 31 ms
Domeniul My-Mz la N fix	+ 35 ms
Suprafața de interacțiune 3D (50 × 50)	+ 134 ms
Curba de rigiditate (moment-curbură)	+ 11 ms
Timp până la cedare (baleiere completă)	+ 52 ms

Stâlpul compozit din articol, măsurat pe o mașină desktop. Timpii mecanici sunt dați după rezolvarea câmpului termic.

Concluzie

Metoda izotermei de 500 °C transformă câmpul termic într-o secțiune rezistentă redusă: beton păstrat la rezistența sa în interiorul izotermei, bare și oțel înglobat slăbite de temperatura lor locală. Din

această stare încălzită, analiza oferă rezistența sarcinii impuse, domeniile de interacțiune, distanțele sarcinilor, pierderea de rigiditate și timpul la care sarcina iese din domeniul de rezistență.

Pe stâlpul compozit studiat, profilul înglobat rămâne protejat de betonul înconjurător și păstrează o parte semnificativă din capacitate la duratele intermediare. Protecția pasivă continuă scade semnificativ temperaturile la R240 și amână timpul până la cedare al sarcinii studiate.

Diferitele calcule sunt consistente între ele: toate indică aceeași pierdere de capacitate și același interval de cedare. Verificarea secțiunii oferă starea detaliată de tensiuni și deformații pentru o sarcină. Curba de interacțiune este vederea inginerească preferată atunci când este nevoie de un domeniu de rezistență într-un plan. Suprafața de interacțiune oferă domeniul biaxial global. Verificarea prin distanțe oferă un statut rapid OK/KO pentru mai multe sarcini. Curbele de rigiditate arată dacă secțiunea a intrat într-un regim de degradare puternică a rigidității. Analiza timpului până la cedare oferă în final un timp de expunere aproximativ înainte ca sarcina să nu mai poată fi preluată. Fiecare vedere are propriul său punct forte și, împreună, oferă o citire coerentă a comportamentului la foc.