

Analiză termică la foc

Câmp de temperatură

Tutorial SectionPro · Profiluri de temperatură tranzitorii
într-o secțiune supusă la foc, prin elemente finite

BridgeKernel · 2026

I Introducere

Verificarea la foc a unei secțiuni din beton armat se bazează mai întâi pe cunoașterea temperaturii în fiecare punct al secțiunii după o durată de expunere dată, de exemplu 30, 60, 90 sau 120 de minute. Această distribuție spațială, câmpul termic, guvernează restul calculului: scăderea rezistenței betonului și a armăturilor, apoi capacitatea portantă reziduală, decurg direct din ea. Ea constituie totuși o etapă termică autonomă, pe care SectionPro o rezolvă și o prezintă independent de verificarea mecanică.

Prezentul articol se limitează la această etapă termică. El reamintește fundamentele acesteia, descrie modelul adoptat în SectionPro, apoi confruntă rezultatele cu profilurile de referință din Anexa A a EN 1992-1-2.

Problema termică

Transferul de căldură tranzitoriu în secțiune se supune ecuației căldurii neliniare:

$$\rho(\theta) \cdot c_p(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(\theta) \nabla \theta)$$

Proprietățile termice ale betonului variază cu temperatura. Conductivitatea $\lambda(\theta)$ scade în mod monoton, în timp ce căldura specifică $c_p(\theta)$ prezintă un vârf pronunțat în jurul valorii de 115 °C, asociat vaporizării apei libere și cu atât mai mare cu cât conținutul de umiditate este mai ridicat. Acest vârf absoarbe o parte importantă a fluxului și întârzie net progresia frontului de căldură spre miezul secțiunii.

Pe fețele expuse, fluxul net combină convecția și radiația:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \underbrace{\alpha_c (\theta_g - \theta_m)}_{\text{convecție}} + \underbrace{\Phi \varepsilon_m \sigma \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right]}_{\text{radiație}}$$

unde θ_g este temperatura gazelor (curba de foc), θ_m temperatura suprafeței, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ și $\varepsilon_m = 0.7$ (valori implicite, ajustabile). Fețele neexpuse sunt presupuse adiabactice ($\partial\theta/\partial n = 0$).

Curba de foc standardizată ISO 834 dă temperatura gazelor:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad [t \text{ în min}]$$

Aceste ecuații fac să intervină mai mulți parametri: curba de foc, legile $\lambda(\theta)$ și $c_p(\theta)$ ale materialului, coeficienții de schimb la suprafață. Aceștia iau în mod implicit valorile din EN 1992-1-2 și rămân modificabili la intrare.

Câmpul termic în SectionPro

SectionPro rezolvă câmpul termic pe o secțiune de formă arbitrară, fie ea plină, cu goluri sau compusă din mai multe materiale, fără a se limita la geometriile tabelate ale normei. Principalele sale capacități:

- **Curbe de foc.** ISO 834 (foc standardizat), hidrocarbură, curbă exterioară, sau curbă definită de utilizator sub formă de puncte timp-temperatură.
- **Expunere pe fețe.** Fiecare față este expusă sau nu în mod independent. O grindă turnată într-o placă are trei fețe la foc, fața superioară rămânând adiabatică; un stâlp are patru.
- **Protecții.** Un strat de protecție poate fi definit față cu față (grosime d_p , conductivitate λ_p , masă volumică ρ_p , căldură specifică $c_{p,p}$): plăci de gips-carton, tencuieli proiectate sau materiale izolante. Rezistența sa termică intervine în condiția la limită.
- **Materiale și geometrie.** Beton silicios sau calcaros, conținutul de umiditate, masa volumică și limita de conductivitate sunt reglabile. Secțiunea poate cuprinde găuri și cavități, zone multi-material și armături înglobate.

Se obține, la fiecare moment cerut, câmpul de temperatură complet: hartă de izoterme, temperaturi la armături și mărimi sintetice (temperatura maximă la suprafață, temperatura medie, temperatura în miez). Aceste date servesc apoi ca intrare pentru calculul capacității reziduale, care va face obiectul articolului următor.

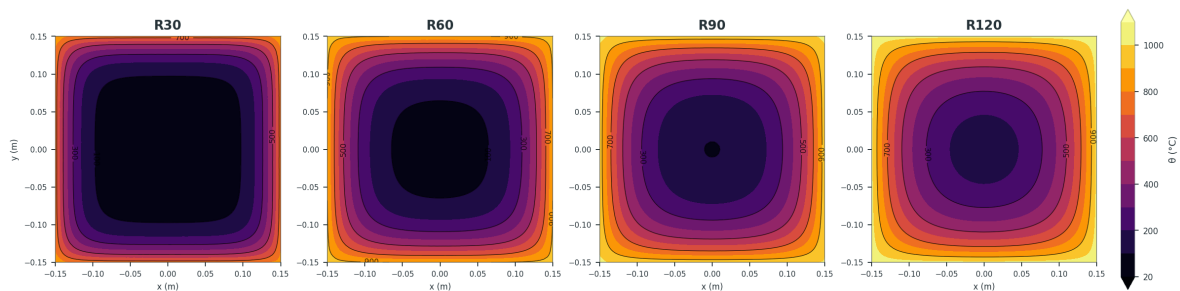


Figura 1: Exemplu de câmp calculat de SectionPro: stâlp 300×300 expus pe cele patru fețe ale sale, izoterme la duratele R30 / R60 / R90 / R120.

Validare conform Anexei A a EN 1992-1-2

Anexa A a EN 1992-1-2 furnizează profiluri de temperatură de referință pentru secțiuni curente expuse la focul standardizat ISO 834: o placă (Fig A.2), grinzi (Fig A.3 până la A.10) și stâlpi (Fig A.11 până la A.20). Aceste profiluri au fost stabilite pentru un conținut de umiditate de 1,5% și limita inferioară de conductivitate. Aceste ipoteze le adoptăm ca etalon de validare.

Două geometrii reprezentative pentru normă sunt reproduse cu aceleași ipoteze: placa, caz unidimensional expus pe o față, și stâlpul expus pe cele patru fețe ale sale, pentru care norma

furnizează direct poziția izotermei de 500 °C care delimitează betonul considerat rezistent. Pe fiecare diagramă, izotermele calculate de SectionPro, în roșu, sunt suprapuse peste profilurile publicate în Anexa A, în negru, trasate în același sistem de referință. Confruntarea se face astfel direct pe aceleași curbe.

— EN 1992-1-2, Anexa A — SectionPro

Transferul în placă rămâne cvasi-unidimensional dinspre fața expusă, în timp ce stâlpul dezvoltă un câmp dublu simetric al cărui miez rece se micșorează pe măsură ce expunerea se prelungește.

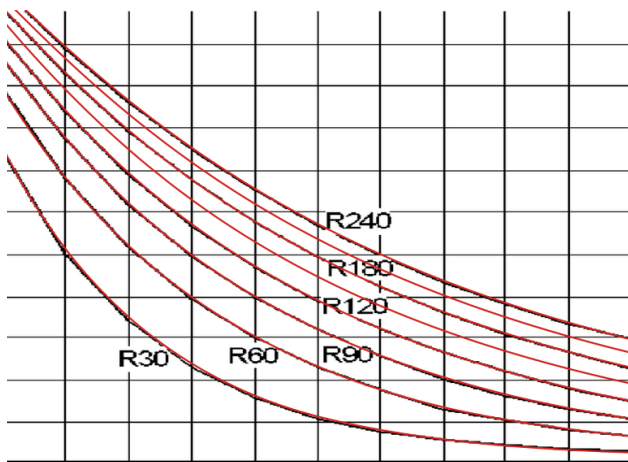


Figura 2: Placă $h = 200$ mm expusă la fața inferioară, de la R30 la R240 (adâncime 0 până la 100 mm pe abscisă, temperatură pe ordonată).

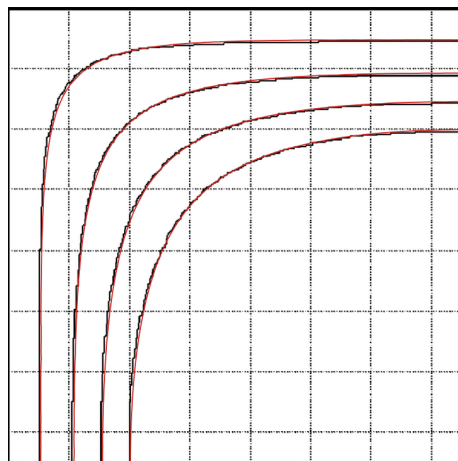


Figura 3: Stâlp 300×300 , izotermă 500 °C la R30, R60, R90 și R120 (sfert de secțiune, 0 până la 150 mm pe latură).

Bilanț de validare. Pe placă, cazul unidimensional de referință, profilul calculat se suprapune peste cel din Fig A.2 pe tot intervalul de acoperiri utile, ca și până la miez. Pe stâlpul expus pe cele patru fețe ale sale, poziția izotermei de 500 °C urmează norma la fiecare durată. Solverul termic este astfel validat pe aceste două configurații de expunere.

Exemplu de aplicație

Dincolo de formele tabelate de normă, SectionPro tratează o geometrie oarecare. Cele două exemple de mai jos, o secțiune hexagonală și o secțiune circulară, sunt expuse pe tot conturul lor.

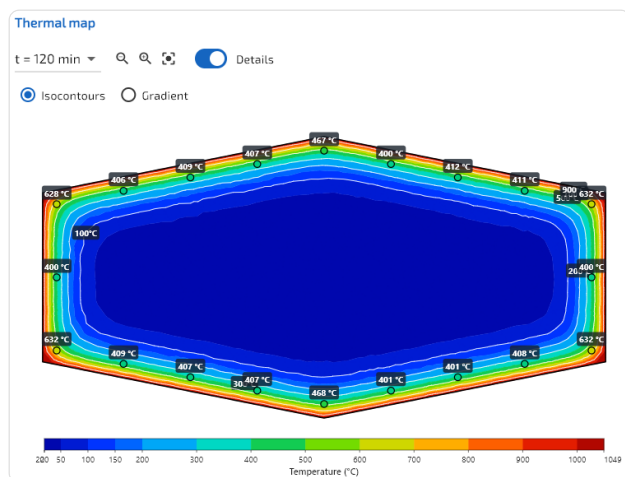


Figura 4: Secțiune hexagonală, câmp de temperatură la $t = 120$ min. Modul „Details”, afișează temperaturile la armături (pastile): miez central rece, colțuri calde la suprafață.

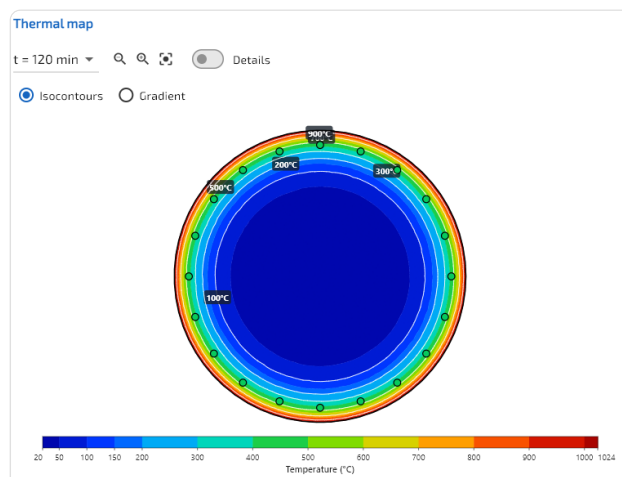


Figura 5: Secțiune circulară expusă pe tot conturul său, izoterme la $t = 120$ min. Contururile de reper (100, 200, 300, 500 și 900 °C) sunt trasate în alb.

Performanță

Calculul câmpului termic este cvasi-instantaneu: mai puțin de o secundă, inclusiv pentru cele mai lungi durate de rezistență. Timpii măsurați pe cazurile de validare sunt raportați mai jos.

Secțiune	Fețe	Durată simulată	Timp de calcul
Grindă 300×160	3	R90 (3 momente)	0,12 s
Stâlp 300×300	4	R120 (4 momente)	0,35 s
Grindă 600×300	3	R120 (4 momente)	0,52 s
Placă 200	1	R240 (8 momente)	0,57 s

Export

Câmpul termic se exportă sub formă de imagine (hartă de izoterme, în temă deschisă sau întunecată), în format CSV (coordonatele nodurilor, temperaturi nodale la fiecare moment, temperaturi ale armăturilor) și în nota de calcul PDF produsă de SectionPro. Momentele de ieșire sunt libere, uniforme sau alese unul câte unul, ceea ce permite vizarea precisă a duratelor de rezistență reglementare R30, R60, R90 și R120.

Concluzie

Câmpul termic constituie fundamentul oricărei verificări la foc. SectionPro îl calculează prin elemente finite tranzitorii, rezolvând ecuația căldurii neliniare care cuplează conductivitatea dependentă de temperatură, căldura specifică cu vârf de umiditate și radiația în θ^4 , pentru o geometrie oarecare și o expunere definită față cu față, inclusiv protecțiile. Legile materialelor și curba de foc iau în mod implicit valorile din EN 1992-1-2, modificabile la intrare.

Confruntarea cu profilurile din Anexa A întărește această abordare: profilul calculat se suprapune peste referință pe cazul unidimensional al plăcii, iar poziția izotermei de 500 °C în stâlpul expus pe

cele patru fețe ale sale urmează norma la fiecare durată. Câmpul astfel obținut furnizează o bază fiabilă pentru calculul capacității portante reziduale în situație de incendiu.