

Comportarea la foc a CFRC — încercări, proprietăți și recomandări de proiectare

Armare inovatoare cu plasă din carbon

Comportarea la foc a CFRC

Date din încercări, proprietăți dependente de temperatură și recomandări de proiectare

Fibrele de carbon prezintă o rezistență intrinsecă ridicată la căldură, în timp ce matricea pe bază de ciment asigură izolație termică. Această combinație permite anticiparea unor clasificări favorabile la foc pentru elementele proiectate corect, adesea comparabile sau chiar superioare celor ale betonului armat tradițional, în secțiuni subțiri.

Realitatea: orice impregnare cu polimeri (de exemplu, acoperiri vinilesterice/epoxidice) sau orice consolidare lipită la suprafață introduce vulnerabilități peste aproximativ 100–240°C, din cauza degradării rășinilor. Sistemele înglobate (armături/plase încorporate) se comportă net mai bine decât consolidările exterioare neprotejate. Datele provin din literatura de specialitate și din standarde (seria ACI 440, studii experimentale); cercetările documentare specifice au fost limitate, dar ACI 440.1R-15 indică o rezistență la foc în general mai mică a FRP decât a oțelului în absența unor adaptări, în timp ce încercările moderne pe beton armat cu carbon arată rezultate solide.

1. Date din încercările de rezistență la foc

Încercările standardizate (curbe ISO 834 sau ASTM E119) expun epruvetele la încălzire rapidă (temperaturi în cuptor ≈1000°C), sub încărcare, și măsoară timpul până la cedare (stabilitate, integritate, izolare — de exemplu, R60 = 60 de minute).

Beton armat cu textile din carbon (CTRC)

Grinzi cu secțiune în I, armate cu textile din carbon, au rezistat unei expuneri standardizate la foc până la 95 de minute, sub încărcare statică. Desprinderea explozivă a betonului (spalling) nu a fost mecanismul dominant de cedare în compoziții de beton adecvate; traversarea fisurilor de către fibre ajută la păstrarea integrității.

Beton armat „general”, cu fibre/țesături din carbon

Elementele din beton armat dimensionate corect ating >60 de minute (adesea 90–120+ minute), conform unor cadre de calcul (de exemplu, GB 50016 sau Eurocod 2). Fibrele de carbon (necombustibile) își păstrează proprietățile până la ~1000°C, cu pierderi limitate înainte de oxidare. Adăugarea fibrelor de carbon (de exemplu, 0,8% din volum) poate crește rezistența reziduală la compresiune după incendiu cu aproximativ 15% și poate îmbunătăți global rezistența la foc față de un beton fără fibre.

HITEXBAU – 2026 | Pagina 1 din 4

Armare inovatoare cu plasă din carbon

Consolidare exterioară prin CFRP lipit (EBR)

Fără protecție, performanța este scăzută: adezivul epoxidic se înmoaie sau se desprinde la 60–150°C (T_g tipică), ducând la pierderea efectului de consolidare în câteva minute. Cu protecție la incendiu (de exemplu, plăci sau acoperiri), încercările la scara 1 ating 60–120 de minute la un grad ridicat de utilizare a capacității. Încercările pe grinzi EBR-CFRP protejate arată menținerea capacității atunci când adezivul rămâne sub o temperatură critică.

Proprietățile reziduale după incendiu sunt promițătoare: fibrele de carbon limitează fisurarea/desprinderea betonului față de betoanele fără fibre, deși fibrele de polipropilenă rămân superioare pentru prevenirea desprinderii explozive în betoane de înaltă rezistență.

2. Proprietăți ale materialelor dependente de temperatură

Principalul factor limitativ: tranziția vitroasă / descompunerea polimerilor (rășină/acoperire), comparativ cu stabilitatea intrinsecă a filamentelor din carbon și a betonului.

Armături din carbon (conform TGA și încercărilor de tracțiune pe CTRC)

- Acoperire (de exemplu, SBR sau impregnare similară): descompunere care începe în jur de $\sim 240^{\circ}\text{C}$ (pierdere inițială de masă $\sim 1,5\%$).
- Oxidarea carbonului (în aer): începe în jur de $400\text{--}450^{\circ}\text{C}$ (în funcție de viteza de încălzire); descompunere completă în jur de 600°C (încălzire lentă) până la 750°C (încălzire rapidă). În atmosferă inertă: fără oxidare până la $800^{\circ}\text{C}+$.

- Păstrarea rezistenței la tracțiune (fâșii CTRC, matrice de beton fin):

20°C : $\sim 1630\text{ MPa}$ (referință)

până la 400°C : 1100 MPa (67%)

$400\text{--}600/750^{\circ}\text{C}$: scădere liniară către 550 MPa (34% nominal; $\sim 50\%$ după ajustarea pentru pierderea secțiunii prin oxidare).

Rupere: rupere la tracțiune a fibrelor rămase; deformații mecanice apropiate de cele la temperatura ambiantă până la $\sim 500^{\circ}\text{C}$.

Modul de elasticitate: stabil până la $\sim 500^{\circ}\text{C}$, apoi scade.

Dilatare/deformații termice: creștere pozitivă odată cu temperatura (influențată de ondularea textilei și de interacțiunea cu betonul); coeficientul de dilatare termică (CTE) negativ al fibrelor de carbon compensează parțial, dar nu predomină.

CFRP impregnat cu polimer (bare, plase sau consolidare exterioară)

- Scădere rapidă peste T_g a rășinii (adesea $80\text{--}150^{\circ}\text{C}$ pentru vinilester/epoxidică): pierdere de rezistență de 30–50% la $200\text{--}350^{\circ}\text{C}$; pierdere de 80–90% la $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$.
- Modul: pierdere de 20–50% la $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$.
- Aderență la beton: degradare accentuată peste $80\text{--}100^{\circ}\text{C}$, prin înmuierea rășinii.

HITEXBAU – 2026 | Pagina 2 din 4

Armare inovatoare cu plasă din carbon

Beton

Se păstrează $\sim 50\text{--}70\%$ din rezistența la compresiune la $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$, însă desprinderea betonului constituie un risc (reduc prin fibre sau adaosuri PP). Conductivitatea termică a CFRC este ușor mai mare datorită carbonului, dar materialul rămâne izolant cu acoperiri suficiente cu beton.

Interpretare simplă a curbei de păstrare a rezistenței (aproximare)

- $20\text{--}400^{\circ}\text{C}$: pierdere graduală/moderată (domeniu favorabil pentru carbonul înglobat).
- $\sim 400^{\circ}\text{C}$: accelerare asociată oxidării / polimerilor — în proiectare se presupune o contribuție redusă sau chiar nulă a armăturii peste o temperatură critică (adesea definită printr-o pierdere de 50%, $\sim 250\text{--}400^{\circ}\text{C}$ în funcție de sistem).

3. Recomandări de proiectare la foc

Pentru CFRC/CTRC înglobat (probabil utilizarea principală):

- Utilizarea acoperirii cu beton (adesea 20–40 mm) pentru a întârzia încălzirea armăturilor — calcularea timpului de atingere a unei temperaturi critice ($\sim 300\text{--}400^{\circ}\text{C}$) prin modele de transfer termic.
- Utilizarea matricelor minerale/pe bază de ciment (conținut organic redus), pentru performanțe mai bune decât ale sistemelor cu conținut ridicat de polimeri.
- Integrarea fibrelor hibride (carbon + dozaj redus de PP), pentru limitarea desprinderii betonului.

- Proiectare conform unor adaptări ale Eurocodului 2 sau principiilor ACI 440.11: aplicarea factorilor de reducere k_{θ} (rezistență); asigurarea unor „zone reci”/a unei acoperiri suficiente cu beton pentru păstrarea aderenței. Se urmărește R60–R120 pentru plăci/pereți structurali — realizabil cu panouri subțiri din beton armat cu carbon, datorită ductilității armăturii.

Pentru aplicații exterioare / consolidare

I. CFRP lipit (EBR: țesături/lamele + rășină epoxidică)

Fără protecție, comportarea la foc este în general slabă: rezistența lipirii se degradează rapid atunci când adezivul se apropie de T_g (adesea de ordinul a 60–150°C, în funcție de sistem), ducând la desprindere și la pierderea efectului de consolidare. Protecțiile (plăci/silicat de calciu, tencuieli, sisteme validate) pot restabili durate semnificative de rezistență, menținând interfața sub temperatura critică.

II. Consolidare exterioară cu beton armat cu carbon, de tip CARBOrefit® (TRC/Carbonbeton în strat suprapus)

CARBOrefit® este o consolidare exterioară în care o plasă din carbon impregnată este înglobată într-un strat mineral de beton fin (aplicare manuală sau prin torcretare), în unul sau mai multe straturi.

HITEXBAU – 2026 | Pagina 3 din 4

Armare inovatoare cu plasă din carbon

Din perspectiva comportării la foc, acest principiu este mai apropiat de o consolidare „înglobată” decât de un EBR: grosimea stratului mineral joacă rolul unui izolan termic și întârzie încălzirea armăturii din carbon. Încercările pe elemente consolidate cu TRC indică rezistențe care pot depăși 60 de minute sub curba ISO 834, pentru niveluri de încărcare reprezentative, cu performanțe ale carbonului superioare celor ale textilelor din sticlă în anumite cazuri.

Punctele sensibile rămân:

- riscul de desprindere/delaminare a stratului suprapus;
- menținerea aderenței textile–matrice la temperaturi ridicate;
- natura impregnării (impregnările cu polimeri pot degrada performanța la temperaturi ridicate, motiv pentru care se dezvoltă activ abordări cu impregnare minerală).

Dacă se impune o cerință de rezistență la foc, se recomandă o justificare specifică (încercare ISO 834/EN 1363 sau modelare termomecanică cu proprietăți dependente de temperatură).

Recomandări de proiectare la foc (specifice sistemelor de tip CARBOrefit)

- Dimensionarea stratului suprapus ca barieră termică: grosimea betonului armat cu carbon (de exemplu, 6–25 mm, în funcție de tipul/numărul straturilor) condiționează direct viteza de încălzire a plasei.
- Reducerea riscului de desprindere/delaminare: compoziție, umiditate, pregătirea suportului și, eventual, microfibre PP în cazurile cu risc (principiu clasic în ingineria comportării betonului la incendiu).
- Verificarea rolului impregnării: dacă impregnarea este cu polimer (SBR/epoxidică sau similară), [fragment incomplet în sursă privind posibila modificare a performanței la temperaturi ridicate]; acesta este un aspect documentat pentru TRC impregnat.
- Evitarea analogiei directe cu EBR: aici interfața critică nu este „epoxidică–beton”, ci „strat suprapus–suport” + „textilă–matrice”.

HITEXBAU – 2026 | Pagina 4 din 4