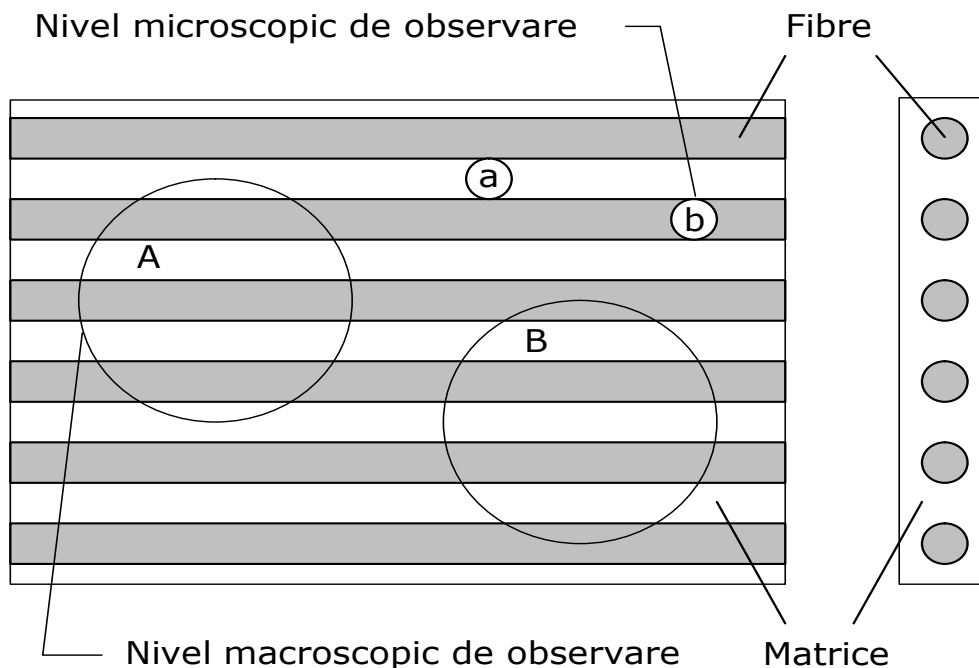


---

## CARACTERISTICI ALE COMPORTĂRII MECANICE A COMPOZITELOR

Este bine cunoscut faptul că materialele clasice, denumite și **convenționale** sunt *monofazice* (monolite), adică sunt alcătuite exclusiv din particule elementare de o singură natură, astfel încât sunt considerate *omogene* – în sensul că valorile care se obțin pentru proprietățile lor fizice și mecanice nu sunt influențate de poziția punctului din volumul de material în care sunt analizate, dar și *izotrope* – adică proprietățile sunt aceleași în toate direcțiile din jurul punctului ales pentru studiu.

Pe de altă parte, materialele **compozite** conțin în mod obligatoriu cel puțin două faze distincte și măcar unele dintre proprietățile lor fizice (cum sunt coeficientul de dilatare, conductivitatea termică s.a.) și mecanice au, în principiu, un caracter *neomogen* și *anizotrop*, adică se află într-o situație opusă față de cea a materialelor convenționale. Este totuși important de remarcat că analiza compozitelor se face nuanțat, în funcție de nivelul de observare: dacă lucrurile sunt privite la scară **macroscopică**, se poate considera (ca în figura de mai jos) că materialul este *omogen* (are o compoziție similară în diferite eșantioane – notate cu *A*, *B* etc. – ale structurii sale), dar *anizotrop* (pe anumite direcții se poate întâlni de exemplu numai material al matricei sau numai material de armare, iar pe altele se observă succesiuni ale celor două faze).



Niveluri de observare pentru studiul unui compozit cu armare unidirecțională

În schimb, în cazul analizelor care se fac la scară **microscopică** (adică la scara de dimensiuni a elementelor de armare), compozitul va putea fi considerat *neomogen*, dar *izotrop*, avându-se

în vedere că se vor pune în evidență proprietăți deosebite între ele, în punctele incluse în elementele de volum notate pe figura de mai sus cu  $a$  și cu  $b$ , dar aceste proprietăți nu vor fi influențate de direcția din material care se alege pentru efectuarea analizei, în interiorul acelor volume elementare.

Într-o altă ordine de idei, trebuie remarcată existența unor materiale care, deși *nu sunt izotrope*, prezintă particularități care le fac interesante: este astfel posibil să se constate că anumite proprietăți ale unui material sunt la fel *pe oricare două direcții simetrice în raport cu un plan*, care reprezintă pentru acel material și pentru acele proprietăți ale lui un **plan de simetrie**. Urmând mai departe această logică se poate înțelege că un material oarecare poate avea, într-un punct arbitrar din volumul său, *zero* plane de simetrie (caz în care materialul este denumit **total anizotrop**), *unul* singur, *două*, *trei* sau, la limită, *un număr infinit* de plane de simetrie pentru proprietățile lui fizice și mecanice (acesta este cazul materialelor care sunt considerate **perfect izotrope**).

O importanță practică specială prezintă, din aceste puncte de vedere, materialele numite **ortotrope** – cele care au, la nivel macroscopic, *câte trei plane de simetrie (reciproc perpendiculare)*, *în orice punct al lor*; intersecțiile acestor plane sunt trei axe, două câte două perpendiculare între ele, numite *axe principale de simetrie*, sau pur și simplu **axele principale** ale materialului, în punctul ales pentru studiu.

Caracteristica generală a compozitelor este că prin analiza lor combinată, la nivel *micro-* și *macro-mecanic*, se poate ajunge la “croirea” materialului global, în așa fel încât el să dea un răspuns **optim** la un număr mare de cerințe distincte, precizate eventual în tema de proiectare în care este descris; acest mod de proiectare *dirijată* permite și minimizarea risipei de materiale, pentru că se pot asigura valorile maxime ale proprietăților noilor structuri numai în acele direcții pe care apar cele mai mari cerințe de exploatare (astfel încât, cu privire la celelalte direcții ale materialului, conținutul de elemente de armare poate fi redus, în corespondență cu nivelul mai mic al solicitărilor).

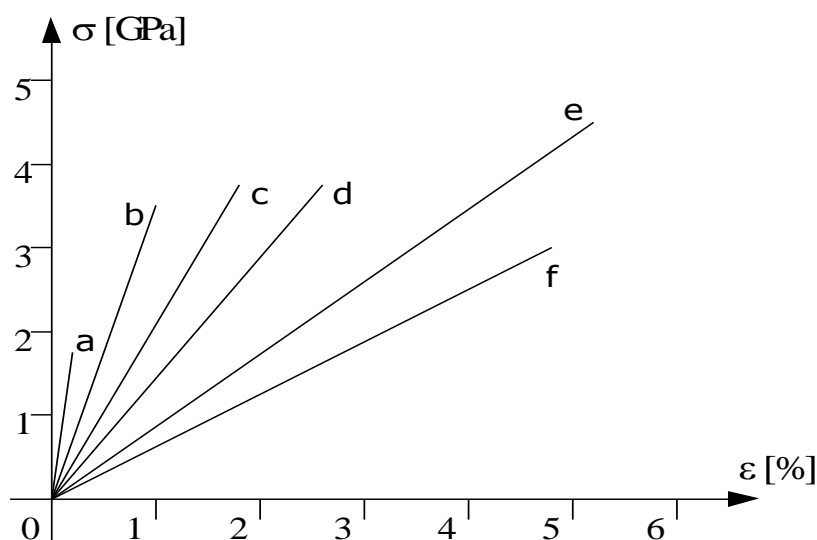
În schimb, chiar și pe baza acestei priviri sumare se poate înțelege că proiectarea materialelor și structurilor compozite a devenit și reprezintă o problemă cu caracter multi-disciplinar, având o mare complexitate, care se bazează pe formulări de tip matricial și necesită rezolvări pas cu pas, care implică și un număr foarte mare de date prelucrate simultan.

Așadar, proiectarea optimizată în acest domeniu, care este și foarte cuprinzător, nu poate fi imaginată, în momentul actual și în viitor, fără suportul unor computere și softuri puternice și dedicate, iar dezvoltarea continuă a acestora reprezintă un factor determinant și de neînlocuit în realizarea compozitelor și a structurilor compozite actuale, care au performanțe și aplicații tot mai diverse și tot mai spectaculoase.

### Aspecte privind comportarea mecanică a fibrelor și a compozitelor cu fibre

Se poate spune că, în mod obișnuit, fibrele folosite ca materiale de armare au un caracter fragil, adică arată o *comportare liniară* la tracțiune, caracter care se menține până la rupere; în consecință, parametrul *alungire la rupere* este o caracteristică fundamentală a fibrelor, pe care se bazează gruparea lor în clase de utilizare. De altfel, rezistența la rupere a compozitelor stratificate este stabilită de momentul când ele cedează sub solicitare, marcat de atingerea limitei de deformabilitate a fibrelor de armare.

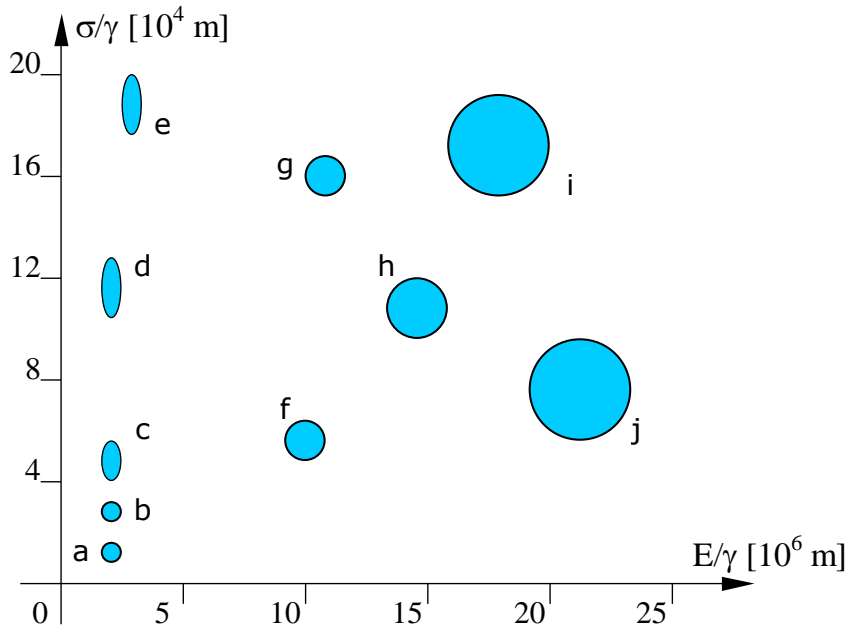
Curbele caracteristice prezentate în figura următoare arată *creșterea alungirii la rupere* a câtorva clase importante de fibre, simultan cu *scăderea rigidității* lor (ilustrată de micșorarea pantei curbelor față de axa orizontală  $\epsilon$  de pe grafic), atunci când se trece de la fibrele de **grafit** sau de **bor**, către cele de **sticlă**; s-a arătat anterior că superioritatea compozitelor față de materialele clasice se constată atunci când li se analizează valorile *specifice* ale rezistenței mecanice ( $\sigma/\gamma$ ), respectiv ale rigidității ( $E/\gamma$ ); aceste proprietăți sunt *determinate* de caracteristicile fibrelor de armare, încât este importantă alegerea corectă și bine fundamentată a acestora în etapa de proiectare a unui compozit.



Curbe caracteristice la tracțiune pentru câteva categorii tipice de fibre folosite la fabricarea compozitelor:  
 a – grafit; b – bor, carbură de siliciu; c – carbon; d – aramidice; e – sticlă S; f – sticlă E.

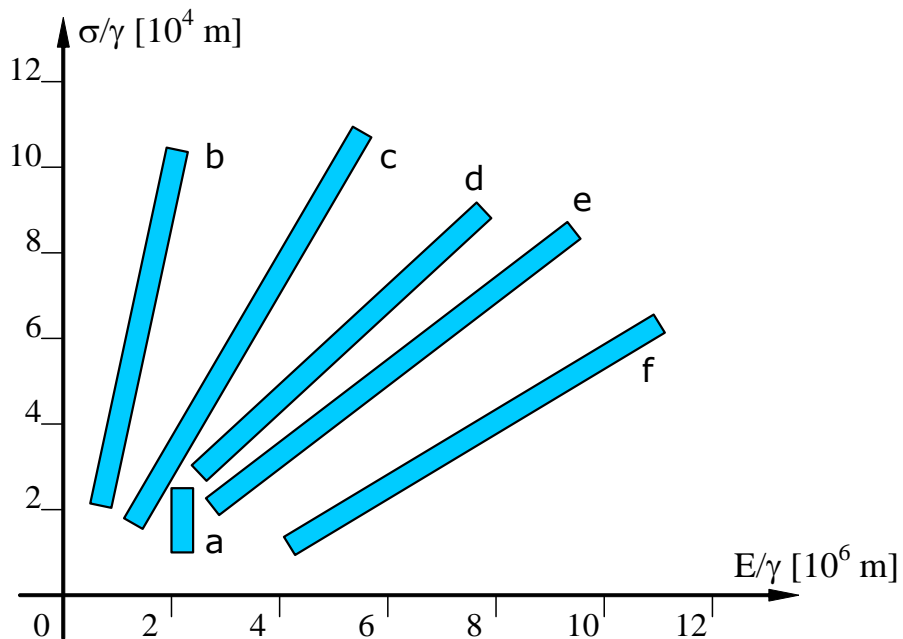
Figura care urmează prezintă simbolic limitele între care variază valorile *specifice* ale proprietăților mecanice pentru cele mai importante categorii de fibre; sunt ușor de remarcat, prin comparație, nivelurile modeste la care se situează, în acest context, proprietățile metalelor (și aliajelor) lipsite de elemente de armare.

Se evidențiază totodată și calitățile *unilaterale* ale unor clase de fibre: de exemplu fibrele de **sticlă** au rezistență bună, dar rigiditate relativ modestă, pe când fibrele de **grafit** nu excelează ca rezistență specifică, dar au modul de elasticitate de valori foarte ridicate; există și categorii de fibre cu proprietăți foarte *echilibrate* (performanțe foarte bune din ambele puncte de vedere), cum sunt cele de **bor**, dar mai ales de **carbon**.



Domeniile ocupate de proprietăților mecanice relative ale unor categorii de fibre de armare:  
 a – oțel (sub formă de bloc); b – aluminiu (bloc); c – oțel (sârmă); d – sticlă E; e – sticlă S; f – beriliu;  
 g – Kevlar; h – bor (pe W); i – carbon; j – grafit.

După cum este firesc, datorită mării lor diversități, materialele compozite au o gamă foarte largă de caracteristici mecanice; limitele între care sunt cuprinse valorile specifice ale rezistenței și rigidității se pot observa, ca exemplu, în figura care urmează, în care s-au luat în considerare cinci categorii de compozite, toate având matrice din *rășini epoxidice*.

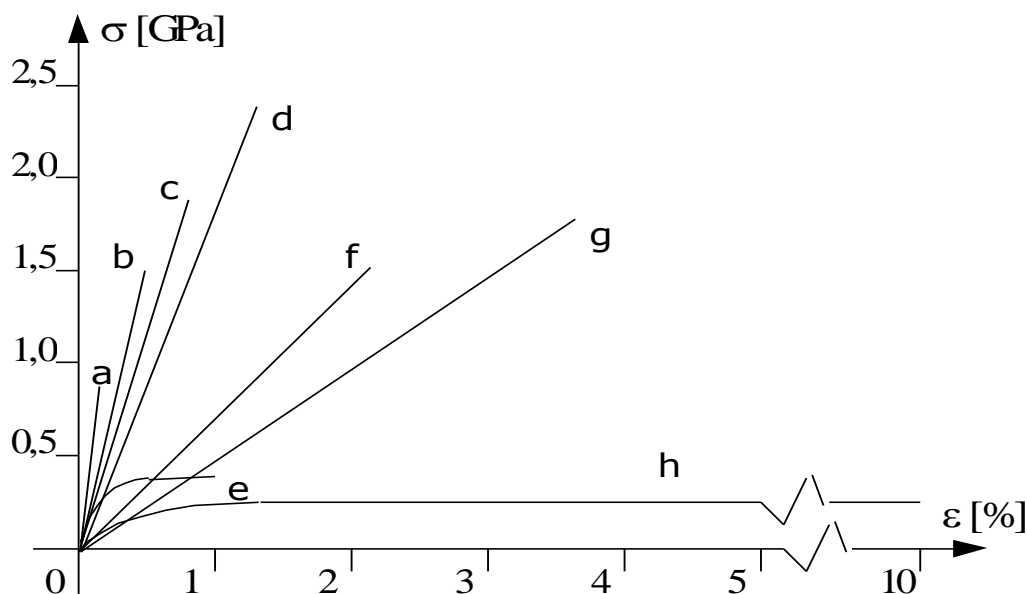


Domeniile ocupate de proprietățile mecanice relative, față de metale (a), pentru compozite cu matrice din rășini epoxidice și armare cu fibre de sticlă S (b), Kevlar (c), carbon (d), bor (e) sau grafit (f)

Domeniile dreptunghiulare marcate pe figură corespund – în zonele *inferioare* – compozitelor cu proprietăți apropiate de izotropie, adică în principiu celor bazate pe armare de tip *dispers*, în vreme ce în zonele *superioare* corespund *stratificatelor* armate *unidirecțional* (care reprezintă, așa cum s-a arătat anterior, varianta cea mai eficientă de armare); se observă din nou că proprietățile *metalelor lipsite de elemente de armare* (domeniul mic notat cu **a** pe desen) sunt depășite de cea mai mare parte dintre materialele compozite; mai trebuie subliniat că, dintre tipurile de ranforsare exemplificate pe grafic pentru rășinile epoxidice, fibrele de **carbon** sunt cele mai eficiente, compozitele lor având simultan atât proprietăți bune de rezistență, cât și de rigiditate.

Proprietățile remarcabile pe care le dețin compozitele de tip **carbon – epoxi** se observă și analizând graficele din figurile următoare; acestea reprezintă câteva exemple tipice de curbe caracteristice, pentru solicitarea mecanică de *tracțiune uniaxială* în direcțiile principale **1** (*direcția armării*), respectiv **2** (*normală la fibre*), stabilite experimental pentru mai multe categorii de **compozite** armate *unidirecțional*.

În cazul tracțiunii **în direcția fibrelor** (comportare ilustrată prin graficele din figura următoare) se remarcă imediat că, pentru compozitele de modul înalt, creșterea rigidității (adică a pantei curbelor caracteristice) implică reduceri accentuate ale alungirii lor la rupere, precum și ale rezistenței la tracțiune.

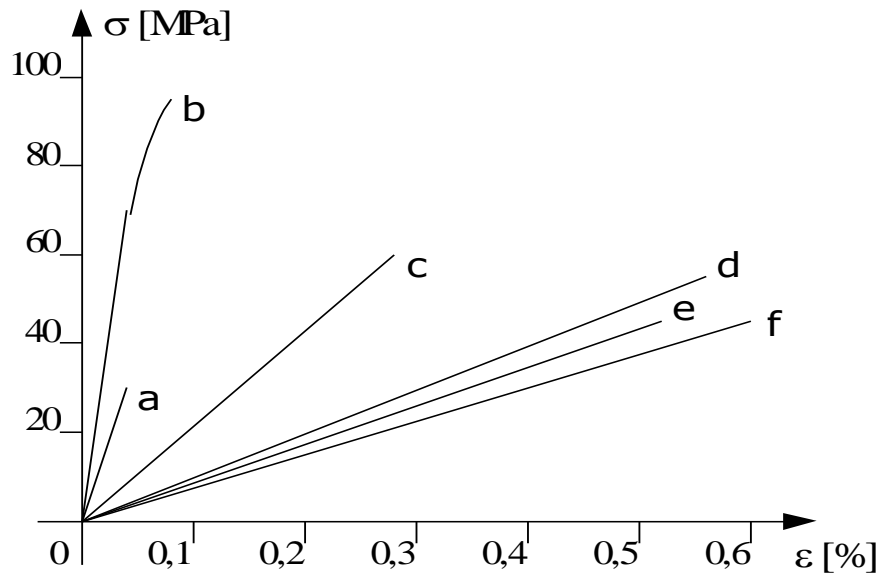


Forme tipice de curbe caracteristice la tracțiune **pe direcția fibrelor** pentru câteva categorii de compozite unidirecționale: a – grafit/epoxi; b – bor/epoxi; c – SiC/aluminiu; d – carbon/epoxi; e – SiC/sticlo-ceramică; f – Kevlar/epoxi; g – sticlă S/epoxi; h – aliaj de aluminiu neranforsat.

Pe de altă parte, comportarea compozitelor la întinderea pe direcție **transversală** este dominată de proprietățile materialului de bază; se poate observa, pentru cele patru tipuri de compozite cu matrice *epoxidică* luate în considerare (curbele notate de la **c** la **f**), că au aproximativ aceeași rezistență la rupere. Prin compararea cu graficele anterioare se remarcă

## STRUCTURI DIN MATERIALE COMPOZITE

valorile rezistenței și alungirii la rupere, mult mai mici, în cazul tracțiunii transversale (a se observa ordinul de mărime al valorilor respective), în raport cu proprietățile care corespund sollicitării în direcția fibrelor.



Forme tipice de curbe caracteristice la tracțiune **pe direcție transversală**, pentru câteva categorii de compozite unidirecționale: a – SiC/sticlo-ceramică; b – SiC/aluminiu; c – bor/epoxi; d – carbon/epoxi; e – sticlă S/epoxi; f – sticlă E/epoxi.

Câteva proprietăți fizico-mecanice observabile în mod obișnuit, pentru anumite categorii tipice de materiale compozite cu *matrice epoxidică* și armare cu *fibre lungi unidirecționale* sunt prezentate în tabelul următor; toate valorile indicate pentru proprietățile mecanice corespund unor determinări făcute la temperatura ambiantă, în condiții de umiditate zero.

### *Proprietăți ale unor compozite unidirecționale*

Proprietatea analizată	Sticlă E / epoxi	Sticlă S / epoxi	Kevlar / epoxi	Carbon / epoxi
Fracția volumică de fibre	0.55	0.5	0.6	0.63
Densitatea $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.1	2.0	1.38	1.58
Modulul longitud. $E_1$ [GPa]	39	43	87	142
Modulul transv. $E_2$ [GPa]	8.6	8.9	5.5	10.3
Modulul de forf. $G_{12}$ [GPa]	3.8	4.5	2.2	7.2
Coef. Poisson $\nu_{12}$	0.28	0.27	0.34	0.27
Coef. Poisson $\nu_{21}$	0.06	0.06	0.02	0.02
Rez. la tracț. long. [GPa]	1.08	1.28	1.28	2.28
Rez. la tracț. transv. [GPa]	0.04	0.05	0.03	0.06
Rez. la forf. în plan [GPa]	0.09	0.07	0.05	0.07
Rez. la compes. long. [GPa]	0.62	0.69	0.33	1.44
Rez. la compres. transv. [GPa]	0.13	0.16	0.16	0.23

## CARACTERISTICI ALE COMPORTĂRII MECANICE

Se remarcă gradul mare de anizotropie pe care îl arată aceste materiale, concretizat în apariția unor diferențe foarte pronunțate între valorile numerice ale proprietăților mecanice de pe direcția *longitudinală*, respectiv *transversală*; constatarea se poate face și pentru mărimi prezentate în tabel, dar nediscutate mai sus – cum ar fi coeficienții de *contractie transversală* (Poisson), respectiv rezistența la *comprimare uniaxială*; devine și pe această cale evident caracterul ***puternic anizotrop*** al proprietăților mecanice pentru compozitele armate cu fibre lungi, orientate pe o singură direcție.

Datele de acest fel sunt considerate *tipice* pentru materialele nominalizate în tabelul de mai sus, la modul general; este însă foarte important de remarcat că valorile proprietăților respective pot să varieze în mod accentuat de la un lot de fabricație la altul, pentru orice fel de material compozit; din aceste motive asemenea date se pot utiliza doar în procese de instruire, sau în calcule preliminare de proiectare; pentru proiectarea propriu-zisă a unei piese dintr-un compozit oarecare trebuie folosite valori mai exacte ale proprietăților materialelor constitutive; acestea se obțin – în lipsa unor buletine de analiză furnizate de producător, prin efectuarea unor încercări mecanice directe, asupra unor probe prelevate din lotul de semifabricate, sau pe eșantioane de materiale brute din care se va realiza piesa proiectată.