METODE EXPERIMENTALE PENTRU CARACTERIZAREA MATERIALELOR COMPOZITE

Analiza şi proiectarea structurilor compozite se bazează pe existenţa unor date experimentale de încredere cu privire la caracteristicile fizice şi mecanice ale acelor structuri, astfel încât testarea lor trebuie să urmeze principii bine stabilite; trebuie subliniat că, la fel ca în cazul analizelor teoretice sau numerice, caracterizarea experimentală a materialelor neomogene şi anizotrope poate fi făcută la mai multe niveluri şi scări de observare, adică poate fi micromecanică, macromecanică, respectiv structurală.

Se poate spune că testarea materialelor compozite are trei **obiective** importante:

- determinarea proprietăţilor de bază ale unei lamele compozite, obţinând astfel rezultate care urmează să fie introduse, ca date de intrare, în procese de analiză structurală şi de proiectare;
- cercetarea şi verificarea predicţiilor analitice asupra comportării mecanice a unui anumit material, care este studiat;
- cercetări experimentale punctuale asupra comportării unor materiale sau unor structuri, luând în considerare anumite geometrii şi condiţii de încărcare, specifice cazului practic avut în vedere.

Aceste obiective sunt atinse prin încercări şi metode de testare din următoarele **categorii**:

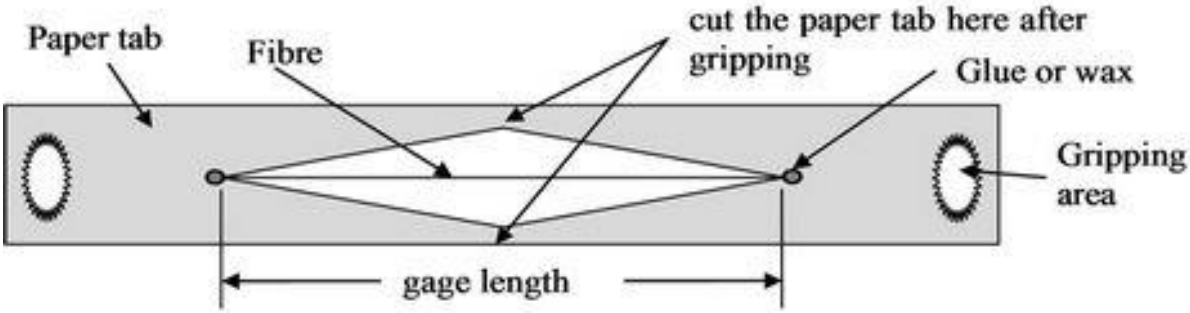
a. caracterizarea constituenţilor (matrice, elemente de armare, interfaţă), în pregătirea analizelor de tip micromecanic; cunoaşterea proprietăţilor lor reprezintă o condiţie de bază pentru a ajunge la formularea unor predicţii cu privire la comportarea mecanică a lamelei, respectiv a stratificatului bazat pe astfel de lamele şi a structurilor compozite finale;
b. caracterizarea lamelei unidirecţionale, elementul de bază pentru toate structurile stratificate;
c. determinarea proprietăţilor bazate pe coeziunea dintre straturile unui laminat;
d. comportarea materialului în condiţii speciale de solicitare (pe mai multe axe simultan, prin oboseală, fluaj, şoc, sau cu viteze mari de aplicare a încărcării);
e. analiza experimentală a tensiunilor şi cedărilor în cazul unor stratificate şi structuri compozite, cu precădere pentru cele care conţin discontinuităţi geometrice (muchii ascuţite, tăieturi, îmbinări);
f. diagnosticarea integrităţii structurii cercetate, prin încercări de tip nedistructiv.

Testările propriu-zise se realizează prin metode experimentale foarte variate, multe dintre ele implicând măsurări de deformaţii absolute sau relative; aceste metode sunt de obicei mult mai complexe decât cele similare aplicate materialelor izotrope, necesitând adaptări semnificative ale dispozitivelor şi ale mijloacelor de măsurare.

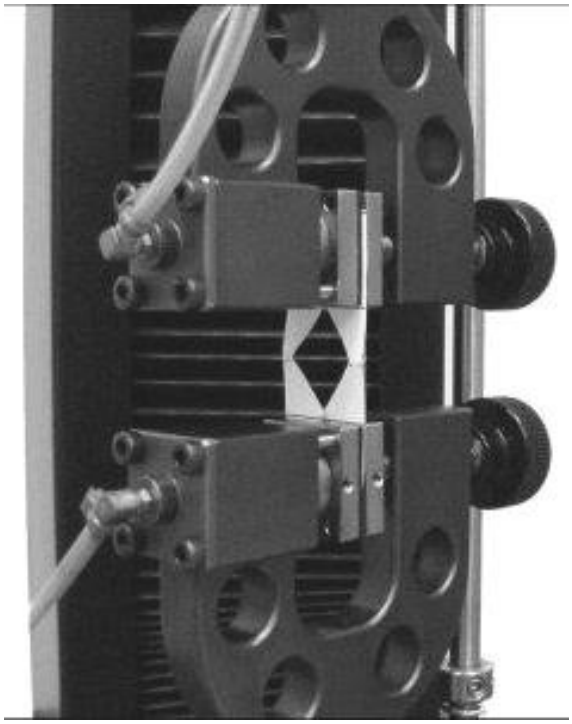
Caracterizarea materialelor constituente

A. FIBRELE DE ARMARE

Uzual pentru caracterizarea fibrelor se determină modulul longitudinal de elasticitate, respectiv rezistenţa şi alungirea la rupere (prin tracţiune); o metodă de încercare este descrisă în ASTM Standard D 3379, recomandată pentru fibre cu modul de elasticitate mai mare de 21GPa. Filamentul (fibra de testat) se montează (de ex. prin lipire) pe axa de simetrie a unui suport de hârtie prevăzut cu o fantă longitudinală; după montarea probei în maşină hârtia este tăiată bilateral, perpendicular pe fantă şi pe filament, iar întinderea lui devine posibilă.



ASTM Standard D 3379 – Explicarea modului în care se montează filamentul



Mai multe probe, cu lungimi de măsurare diferite, sunt testate până la rupere, la viteză constantă de creştere a alungirii, obţinând astfel curba de dependenţă forţă-deformaţie; în diverse puncte de pe curbă se calculează modulul de elasticitate al fibrei, cu o relaţie care include şi rigiditatea sistemului de fixare al maşinii pe care se fac încercările.

Aria A a secţiunii fibrei se determină prin măsurări la microscop, în secţiuni ale unor fibre reprezentative pentru lotul cercetat; **rezistenţa** la tracţiune a fibrei va fi $R_{ft} = F_{max}/A$

iar **alungirea** la rupere

$$A_{rf} = (\Delta L)_{max\ f} / L_f$$

(raportul între alungirea maximă a fibrei şi lungimea ei iniţială)

De obicei se mai determină şi coeficientul longitudinal $\boldsymbol{\alpha_{1f}}$ de dilatare termică a fibrelor; pentru fibrele *puternic anizotrope* (aşa cum sunt cele de carbon, sau cele aramidice) sunt studiate şi proprietăţi asociate direcţiei **transversale** (perpendiculară pe axa fibrei): modulul de forfecare $\mathbf{G_{12f}}$, coeficientul de contracţie $\boldsymbol{\nu_{12f}}$, modulul transversal $\mathbf{E_2}$, coeficientul transversal de dilatare termică $\boldsymbol{\alpha_{2f}}$.

B. MATRICEA

În cazul matricilor **polimerice**, probele sunt decupate din semifabricate produse prin solidificare în forme, iar epruvetele au formă prismatică sau de halteră, cu dimensiuni date de grosimea plăcii de material brut. Deformaţiile specifice ale probelor pe parcursul încercărilor sunt urmărite prin intermediul unor extensometre, sau cu traductoare tensometrice, sau prin metode optice – atunci când sunt testate materiale cu rigiditate mică sau provenite din plăci brute de grosimi mici; prin încercări de tracţiune duse până la rupere se stabilesc modulul $\mathbf{E_m}$, coeficientul de contracţie transversală $\boldsymbol{\nu_m}$, rezistenţa la tracţiune $\mathbf{R_{mt}}$ şi alungirea la rupere $\mathbf{A_{rm}}$; materialul este de obicei admis a fi *izotrop* şi având aceleaşi proprietăţi ca atunci când este fabricat ca matrice în compozit.

Matricile **metalice** sunt caracterizate într-un mod asemănător, însă trebuie ţinut seama de faptul că proprietăţile unui metal fabricat separat pot fi mult diferite de ale metalului fabricat ca matrice într-un compozit – de exemplu datorită temperaturilor ridicate de fabricare, sau din cauza interacţiunilor cu elementele de armare; trebuie deci cunoscută starea matricii metalice în compozit şi apoi caracterizat un bloc de material cu proprietăţi similare (de exemplu asimilând etapele de fabricare cu un anumit tratament termic aplicat metalului).

Matricile **ceramice** pot şi ele să fie testate, pe probe decupate din semifabricate sub formă de bloc, dar numai pentru studiul proprietăţilor elastice; proprietăţile de rezistenţă şi de cedare a materialului sunt de obicei specifice pentru ceramica fabricată ca matrice în compozit, astfel încât trebuie să fie cercetate prin metode *indirecte*, în cadrul testelor aplicate materialului compozit.

Studiul proprietăţilor fizice ale compozitelor

1. DENSITATEA

Această proprietate se măsoară la fel ca pentru oricare alt material solid, de exemplu urmând procedura din standardul ASTM D 792 – stabilirea densităţii prin *cântărire* în aer şi apoi într-un lichid cu densitate cunoscută:

a. cântărirea probei de material, în aer, cu precizie de 0,1mg;
b. ataşarea probei la balanţa analitică, prin intermediul unui fir subţire şi cântărirea probei în timp ce aceasta este scufundată, împreună cu o porţiune din firul de susţinere, în apă distilată;
c. cântărirea doar a firului, parţial introdus în apă, până la acelaşi nivel ca la etapa precedentă.

Admiţând că experimentul are loc la temperatura de 23°C (la care apa distilată are densitatea 0,9975g/cm^3), densitatea materialului cercetat va fi:

$$\rho = \frac{a}{a-(b-c)} \cdot 0{,}9975 = \frac{a}{a+c-b} \cdot 0{,}9975 \qquad [g/cm^3]$$

în care **a**, **b**, **c** sunt, respectiv, greutatea probei în aer şi greutăţile aparente ale probei scufundate (cu tot cu fir) şi firului parţial cufundat în apă distilată.

2. FRACŢIA VOLUMICĂ DE FIBRE DE ARMARE (V_f)

Reprezintă o proprietate importantă a oricărui compozit, încât există o varietate de metode pentru stabilirea valorilor ei; dacă se admite, de exemplu (prin teste) că *porozitatea* materialului cercetat este zero sau neglijabilă (mai mică decât 1%), atunci $\mathbf{V_f}$ se poate obţine pe baza unei relaţii între densităţile compozitului şi constituenţilor:

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m}$$

Pe scară largă sunt folosite metode de **consumare** a materialului matricei, acesta fiind astfel îndepărtat din volumul probei de compozit care se analizează.

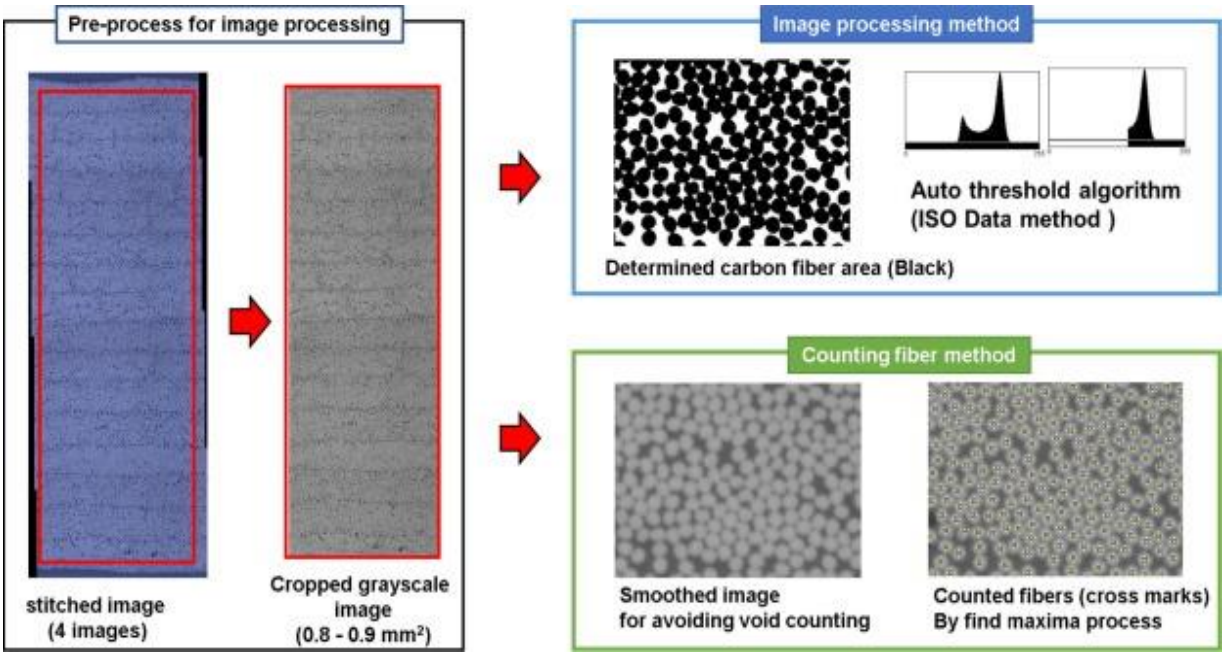
a) Metoda de ***ardere completă*** (ASTM D 2584) este folosită pentru compozite cu matrice de natură organică şi fibre anorganice (sticlă/epoxi, bor/epoxi etc.); nu se poate utiliza pentru fibre de carbon, sau aramidice, care sunt atacate de oxigenul din aer la temperaturile (de 500-600°C) necesare pentru arderea matricei. Un eşantion de compozit este uscat şi cântărit (stabilind masa iniţială $\mathbf{M_c}$), apoi este ars (de exemplu într-un cuptor) până când matricea este îndepărtată total; ce rămâne este spălat de cenuşi, uscat şi cântărit (şi va reprezenta masa $\mathbf{M_f}$ de fibre, din eşantionul iniţial). Pentru a exprima în termeni de *volum* fracţia de fibre din compozit se foloseşte relaţia:

$$V_f = \frac{M_f / \rho_f}{M_c / \rho_c}$$

b) Metoda de ***digerare cu acizi*** (ASTM D 3171 – *Standard Test Method for Fiber Content of* ***Resin****-Matrix Composites by Matrix Digestion*, respectiv D 3553 – dacă matricea este *metalică*) – se aplică pentru compozitele cu matrice solubilă, de exemplu într-un acid, care însă nu atacă şi fibrele de armare. Un eşantion de compozit este uscat şi cântărit, apoi cufundat în soluţia acidă care va dizolva matricea; ce rămâne este filtrat, spălat, uscat, cântărit, iar V_f se calculează la fel ca la metoda anterioară.

Fracţia volumică de fibre se mai poate stabili folosind tehnici **optice** – analiza de imagine a unor fotomicrografii de secţiuni transversale (perpendiculare pe fibre) (bine şlefuite) ale probei de compozit; aceste metode nu sunt standardizate, dar permit estimarea, pe o cale separată, a fracţiilor de constituenţi; tehnicile fotomicrografice necesită analiza multor probe, pentru obţinerea unor rezultate de încredere, întrucât de obicei aria de probă de pe o imagine este de ordinul unei sutimi de mm^2.

O metodă elementară (ilustrată în figura următoare) constă în numărarea secţiunilor de fibre, întregi şi fracţionate, care apar într-o astfel de imagine; se calculează aria lor totală şi se împarte aceasta la aria totală a imaginii; o tehnică ceva mai sofisticată de analiză a imaginii permite stabilirea simultană a fracţiilor volumice de fibre şi de goluri, aşa cum se va arăta în paragraful de mai jos.

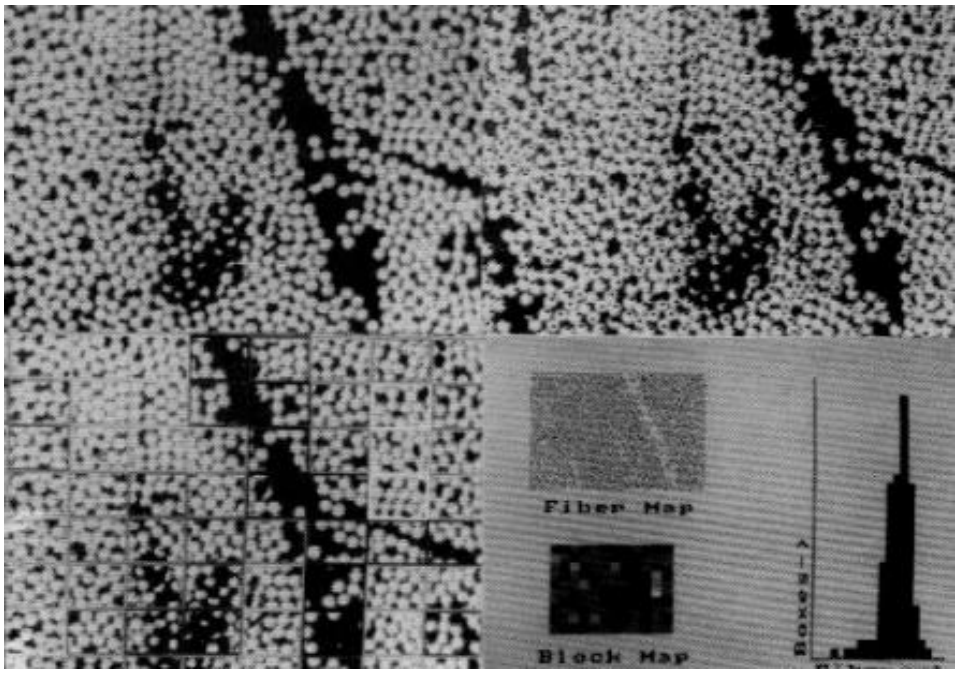


3. FRACŢIA VOLUMICĂ DE GOLURI (V_g) (porozitatea compozitului)

Această valoare nu trebuie să depăşească 1% – pentru compozite cu matrice *polimerică*, respectiv 3% – pentru matrici *metalice*; o metodă este descrisă în ASTM D 2734 (*Test Method for Void Content of Reinforced Plastics*), folosind determinările de la metodele de consumare a matricei, de mai sus:

$$V_g = 1 - \frac{M_f / \rho_f + (M_c - M_f) / \rho_m}{M_c / \rho_c}$$

Trebuie observat că în această relaţie un număr de valoare mică (V_g) se exprimă ca diferenţă între două numere mult mai mari, astfel încât rezultatul obţinut este extrem de sensibil la corectitudinea măsurărilor efectuate.

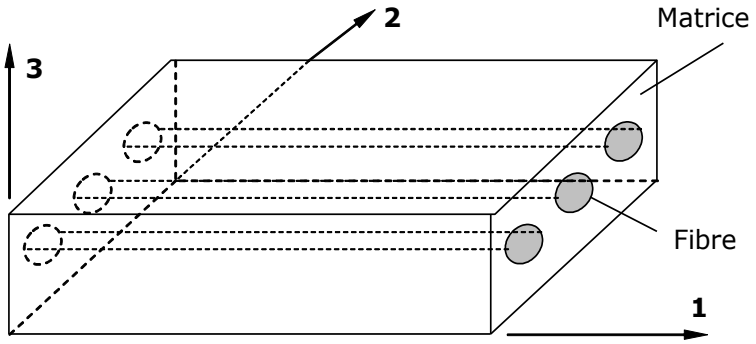


Din aceste motive în practică este preferată o metodă bazată pe *analize de imagini digitalizate*; dacă se priveşte (ca în figura din josul paginii anterioare) o foto-micrografie (în alb şi negru) a unei secţiuni transversale printr-o probă de compozit cu matrice polimerică, armat de exemplu cu fibre continue de carbon, se observă prezenţa în fotografie a unor *tonuri diverse de gri*, în aspectul porţiunilor din imagine care reprezintă **fibre** (care au o nuanţă mai *deschisă*), **matrice** (acre apar gri-*închis*) şi **goluri** din structură (care de obicei apar ca *negre*).

Imaginea poate fi digitizată, folosind o cameră video şi apoi transmisă la un computer, iar acesta poate să contabilizeze (prin intermediul unui soft dedicat) numărul $\mathbf{n_i}$ de *pixeli* (puncte de imagine) cu cele trei feluri de tonuri de gri; dacă se face împărţirea fiecăruia dintre aceste numere la numărul total **N** de pixeli din imagine, se obţine *fracţia volumică* de **fibre**, de **matrice**, respectiv de **goluri** din proba analizată.

NOŢIUNI DE BAZĂ PENTRU STUDIUL EXPERIMENTAL AL COMPOZITELOR

Se consideră că elementul unitar pentru structura unui material armat cu fibre lungi este **lamela** (sau *lamina*) compozită. Această noţiune se referă la un singur "strat" (plan sau curb) de fibre, unidirecţionale sau ţesute, împreună cu masa din materialul matricei în care acel strat este înglobat.



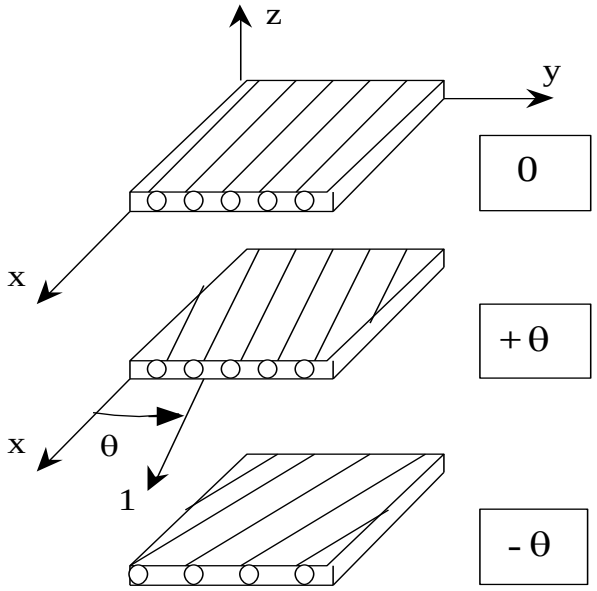
Definirea axelor principale pentru o lamelă compozită cu armare unidirecţională.

Dacă armarea se face cu fibre lungi, aşezate pe o singură direcţie, atunci lamela se numeşte **unidirecţională** şi are proprietăţi *ortotrope*, cu axele principale orientate astfel:

⇒ *longitudinal* – axa 1 – în direcţia fibrelor;

⇒ *transversal*, în planul armării – axa 2 – perpendiculară pe fibre, dar conţinută în lamelă;

⇒ *transversal*, perpendicular pe planul lamelei – axa 3.



Simbolizarea direcţiilor armării în lamelele unui compozit stratificat.

Dacă armarea se face cu fibre *ţesute*, atunci axele fibrelor (dacă sunt perpendiculare între ele), vor fi direcţiile principale (1 şi 2) în planul lamelei; mai multe lamele, cu orientări similare

sau diferite ale armării, aşezate suprapus şi *solidarizate* prin continuitatea matricei, formează un **stratificat** (laminat) compozit.

Lamelele componente ale unui stratificat pot să fie de grosimi diferite, sau chiar din materiale compozite diferite (caz în care se vorbeşte despre un compozit *hibrid interstrat*), încât axele principale vor fi de obicei diferite de la un strat la altul; laminatul se analizează global cu un sistem comun de axe (x, y, z), iar acestea pot să coincidă, sau nu, cu axele principale ale vreunei lamele.

Orientarea unei lamele individuale este definită, aşa cum se arată în figura din josul paginii anterioare, prin *unghiul* care se formează între *axa de referinţă globală* **x** şi *axa principală* **1** (direcţia fibrelor); acest unghi trebuie să fie măsurat în sens *trigonometric* (invers celui orar), în planul (x-y).

Simbolizări

Un stratificat compozit este desemnat printr-o simbolizare care va indica numărul, tipul, orientarea şi ordinea de suprapunere a straturilor (lamelelor) care participă la alcătuirea lui, adică *succesiunea structurală* ("stacking sequence") a stratificatului; iată cum este concretizată aceasta pentru câteva exemple tipice de compozite stratificate (succesiunea straturilor începe cu cel de la faţa *superioară*):

Tip de compozit	***Simbolizare***
Unidirecţional, cu 4 straturi	$[0/0/0/0] = [0_4]$
Bidirecţional, simetric	
- cu 4 straturi	$[0/90/90/0] = [0/90]_s$
- cu 3 straturi	$[0/90/0] = [0/\underline{90}]_s$
Unghiular simetric	$[+45/-45/-45/+45] = [\pm 45]_s$
	$[30/-30/30/-30/-30/30/-30/30] = [\pm 30]_{2s}$
Unghiular asimetric	$[30/-30/30/-30/30/-30/30/-30] = [\pm 30]_4$
Multidirecţional	$[0/45/-45/-45/45/0] = [0/\pm 45]_s$
	$[0/0/45/-45/0/0/0/0/-45/45/0/0] = [0_2/\pm 45/0_2]_s$
	$[0/15/-15/15/-15/0] = [0/\pm 15/\pm 15/0]_T = [0/(\pm 15)_2/0]_T$
Hibrid	$[0^K/0^K/45^C/-45^C/90^S/-45^C/45^C/0^K/0^K]_T = =[0_2{}^K/\pm 45^C/\underline{90^S}]_s$

Indicii şi notaţiile de mai sus au următoarele semnificaţii:

- indice numeric = număr de straturi sau grupuri de straturi identice
- indicele "s" = succesiune de straturi (secvenţă) simetrică
- indicele "T" = în simbol sunt indicate toate straturile structurii
- subliniere = stratificatul este simetric în raport cu linia mediană a stratului
- exponent = pentru hibride, arată natura fibrelor de armare din acel strat (K = Kevlar; C = carbon sau grafit; S = sticlă)

Proprietăţile elastice fundamentale ale lamelei compozite

S-a arătat anterior că în analizele de tip **macromecanic** compozitele sunt considerate *omogene*, dar *anizotrope*, astfel încât proprietăţile fizice de bază, care trebuie cunoscute pentru a se face estimarea comportării globale a materialului sunt *proprietăţile medii* ale *lamelei* compozite.

Luând ca axe de referinţă direcţiile principale ale materialului, proprietăţile elastice fundamentale pentru o lamelă armată cu fibre lungi sunt considerate următoarele:

- E_1, E_2, E_3 = modulii de tip Young, în direcţiile principale ale lamelei;
- G_{12}, G_{23}, G_{13} = modulii de forfecare, în planele principale;
- ν_{12}, ν_{23}, ν_{13} = coeficienţii de tip Poisson.

Observaţii:

1. Pentru modulii de forfecare, indicii numerici arată planul din material în care este definit fiecare dintre ei, astfel că aceşti indici sunt inversabili!
2. În schimb, în notarea coeficienţilor de cuplare (dintre care fac parte şi coeficienţii de contracţie transversală), primul indice reprezintă direcţia încărcării, iar cel de-al doilea arată direcţia de măsurare a deformaţiei specifice produse; în aceste notaţii indicii nu mai pot fi inversaţi între ei!

Parametrii care desemnează conţinutul compozitului

Se delimitează un *volum elementar reprezentativ* $\mathbf{V_C}$ - având *masa* $\mathbf{m_C}$ - dintr-un compozit oarecare; pentru a efectua orice calcule estimative privind proprietăţile fizico-mecanice ale compozitului, trebuie stabilite mai întâi următoarele caracteristici ale lui:

- conţinutul volumic de fibre $V_f = \dfrac{\text{volumul ocupat de fibre}}{V_C}$
- conţinutul masic de fibre $W_f = \dfrac{\text{masa fibrelor}}{m_C}$
- conţinutul volumic de matrice $V_m = \dfrac{\text{volumul ocupat de matrice}}{V_C}$
- conţinutul masic de matrice $W_m = \dfrac{\text{masa matricei}}{m_C}$
- conţinutul volumic de goluri (pori)

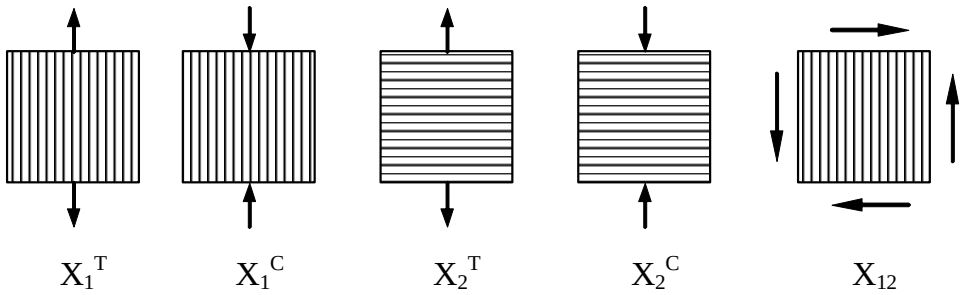
$$V_g = 1 - V_m - V_f = \frac{\text{volumul ocupat de goluri}}{V_C}$$

Desigur că aceste calcule se fac în acelaşi mod, schimbând corespunzător indicii, pentru cazurile în care armarea compozitului nu se face cu fibre, ci cu elemente disperse.

Parametrii macromecanici de rezistenţă

Estimarea comportării la rupere a compozitelor este o problemă complexă, întrucât mecanismele lor de rupere variază în limite largi, în funcţie de proprietăţile mecanice ale compozitului şi de felul încărcării; complexitatea creşte, atunci când apar simultan mai multe mecanisme de rupere, în procesul studiat.

Din punct de vedere macromecanic **rezistenţa** unei lamele compozite la solicitări mecanice este o proprietate *anizotropă*, depinzând de direcţia pe care se determină; este necesar să se coreleze rezistenţa pe o anumită direcţie cu *parametrii de bază* ai rezistenţei lamelei, iar aceştia se raportează la direcţiile principale ale materialului, la fel cu parametrii de rigiditate de mai sus.



Schemele de încărcare pentru determinarea experimentală a parametrilor macromecanici de rezistenţă.

Pentru încărcările **plane**, având efecte într-un singur plan (cel al armării, dat de direcţiile principale 1 şi 2), rezistenţa lamelei unidirecţionale este caracterizată prin **5** parametri macromecanici: $\mathbf{X_1^T}$ = rezistenţa la tracţiune longitudinală; $\mathbf{X_1^C}$ = la compresiune longitudinală; $\mathbf{X_2^T}$ = la tracţiune transversală; $\mathbf{X_2^C}$ = la compresiune transversală; $\mathbf{X_{12}}$ = la forfecare în planul armării (intralaminară).

Fiecare parametru poate fi pus în legătură cu una dintre încercările elementare utilizate în analizele de laborator (ca în schematizările de mai sus).

Observaţii:

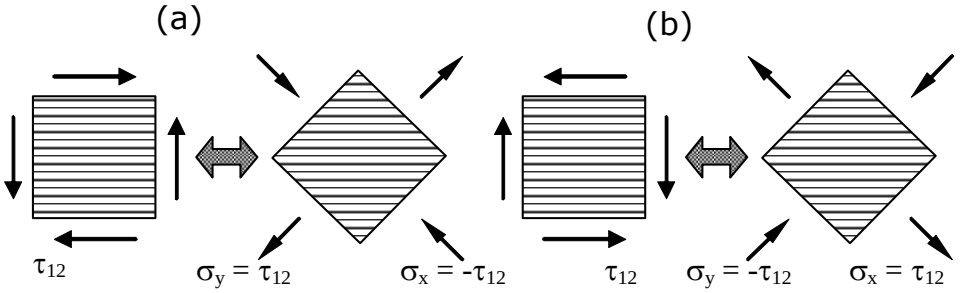
1. *Pentru cele mai multe compozite se obţin, pe orice direcţie din volumul lor, valori diferite ale rezistenţei la tracţiune, respectiv la compresiune.*
2. *Cei cinci parametri sunt folosiţi în calcule ca valori numerice absolute (nu se ţine seama de semnele ce li se pot asocia – precum semnul negativ, în cazul tensiunilor de compresiune).*

Influenţa orientării tensiunilor de forfecare

Într-un material **ortotrop**, dacă tensiunile tangenţiale acţionează pe direcţiile lui *principale*, atunci valorile **rezistenţei la forfecare** sunt unice, indiferent dacă în experiment apar tensiuni (τ_{ij}) *pozitive*, respectiv *negative*; se vor compara efectele date de tensiunile *pozitive* (a), respectiv *negative* (b), în stări de încărcare de tip *forfecare pură*, pentru următoarele două cazuri de solicitare:

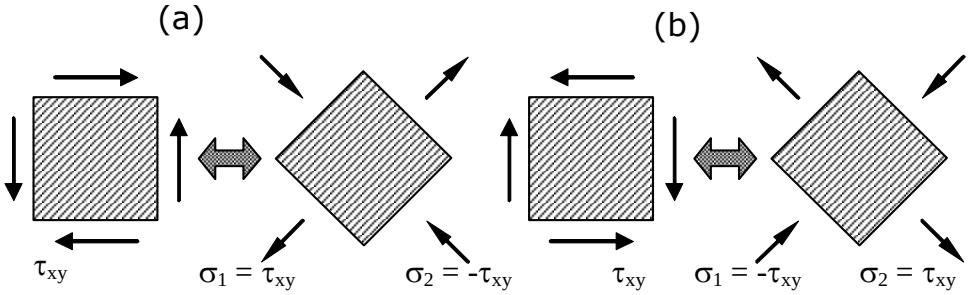
- cu tensiunile tangenţiale dirijate, în planul de forfecare, pe direcţiile principale ale materialului;
- cu tensiuni tangenţiale care au direcţii înclinate la 45° faţă de axele principale ale materialului.

Pentru fiecare situaţie (solicitarea este de **forfecare pură**) s-au făcut două reprezentări echivalente, una cu tensiunile tangenţiale τ_{12} , respectiv τ_{xy} , cealaltă cu tensiunile normale corespunzătoare σ, pe direcţii înclinate la 45° faţă de cele tangenţiale.



Solicitarea de forfecare cu tensiuni paralele cu axele principale ale materialului ortotrop.

Dacă tensiunile tangenţiale au direcţiile axelor principale, atât cele (considerate, prin convenţie) ***pozitive***, cât şi cele ***negative*** produc în probă (aşa după cum se cunoaşte în legătură cu orice stare de forfecare pură) tensiuni de *tracţiune* şi de *compresiune*, egale între ele în valori absolute şi orientate la fel (*înclinate* la unghiuri de 45°) faţă de direcţiile principale 1 şi 2 (adică şi faţă de direcţia armării); *semnul tensiunilor tangenţiale (de forfecare) nu are importanţă* în această situaţie, iar rezistenţa la forfecare a compozitului nu va fi influenţată de diferenţa dintre rezistenţele lui la tracţiune şi la compresiune.



Cazul solicitării de forfecare cu tensiuni tangenţiale înclinate sub unghiuri de 45° faţă de axele principale ale materialului ortotrop.

Situaţia este diferită dacă tensiunile de forfecare apar pe direcţii *diferite* de cele principale; tensiunile tangenţiale *pozitive* corespund unor tensiuni normale de *tracţiune* – pe direcţia fibrelor, respectiv de *compresiune* – pe direcţia transversală; în cazul (b), tensiunile tangenţiale *negative* conduc la tensiuni normale de *compresiune* – pe direcţia fibrelor, respectiv de *tracţiune* – pe direcţie transversală.

Trebuie observat că orice lamelă compozită unidirecţională este puternic anizotropă, având sensibilitate maximă (adică rezistenţa cea mai mică) la solicitarea de *tracţiune*

perpendiculară pe fibre, iar în situaţia descrisă mai sus **rezistenţa la forfecare** a lamelei va fi **mai mare** dacă tracţiunea transversală *nu apare*, altfel spus atunci când solicitarea se produce prin tensiuni tangenţiale *pozitive*.

Parametri adiţionali de rezistenţă

Aşa cum s-a arătat mai sus, analiza materialelor anizotrope, sub acţiunea unor solicitări mecanice care produc stări **plane** de tensiuni, necesită cunoaşterea a **5** caracteristici de rezistenţă ale materialului; de cealaltă parte, dacă se produc stări de tensiuni **spaţiale**, adică în cazul unor analize de tip **tri-dimensional** acele 5 caracteristici nu sunt de obicei suficiente, astfel încât devine necesar să fie stabiliţi **4** parametri *adiţionali* de rezistenţă ai lamelei compozite, aceştia corespunzând unor încercări mecanice care produc efecte *în afara planului armării* (solicitări *interlaminare*):

- una de *tracţiune* (prin care se determină rezistenţa $\mathbf{X_3^T}$);
- una de *compresiune* (cu parametrul de rezistenţă $\mathbf{X_3^C}$);
- două de *forfecare* (cu parametrii de rezistenţă $\mathbf{X_{23}}$ şi $\mathbf{X_{13}}$).

Concluzie

Orice material compozit este considerat complet caracterizat, din punctul de vedere al proprietăţilor sale de *rezistenţă mecanică*, prin cunoaşterea unui număr de **9** valori de *parametri macromecanici* – dacă se iau în considerare solicitări mecanice de complexitate maximă, care produc în material *stări spaţiale* de tensiuni; atunci când se analizează solicitări cu *stări plane* de tensiuni, numărul acestor parametri scade la **5**.

Observaţii:

1. *Pentru compozitele cu* **izotropie transversală** *(planul de izotropie 2-3 fiind perpendicular pe fibre), indicii 2 şi 3 vor fi inter-schimbabili, astfel că* $X_3^T \approx X_2^T$, $X_3^C \approx X_2^C$ *şi* $X_{13} \approx X_{12}$.
2. *Aşadar, pentru analiza acestor materiale, în stări generale (tri-dimensionale) de solicitare, rămân de stabilit doar* ***6*** *parametri de rezistenţă.*

METODE EXPERIMENTALE
pentru studiul comportării mecanice a materialelor compozite

Parametrii de rezistenţă ai compozitelor ,despre care s-a discutat în paragrafele anterioare, se stabilesc prin efectuarea unor încercări mecanice; acestea sunt în bună măsură asemănătoare celor de la materialele clasice, dar au anumite particularităţi date de caracterul neomogen şi anizotrop al compozitelor.

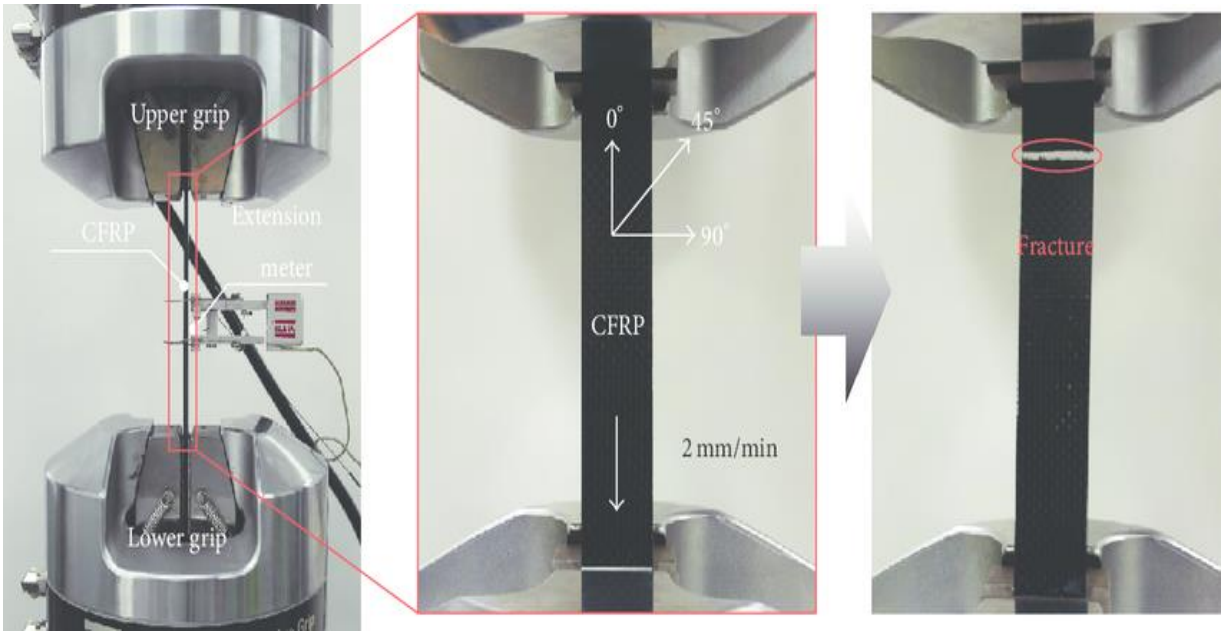
În cazul analizelor de tip macromecanic, lamela unidirecţională este elementul constructiv de bază pentru structura unui compozit, astfel încât caracterizarea comportării ei mecanice reprezintă o pre-condiţie pentru aplicarea metodelor – teoretice, numerice, sau experimentale – de analiză a structurilor compozite.

Este de la sine înţeles că cele mai multe dintre încercările mecanice aplicate compozitelor sunt *standardizate*, cel mai adesea fiind citate şi utilizate normele din standardele ASTM, amintite şi în prezentarea de faţă; în continuare vor fi discutate câteva tipuri de încercări aplicate compozitelor cu matrice ***polimerică***; având în vedere că acestea sunt utilizate cel mai mult în practică, metodele prin care li se testează calităţile au fost şi ele abordate pe scara cea mai largă şi au cunoscut dezvoltarea cea mai sistematică.

1. Stabilirea proprietăţilor de tracţiune (şi compresiune)

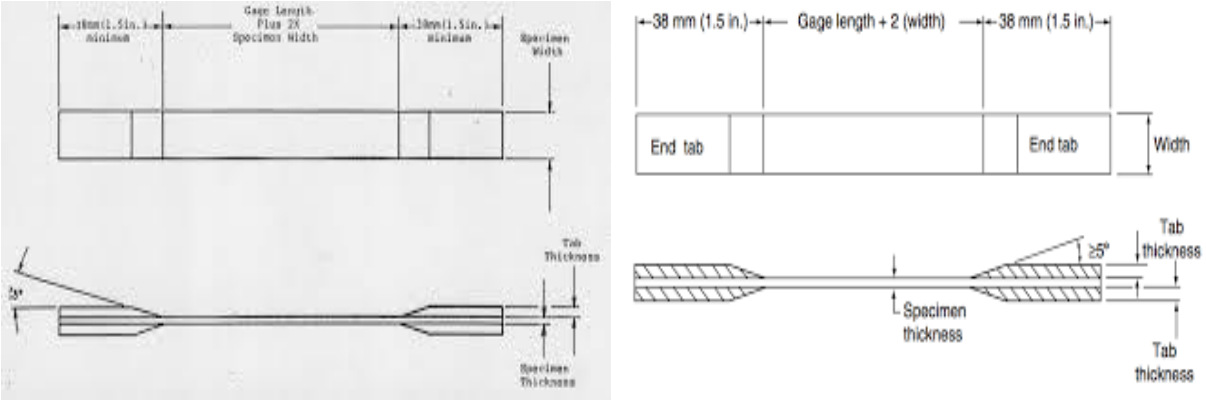
Se folosesc încercări de **tracţiune** uniaxială, pe baza cărora sunt determinate valorile următoarelor proprietăţi:

- E_1, E_2 modulii de tip Young, pe direcţie longitudinală şi transversală
- ν_{12} ,ν_{21} coeficienţii de tip Poisson – principal şi secundar
- X_1^T, X_2^T rezistenţele la tracţiune, pe direcţie longitudinală şi transversală
- ε_1^R, ε_2^R alungirile la rupere, pe direcţie longitudinală şi transversală

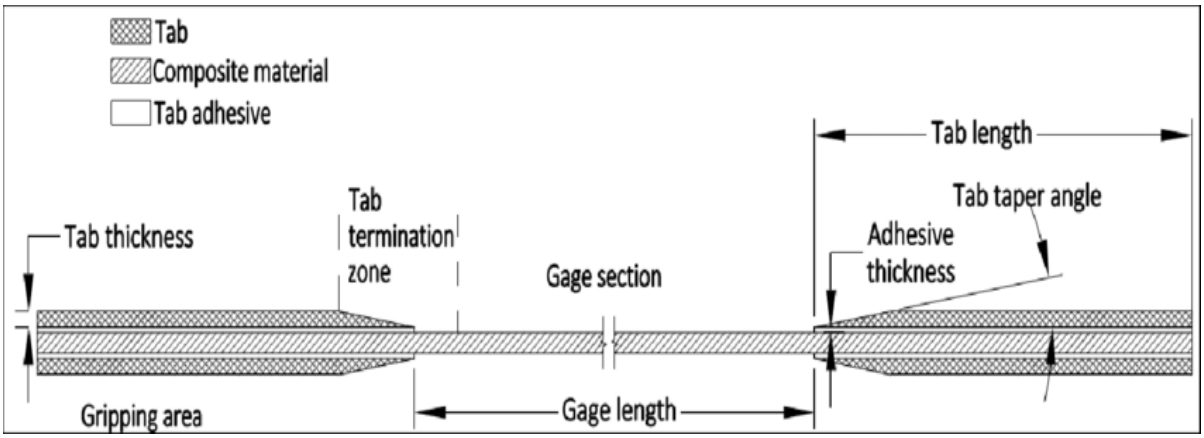


Efectuarea încercărilor mecanice de tracţiune asupra compozitelor cu matrice polimerică.

Epruvetele folosite au de obicei forme prismatice (standardul ASTM-D-3039 se referă la încercarea la tracţiune a compozitelor cu matrice polimerică), cu secţiune constantă şi taloane de rigidizare în zonele de prindere; lungimea lor tipică este de 230mm (cu zona de măsurare de 150mm), iar lăţimea de 12,5mm – pentru încercarea pe direcţia fibrelor de armare, respectiv 25mm – pentru încercarea de tracţiune transversală.



Aspectul tipic al epruvetelor de tracţiune în cazul compozitelor cu matrice polimerică.



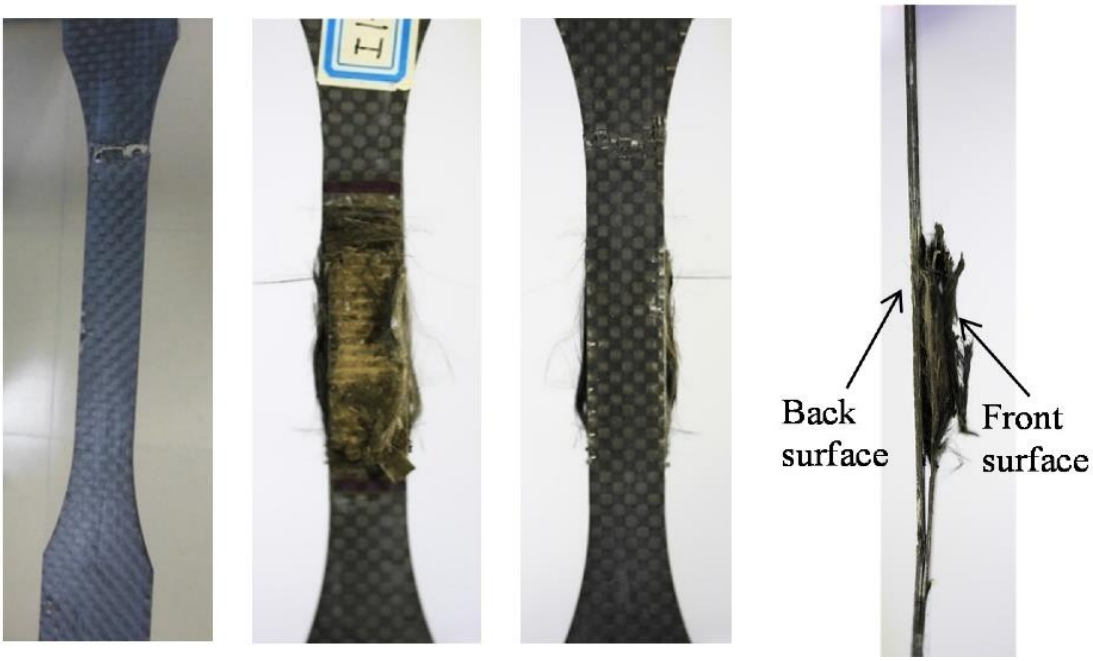
Construcţia standard a epruvetelor de tracţiune
recomandate pentru încercarea compozitelor cu matrice polimerică.

Grosimile recomandate ale epruvetelor sunt cuprinse între 0,5 şi 2,5 mm, adică 6 straturi de fibre – la încercarea de tracţiune longitudinală, dar cel puţin 8 straturi – pentru cea de pe direcţia transversală.

Probele sunt solicitate până la rupere, evoluţia dependenţei dintre încărcare şi alungirea probei este urmărită prin intermediul computerului care comandă maşina, iar graficul care reprezintă *curba caracteristică* a materialului încercat apare în mod continuu pe monitor. În final se analizează aspectul probelor rupte şi se stabileşte şi modul de cedare care a fost predominant, în momentul în care materialul a atins limita de rezistenţă.

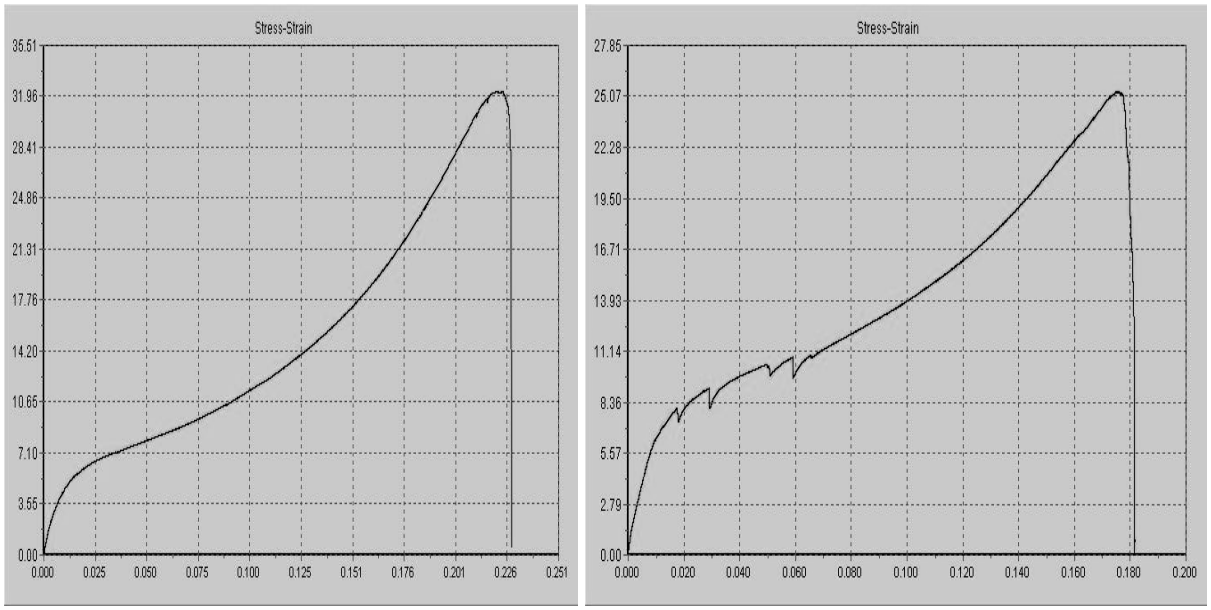
Este interesant de remarcat felul cum se reflectă, pe graficele astfel obţinute, comportarea mecanică specială a compozitelor, prin comparaţie cu cea a materialelor convenţionale; dacă se analizează curbele caracteristice prezentate în continuare (în partea de jos a paginii care

urmează), se poate observa un punct de inflexiune, imediat după depăşirea zonei elastice iniţiale de pe curbă. Cele două tipuri de curbură se datorează diferenţei de comportare la tracţiune dintre constituenţii compozitului: în zona iniţială solicitarea este preluată aproape în totalitate de matricea polimerică, iar graficul apare cu o convexitate îndreptată în sus.



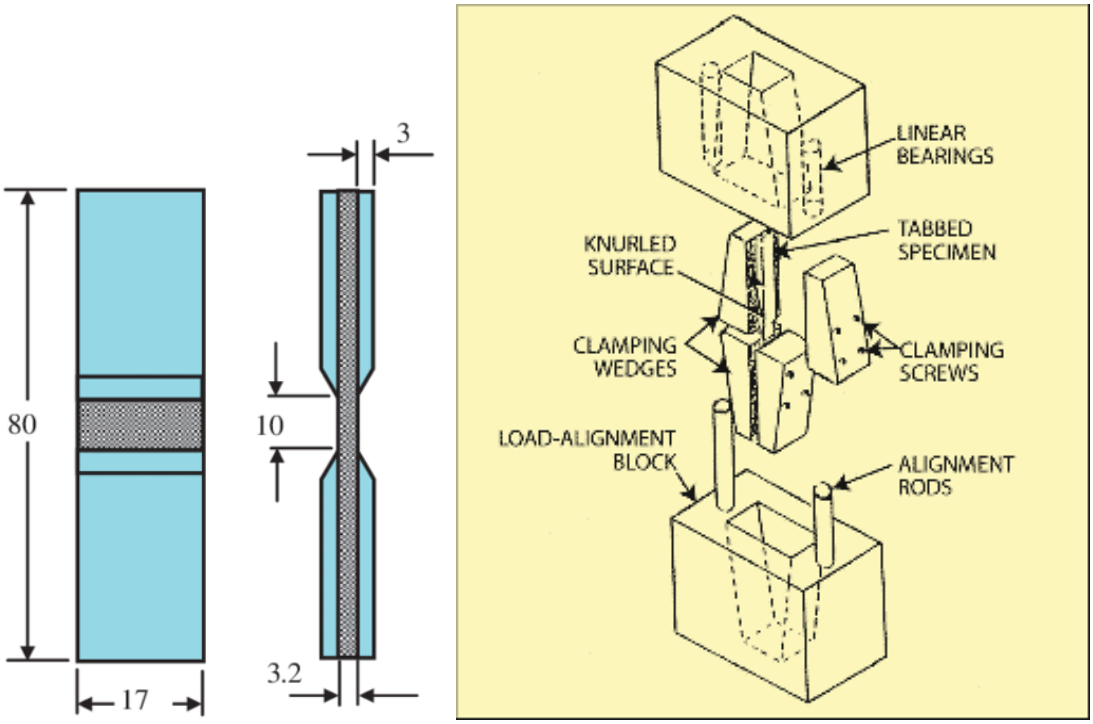
Aspectul ruperii în cazul unor probe din compozite cu matrice polimerică, armate cu fibre de carbon.

Pe măsură ce creşte treptat alungirea straturilor de matrice, solicitarea este transmisă cu precădere către straturile de ranforsant, fapt ilustrat de graficul având *convexitatea în jos*, care apare în figură în zona superioară a curbelor; acest aspect este considerat tipic pentru solicitarea la tracţiune a firelor de tip *textil*.



Aspectul tipic al curbei caracteristice de tracţiune pentru un compozit cu matrice polimerică şi armare cu ţesături din fire textile

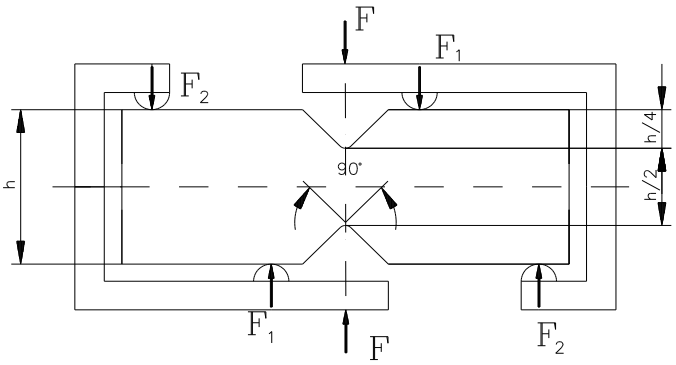
Pe de altă parte, este interesant faptul că graficul din dreapta prezintă o porţiune care poate fi denumită *zimţată*, despre care se poate observa că nu alterează alura globală a curbei caracteristice; salturile respective se datorează fragmentărilor succesive ale straturilor de polimer, pe măsură ce solicitarea creşte, acest fenomen făcând de altfel posibilă preluarea treptată a solicitării de către straturile de fibre de armare.



Aspectul tipic al unor probe şi al dispozitivului de comprimare de tip Celanese.

Proprietăţi similare celor de mai sus se stabilesc prin încercări de **comprimare** uniaxială (efectuată, pentru compozitele polimerice, după prevederile standardului ASTM D 3410), care sunt cele mai pretenţioase experimente, ca aplicare practică, datorită tendinţei de rupere prematură a compozitului; din acest motiv devin necesare măsuri speciale de prindere (şi de antrenare) a probelor în maşina pentru încercări (dispozitivele folosite, care cunosc mai multe variante constructive, devin aşadar mai complicate), iar lungimile de măsurare ale epruvetelor sunt relativ mici (întrucât cea mai mare parte din lungime o formează porţiunile lor care sunt prinse în bacuri).

2. Stabilirea proprietăţilor de forfecare

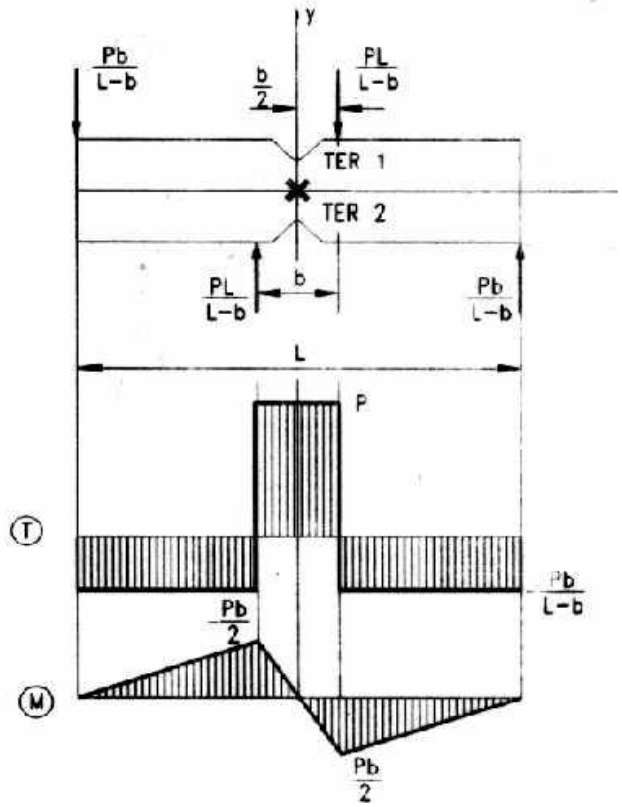


Modul de încărcare a epruvetei Iosipescu.

Cel mai frecvent se studiază proprietăţile de rezistenţă şi de rigiditate din planul armării, adică modulul de lunecare G_{12} şi rezistenţa la forfecare X_{12}; metodele de testare sunt foarte diverse şi nu există încă o metodă care să fie unanim acceptată şi general valabilă; se admite că 4 tehnici sunt mai mult folosite: testul Iosipescu, încercarea de forfecare între şine (***rail-shear test***), tracţiunea dezaxată (***10 deg off-axis test***), şi tracţiunea probelor cu armare încrucişată sub unghiuri de ±45°.

Aspecte particulare ale încercărilor de forfecare aplicate compozitelor

A. *Încercarea la **forfecare pură*** este un procedeu propus de profesorul *Nicolae Iosipescu*, în urma cercetărilor sale din anii 1960; epruveta şi testul lui Iosipescu, dezvoltate în principal pentru studiul metalelor au fost extinse ulterior la materiale compozite de către Adams şi Walrath de la Universitatea Wyoming (1983).



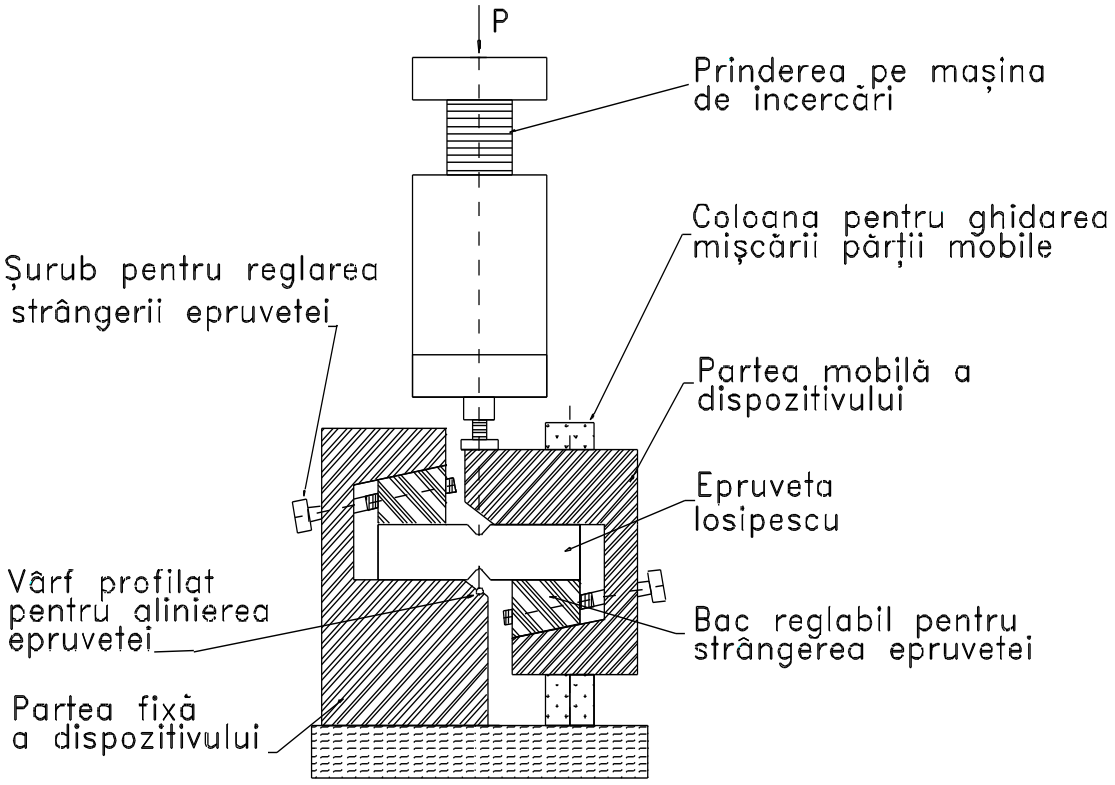
Incărcarea epruvetei şi diagramele de eforturi.

Proba Iosipescu este în formă de grindă dreaptă, solicitată de 4 forţe, plasate antisimetric, pentru a se obţine în secţiunea de forfecare anularea efortului încovoietor (şi a tensiunilor normale σ), efortul tăietor fiind egal cu forţa aplicată dispozitivului de forfecare; prin practicarea unor crestături bilaterale pe probă, la mijlocul lungimii ei, Iosipescu a urmărit să creeze o secţiune slăbită, în care să se dezvolte tensiunile tangenţiale cele mai mari (şi uniform distribuite) şi unde să se producă ruperea.

Prin studii de fotoelasticitate el a stabilit că flancurile acelor crestături trebuie să fie paralele cu direcţiile izostaticelor (traiectoriile eforturilor principale), adică să fie orientate la 45° faţă de secţiunea transversală (producând astfel tensiunile tangenţiale maxime în toate punctele secţiunii de forfecare şi obţinând un "unghi viu"); în ideea de a optimiza adâncimea

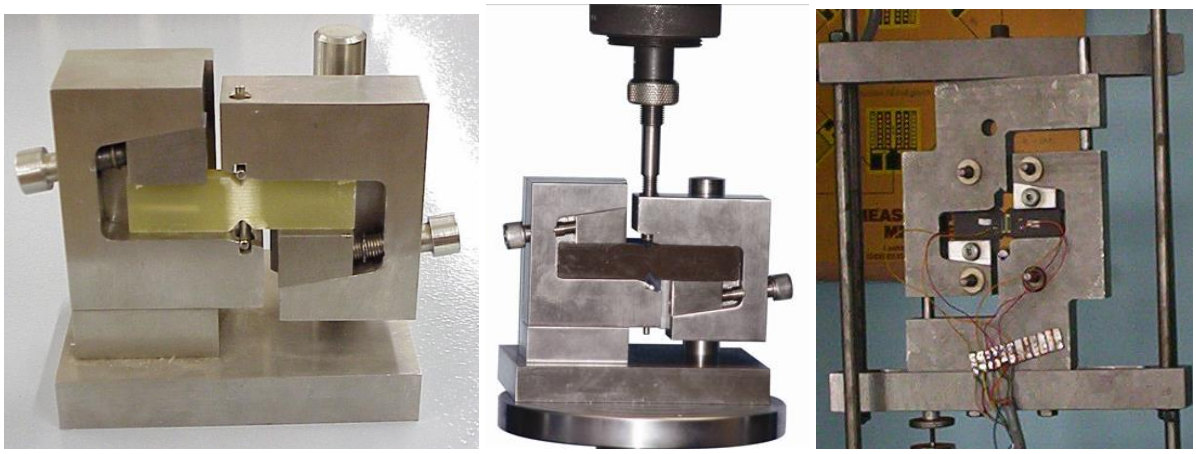
celor două crestături, Iosipescu a căutat să ajungă la o repartiţie uniformă a tensiunilor tangenţiale în secţiunea de dimensiuni minime (care este chiar secţiunea transversală în care se produce forfecare pură, deoarece momentul de încovoiere este nul în acel punct al probei); concluzia analizelor a fost că această condiţie este îndeplinită numai atunci când crestăturile au (*fiecare*) adâncimea de *un sfert* din înălţimea epruvetei, situaţie care se regăseşte pe forma standard a epruvetei Iosipescu (a se revedea prima figură de mai sus).

Avantajele metodei pentru testarea materialelor anizotrope au fost remarcate de cercetătorii americani, care au stabilit *procedeul de forfecare Iosipescu* pentru studiul rezistenţei şi modulului de forfecare în plan, aplicat compozitelor stratificate, armate cu fibre lungi şi standardizat prin norma ASTM D 5379.



Schematizarea dispozitivului Wyoming pentru încercarea de forfecare Iosipescu.

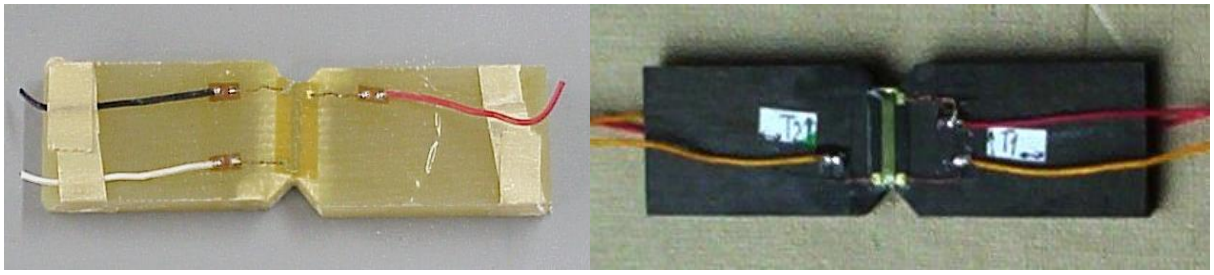
Solicitarea aplicată epruvetei este o încovoiere cu sarcini antisimetrice faţă de verticală, fiind obţinută prin intermediul unui dispozitiv de construcţie specială; varianta care este prezentată în standardul ASTM a fost concepută la Universitatea Wyoming de profesorii Adams şi Walrath; este remarcabil faptul că forţele aplicate ansamblului dispozitiv-epruvetă au *rezultantele* pe axa de simetrie verticală a epruvetei (axa crestăturilor); prin modul de interacţiune dintre dispozitiv şi probă cele două jumătăţi de dispozitiv tind să producă deplasări în sensuri opuse, în plan, ale celor două jumătăţi ale probei, încât planul vertical de simetrie defineşte secţiunea de forfecare.



Variante practice de dispozitive pentru testul de forfecare Iosipescu.

Instrumentele de măsurare folosite la realizarea testului Iosipescu au şi ele o construcţie specială, adaptată modului în care se produce în acest caz solicitarea de forfecare; cele două traductoare tensometrice (de tip electric rezistiv, de unde prescurtarea TER) prin care este evaluat răspunsul epruvetei la forfecare sunt reunite sub forma unei **rozete** şi au grilele orientate înclinat sub unghiuri de ±45°, în raport cu axa verticală din secţiunea de forfecare; cu ajutorul lor se măsoară două categorii de *deformaţii specifice liniare*: grilele care formează traductorul TER1 măsoară deformaţiile $\varepsilon_{+45°}$, care corespund unei solicitări de *compresiune*, în vreme ce TER2 măsoară deformaţiile $\varepsilon_{-45°}$, de *tracţiune*.

Caracterul ortotrop al materialului face ca în secţiunea de forfecare să apară şi tensiuni normale, mai ales pentru structurile cu un grad mai ridicat de anizotropie, la care cuplarea dintre forfecare şi încovoiere (şi/sau răsucire) este prezentă; (după cum se va arăta într-un capitol următor, pentru structurile construite simetric aceşti coeficienţi de cuplare sunt nuli, astfel încât tensiunile din secţiunea de măsurare vor fi numai de forfecare).



Aspectul unor epruvete (instrumentate) pentru încercarea de forfecare Iosipescu.

Modulul de forfecare în plan G_{12} se determină ca panta (zonei iniţiale a) curbei τ_{12}-γ_{12}, unde:

τ_{12} este tensiunea tangenţială în secţiunea de forfecare $\tau_{12} = \dfrac{P}{wh}$

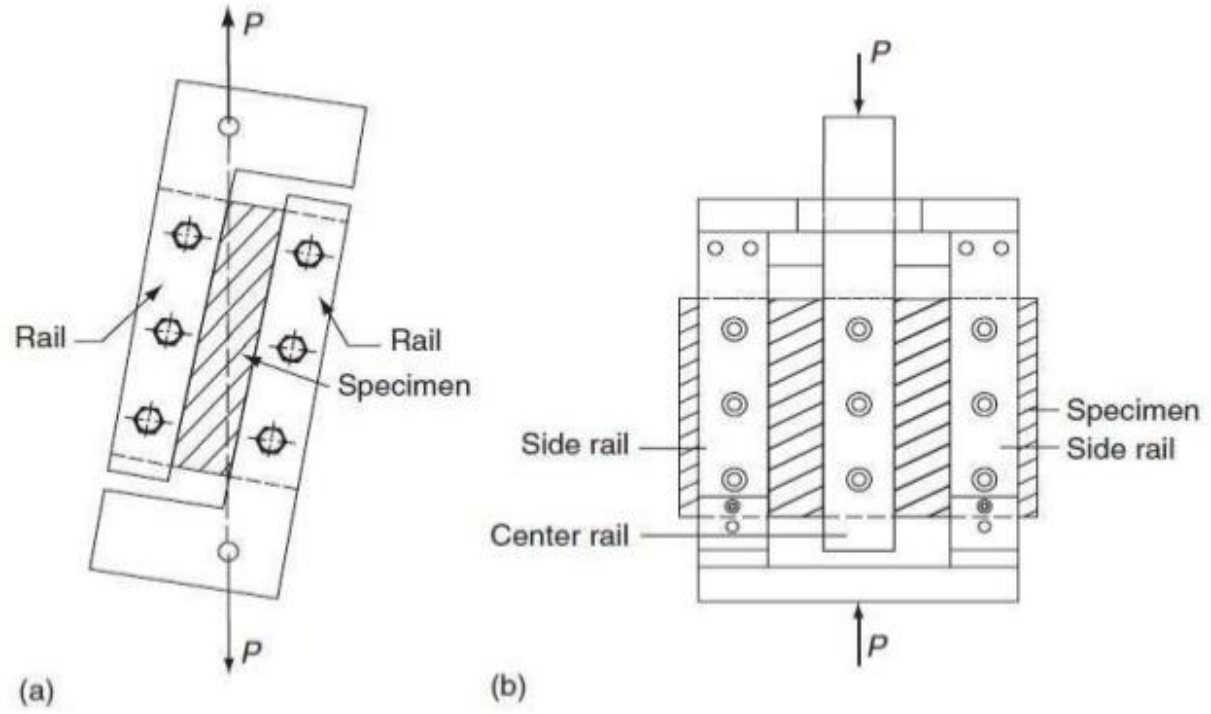
γ_{12} este lunecarea specifică, exprimată ca diferenţa celor două alungiri specifice măsurate de traductoarele rozetei de forfecare: $\gamma_{xy} = \varepsilon_{+45°} - \varepsilon_{-45°}$

În accepţiunea ASTM D5379, pentru ca procedeul să furnizeze rezultate corecte, este de preferat ca epruvetele să fie astfel realizate, încât planul de forfecare să fie orientat după două dintre axele principale ale materialului.

Este important să fie evidenţiat faptul că sunt necesare măsuri speciale de pregătire şi conducere a experimentelor:

- prelucrarea riguroasă a epruvetelor, pentru respectarea geometriei lor – mai ales planitatea şi paralelismul suprafeţelor de aşezare şi de contact cu dispozitivul de prindere;
- dispozitivul să aibă coloanele paralele, jocul în ghidaje să fie minim şi egal, iar suprafeţele de prindere a epruvetei să fie paralele;
- traductoarele (rozetele) tensometrice, care au grilele dispuse simetric şi înclinate la 45° faţă de secţiunea de forfecare, se aplică pe ambele feţe ale epruvetei şi se folosesc în măsurări separate, pentru a evidenţia erorile ce pot apărea din cauza răsucirii probei, sau a imperfecţiunilor de încărcare.

B. Metoda de **forfecare între şine** (face obiectul standardului ASTM-D-4255) foloseşte ca eşantion de compozit o placă subţire, fixată între **două şine** (*Two-Rail Shear Test*); aşa cum precizează standardul încercării (şi se arată în figura următoare) există şi o variantă cu plăci ceva mai mari, prinse în **trei şine** (*Three-Rail Shear Test*) verticale; şina din mijloc este deplasabilă alunecător, în jos, sub acţiunea forţei P care încarcă dispozitivul, producând solicitări de forfecare în cele două *intervale* dintre şinele laterale şi aceea centrală.



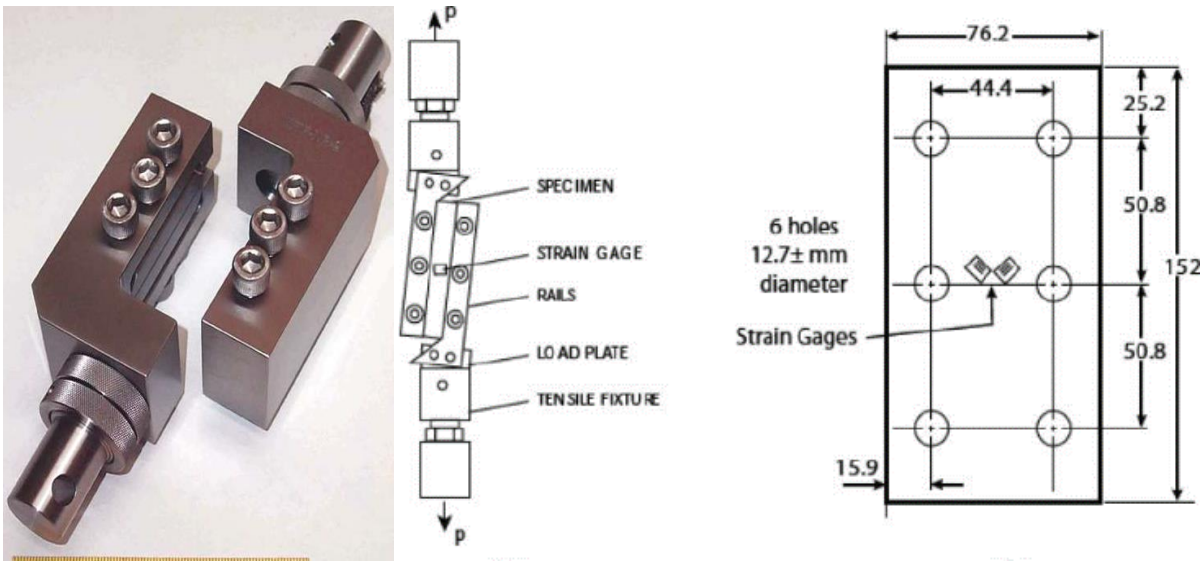
Schemele standard de încărcare la cele două variante ale testului de forfecare între şine.

Valoarea tensiunii tangenţiale se calculează ca raport între forţa P şi aria de forfecare, iar lunecarea specifică se măsoară prin intermediul unor traductoare plasate, la mijlocul ariilor de forfecare, pe direcţii înclinate la 45° faţă de şine:

$$\gamma_{12} = 2\,(\varepsilon_x)_{\theta=45^\circ}$$

Folosind valorile mărimilor calculate, aşa cum s-a arătat până aici, se trasează grafice (curbe caracteristice) ale dependenţei dintre tensiuni şi deformaţiile specifice de forfecare produse în

probă, iar stabilirea modulului de lunecare G_{12} şi celelalte calcule se fac urmărind aceleaşi principii ca la testul Iosipescu.



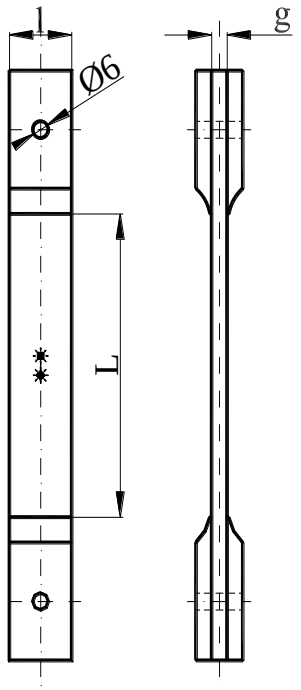
Dispozitivul, epruveta şi schema de realizare pentru testul de forfecare între **două** şine.

În legătură cu dimensiunile plăcilor de compozit folosite ca probe, se consideră că, pentru ca starea de tensiuni din punctele de măsurare să se apropie de aceea de forfecarea pură, este necesar ca raportul dintre lungimea şi lăţimea spaţiilor dintre şine să aibă valori relativ mari, de obicei 8:1; standardul mai precizează că încercările trebuie efectuate cu precauţie, întrucât în probele utilizate la aceste teste au loc concentrări puternice de tensiuni, care ar putea să conducă la ruperea prematură a materialului.

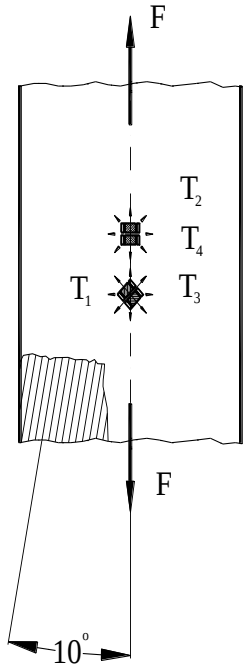
C. Descrierea practică a încercării de tracţiune dezaxată (*10° off-axis test*)

Această variantă de stabilire experimentală a modulului de lunecare $\mathbf{G_{12}}$ a fost iniţiată de Chamis şi Sinclair, în 1977, făcând parte dintre testele propuse în mod special pentru materialele armate cu *fibre continue, aşezate pe o singură direcţie*; principiul metodei este aplicarea tracţiunii *uniaxiale* unui eşantion de compozit, având fibrele de armare înclinate la unghiul $\boldsymbol{\theta}$ faţă de direcţia solicitării. Valoarea de 10° a acestui unghi a fost aleasă, pe baza experienţei iniţiatorilor metodei, astfel încât valoarea tensiunilor *tangenţiale* de forfecare produse în epruvetă să fie afectată cât mai puţin de componentele **normale**, *longitudinale* ($\boldsymbol{\sigma_1}$) şi respectiv *transversale* ($\boldsymbol{\sigma_2}$) ale stării de tensiuni.

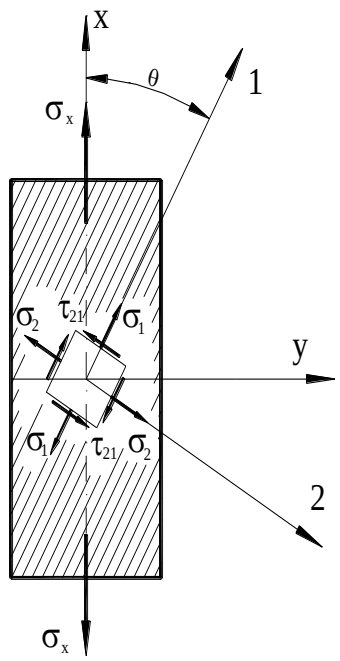
Materialul folosit în cadrul experimentului din laborator este un compozit pe bază de ***răşină epoxidică***, armată cu **fibre de carbon**, unidirecţionale, într-un conţinut volumic V_f = 68%; epruveta are lăţimea: l=2h=15.8mm, grosimea: g=3.3mm, iar lungimea zonei de măsurare L=90mm şi a fost decupată dintr-o placă de compozit (suprapunere de 24 de lamine, adică straturi de fibre), prin tăiere cu disc diamantat, cu diametrul de 150mm, funcţionând la o turaţie mare, de aproximativ 6000 rot/min; coeficientul de formă (*aspect ratio*) al epruvetei este astfel de L/h=11.39, considerat a fi o valoare suficientă pentru a considera neglijabile influenţele prinderii de la capetele probei.



Epruveta pentru tracţiune dezaxată.



Orientarea fibrelor şi poziţia traductoarelor.



Componentele principale ale stării de tensiuni.

Capetele epruvetelor sunt **rigidizate**, conform cerinţelor din standardul încercărilor de tracţiune (discutat într-un paragraf anterior al acestei prezentări), cu **taloane** din tablă de aluminiu, teşite spre zona de măsurare, iar găurile transversale centrale (cu diametrul de 6mm) din zonele de capăt folosesc pentru prinderea probelor în maşină, prin intermediul unor furci cu şuruburi; maşina folosită pentru aceste încercări este de tip "Textenser", care poate dezvolta o forţă maximă de 500N.

În principiu ar trebui ca în secţiunea de măsurare a epruvetei să existe o stare de forfecare pură, dar starea reală de tensiuni este una ***combinată***; astfel, dacă se admite că *tensiunea de pe direcţia solicitării* este

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$

atunci tensiunile raportate la **axele principale ale materialului** (ilustrate pe schiţa de mai sus) se vor calcula folosind relaţiile cunoscute din teoria elasticităţii:

$$\sigma_1 = \sigma_x \cdot \cos^2\theta \qquad \sigma_2 = \sigma_x \cdot \sin^2\theta \qquad \tau_{12} = -\sigma_x \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta$$

Dintre aceste componente doar a treia este importantă pentru testul de faţă; introducând în aceasta valoarea reală a înclinării fibrelor **θ = -10°** se poate obţine valoarea numerică a tensiunii de forfecare în plan, care urmează a fi folosită pentru a calcula modulul de forfecare al materialului încercat, adică:

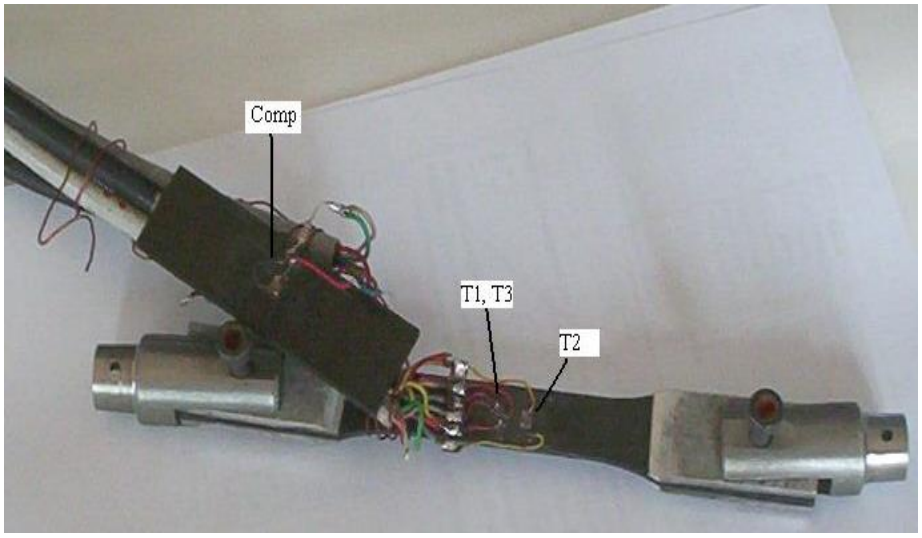
$$\tau_{12} = 0{,}171 \cdot \sigma_x$$

Pentru a stabili valorile lunecărilor specifice din planul axelor principale ale materialului, se aplică o relaţie care pune în legătură aceste mărimi cu deformaţiile specifice liniare din

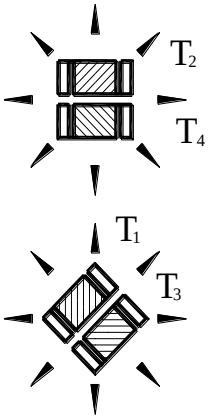
punctul de măsurare, stabilite pentru trei direcţii decalate între ele cu câte 45°; în condiţiile de faţă această relaţie se scrie astfel:

$$\gamma_{12} = 0{,}5977 \cdot \varepsilon_1 + 1{,}8794 \cdot \varepsilon_2 - 1{,}2817 \cdot \varepsilon_3$$

Lungirile specifice $\boldsymbol{\varepsilon_{1,\,2,\,3}}$ care apar în această relaţie se măsoară (şi sunt numerotate) folosind trei dintre cele patru traductoare ale unor rozete de tip EA-13-062TV-350, lipite pe axa de simetrie a epruvetei (aşa cum se arată în schiţa din pagina anterioară), încât grilele a două traductoare fac unghiuri de 0º (T_1) şi 90º (T_3) faţă de direcţia solicitării (axa epruvetei), în vreme ce un al treilea traductor (T_2 din a doua rozetă) este orientat la 45º în raport cu acea direcţie. Traductorul de compensare TC (indicat prin *Comp* pe imaginea următoare) este montat pe un eşantion nesolicitat de compozit, identic cu cel supus încercării şi amplasat în vecinătatea epruvetei.



Aspectul epruvetei de tracţiune dezaxată.



Configuraţia şi orientarea traductoarelor

Producătorul traductoarelor tensometrice rezistive (compania Vishay Micro-Measurements) indică următoarele caracteristici tehnice ale acestora (stabilite la temperatura de 24ºC): rezistenţa electrică R_G=350Ω±0,2%; factorul de marcă (determinat pe probe din aluminiu) k_T = 2,095±0,5%; sensibilitatea transversală K_t = (+2,2±0,2)%.

Rozetele tensometrice au formă de pătrat, având latura de 2mm, iar grilele traductoarelor componente sunt reciproc perpendiculare; alimentarea punţii Wheatstone se face (în curent continuu) la o tensiune de 2V, cu scopul de a reduce căldura degajată de traductoare pe parcursul determinărilor exeprimentale.

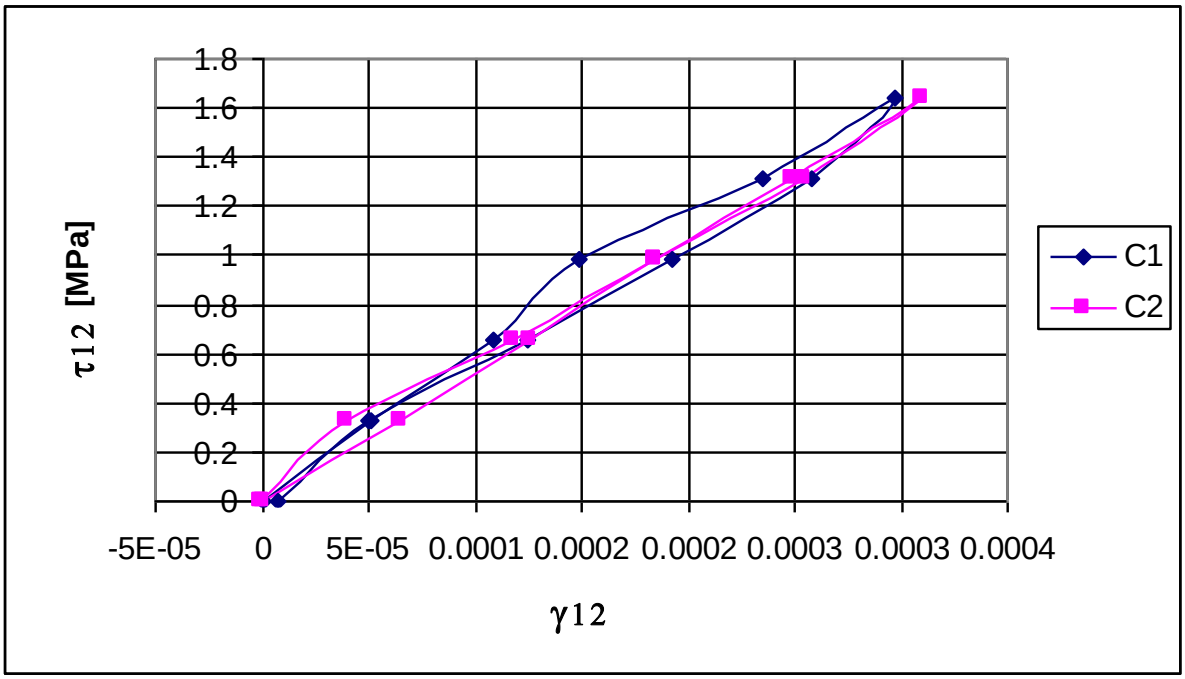
Pe baza celor de mai sus, valorile reale ale deformaţiilor specifie se calculează înmulţind indicaţiile de la instrumentul de măsură cu un factor egal cu 2 = 4V/2V (raportul dintre tensiunea de alimentare standard şi cea efectivă).

Puntea electronică (de tip N2323+N2314) a fost calibrată prin intermediul unei cutii de comutaţie (N2362+N2361), fiind folosit un singur traductor de compensare, într-un montaj în punte completă format din: (pe rând, câte) unul din cele 3 traductoare (a se revedea figurile de mai sus) T1 (paralel cu direcţia pe care se produce solicitarea), T2 (înclinat la 45° faţă de

direcţia solicitării) sau T3 (perpendicular pe forţa F); traductorul de compensare, TC; două rezistenţe furnizate de cutia de comutaţie (partea N2361).

Sertarul N2314 a fost setat pentru scara de 10000με şi pentru tensiunea de alimentare U_A=2V, iar pentru calibrare a fost utilizată formula următoare:

$$\varepsilon_{cal} = \frac{2}{k_T} \cdot 10000 \cdot \frac{U_A}{4V} = \frac{2}{2{,}1055} \cdot 10000 \cdot \frac{2V}{4V} = 4749{,}522\mu\varepsilon \cong 4750\mu\varepsilon$$



Curbe caracteristice de forfecare, obţinute prin experimente de tracţiune dezaxată.

S-au obţinut câte trei şiruri de valori pentru deformaţiile specifice liniare indicate de fiecare traductor, corespunzând unor forţe de solicitare cuprinse între 0 şi 500 N. Cu valorile medii ale acestor rezultate s-a calculat, în fiecare dintre cazuri, lunecarea specifică, folosind relaţia precizată mai sus. Calculele următoare şi prelucrarea rezultatelor se fac pe aceleaşi principii ca la testul de forfecare Iosipescu.