



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI,
PROTECȚIEI SOCIALE ȘI
PERSOANELOR VÂRSTNICE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE
OIPOSDRU



UNIVERSITATEA
TEHNICĂ
DIN CLUJ-NAPOCA

Investește în oameni!

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

AXA PRORITARĂ 1 "Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere".

DOMENIUL MAJOR DE INTERVENȚIE 1.3 "Dezvoltarea resurselor umane în educație și formare profesională"

TITLUL PROIECTULUI: "Școală universitară de formare inițială și continuă a personalului didactic și a trainerilor din domeniul specializărilor tehnice și ingineresti - DidaTec"

COD CONTRACT: POSDRU/87/1.3/S/60891

BENEFICIAR: Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Modulul 2: Proprietățile generale ale materialelor de construcție: proprietăți mecanice - încercări distructive

Autor: S.I. dr. ing. Larisa Meliță
Departamentul de Căi Ferate, Drumuri, Poduri și Materiale
Universitatea Tehnică de Construcții București

Scop



Modulul 2 al cursului de *Materiale de Instalații* vă prezintă noțiuni referitoare la proprietățile generale ale materialelor de construcție. Parcurgând acest modul veți fi familiarizați cu proprietățile mecanice ale materialelor rezultate în urma încercărilor distructive: statice, dinamice și ciclice. De asemenea, veți cunoaște care este curba caracteristică a unui oțel moale.

Obiective

La finalul Modulului 2 veți putea să:



1. Enumerați încercările distructive ale materialelor.
2. Definiți proprietățile mecanice ale materialelor, rezultate în urma încercărilor distructive.
3. Definiți și explicați deformațiile elastice și plastice ale materialelor precum și proprietățile, respectiv mărimile definite de acestea.
4. Desenați curbele caracteristice pentru materiale care prezintă deformații elastice și elasto-plastice.
5. Desenați, caracterizați și comentați curba caracteristică a unui oțel moale.

Durată



Durata medie de studiu individual: 2 ore.

2.1. Definiții

Proprietățile mecanice exprimă capacitatea materialelor de a răspunde forțelor exterioare, de natură mecanică, care se numesc **încărcări, sarcini, solicitări** sau **acțiuni**. Această capacitate depinde de structura materialului (solidului) și anume: de natura și aranjarea particulelor constitutive în unitatea de volum, de tipul legăturilor chimice dintre acestea, de numărul și de orientarea lor față de direcția solicitării, precum și de defectele de structură (pori, fisuri, crăpături).

După frecvența cu care sunt întâlnite, la anumite intensități, solicitările pot fi:

- **Permanente**: se aplică continuu, cu o intensitate practic constantă; de exemplu: greutatea proprie a elementelor de construcții, precomprimarea în beton, presiunea pământului etc.;
- **Temporare**: variază sensibil cu timpul sau pot chiar să lipsească, în anumite intervale de timp; de exemplu: toate încărcările utile ale elementelor de construcție (oameni, utilaje, materiale, zăpadă), variațiile de temperatură, deplasările neuniforme ale terenului de fundații etc.;
- **Excepționale**: apar foarte rar, de multe ori niciodată în viața unei construcții, cu intensități semnificative; de exemplu: cutremure, inundații, ruperea unor elemente de construcții etc.

După variația lor în timp, solicitările pot fi:

- **Statice**: când forța crește continuu și lent, de la valoarea zero la o valoare maximă, care se menține un timp determinat (fig.2.1a);
- **Dinamice**: când forța este aplicată brusc cu toată intensitatea ei, sub formă de șoc, și se menține un timp relativ scurt (fig.2.1b);
- **Ciclice**: când intensitatea forței variază periodic de la o valoare maximă la una minimă și iar la maxim: oscilant, pulsant, alternant, (fig.2.1c).

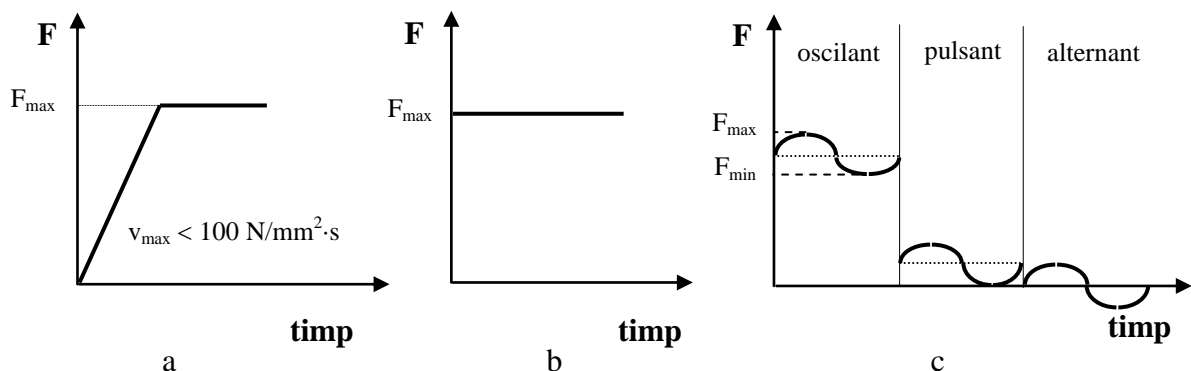


Figura 2.1. Solicitări: statică (a), dinamică (b) și ciclică (c)

După modul de acționare solicitările pot fi:

- **Concentrate**: când forța este concentrată într-un punct, pe suprafața care acționează (fig.2.2a);
- **Uniform distribuite**: când forța se distribuie uniform, pe toată suprafața pe care acționează (fig.2.2a);



Figura 2.2. Solicitări: (a) concentrate; (b) distribuite

În orice material (corp solid), sub acțiunea unei forțe exterioare, apar tensiuni interne, numite **eforturi**, ce se opun modificării formei și volumului său, iar proprietatea materialului de a suporta eforturile se numește **rezistența mecanică**.

Rezistențele teoretice ale materialelor, calculate pe baza legăturilor chimice, considerând solidul ideal, sunt mult mai mari (de 10 - 1000 ori) decât cele determinate pe solidul real deoarece, în cazul acestuia, apar defectele (vezi Chimie, &3.3.1.2).

Considerăm un corp solid asupra căruia au loc acțiunile F_A, F_B, F_C, F_D (fig 2.3). Secționând corpul se constată că forțele exterioare depind de suprafața sollicitată iar, mărimea care caracterizează intensitatea eforturilor pe unitatea de suprafață a secțiunii elementului de material sollicitat, se numește **efort unitar p** și se descompune în: **efort unitar normal (longitudinal) σ** și **efort unitar tangențial (transversal) τ** .

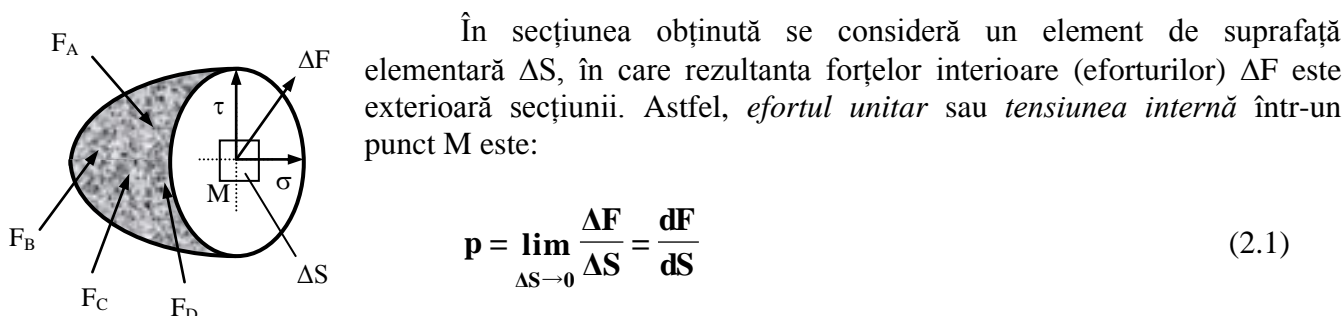


Figura 2.3. Forțe exterioare și interioare ce acționează asupra unui corp solid

La solicitările simple (tracțiune, compresiune) se consideră, în principal, efortul unitar longitudinal σ , ce poate fi determinat experimental, în fiecare moment, prin raportul dintre valoarea forței care acționează F și aria secțiunii transversale inițiale (S_0) pe care aceasta acționează.

$$\sigma(f) = \frac{F}{S_0}, \frac{N}{mm^2} \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Valorile obținute experimental pe epruvete, de forme și dimensiuni stabilite de standardele specifice diferitelor tipuri de materiale, mai depind și de starea suprafeței, de modul de încercare. De aceea, acestea trebuie respectate pentru ca rezultatele experimentale să fie comparabile.

Ca urmare a acțiunii forțelor exterioare asupra unui material, acesta poate suferi **deformații elastice** și **plastice**.

Deformația elastică este direct proporțională cu forța care a produs-o și dispare odată cu încetarea acțiunii ei deci, este reversibilă. În cadrul unei deformații elastice nu se modifică ordinea de aranjare a particulelor constitutive ci numai distanța dintre ele (a' , b') sau unghiurile dintre planele paralele (φ) (fig. 2.4a). În realitate, în corpurile solide deformațiile nu sunt perfect elastice ci sunt însoțite de **deformații plastice remanente** care rămân și după încetarea acțiunii forțelor exterioare.

Dacă se mărește efortul unitar, în corpul solid se rup legăturile chimice dintre particulele constituate, se modifică poziția acestora, iar corpul nu mai revine la forma și dimensiunile inițiale după încetarea acțiunii forței exterioare. Se spune ca acesta a suferit o **deformație plastică** (fig.2.4b).

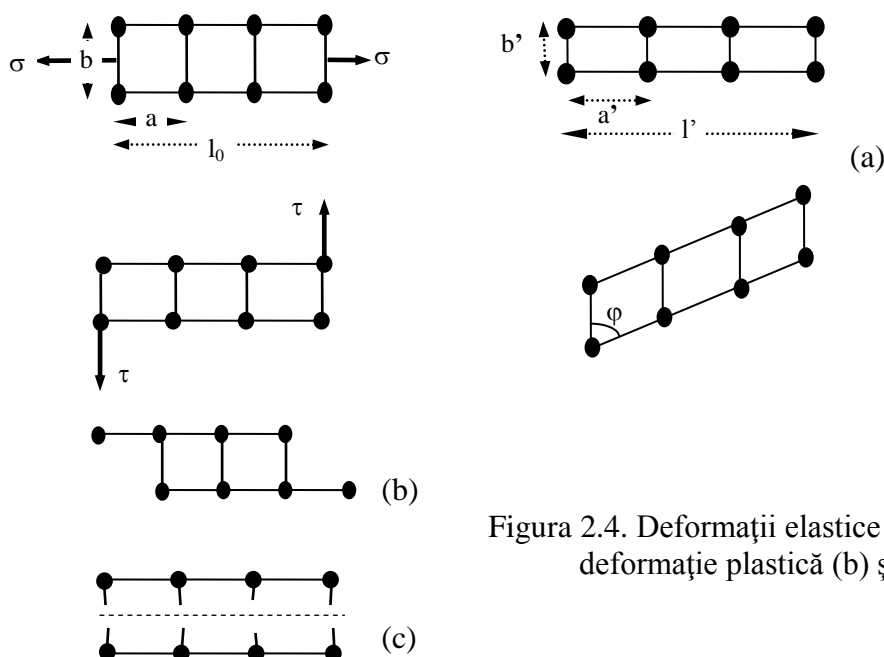


Figura 2.4. Deformații elastice longitudinale și transversale (a), deformație plastică (b) și ruperea materialului (c)

Deformațiile elastice și plastice scot în evidență următoarele proprietăți ale materialelor: elasticitatea, rigiditatea, plasticitatea, fragilitatea, tenacitatea.

Elasticitatea: proprietatea corpului solid de a-și restabili spontan forma și volumul după încetarea acțiunii forței exterioare; se măsoară prin modulul de elasticitate longitudinal E (ec. 2.3).

Rigiditatea: proprietatea corpului solid de a se opune deformațiilor elastice. Măsura rigidității este raportul E/ρ_a , unde E este modulul de elasticitate longitudinal, iar ρ_a densitatea aparentă. Este o proprietate opusă elasticității: cu cât crește (E) cu atât crește și rigiditatea (tab. 2.1).

Tabelul 2.1. Valorile raportului (E/ρ_a) și a modulului de elasticitate (E) pentru diverse materiale la temperatura ambiantă

Materialul	E/ρ_a , GJ/kg	E , GPa	Materialul	E/ρ_a , (GJ/kg)	E , GPa
Diamant	0,285	1 000	Aluminiu	0,026	70
Carbura de siliciu (SiC)	0,140	450	Beton greu	0,025-0,019	50
Fibre de carbon	0,171-0,154	300	Magneziu	0,026-0,023	40-45
Oțel	0,027	210	Lemn	0,015-0,006	7
Cupru	0,014	125	Polistiren	0,1-0,067	2
Titan	0,026	115	Polipropilenă	0,001	1,5
Alamă, bronz	0,013	110	Cauciuc natural	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$\approx 0,001$
Sticlă	0,044-0,039	70			

Plasticitatea: proprietatea materialelor deformatate de a nu mai reveni la forma inițială după încetarea acțiunii forțelor exterioare.

Fragilitatea: proprietatea materialelor de a nu permite deformații plastice până la rupere; este o proprietate opusă plasticității.

Tenacitatea: proprietatea materialelor de a rezista mai mult timp la diferite eforturi (prin acumulare de energie la deformații plastice), deformându-se mult înainte de rupere; acestea se rup după deformații plastice mari. Materialele tenace au capacitatea de a se opune multiplicării fisurilor printr-o consolidare a structurii, de exemplu, prin ecrisare (deformație plastică la rece, vezi Chimie & 3.3.1.1).

Exemple:

- ✓ Metalele cu cea mai mare tenacitate, sau cu cea mai mare rezistență la rupere, în ordine descrescătoare sunt: W, Mo, Ta, Zr, Nb, Ti, Co, Ni, Pd, Fe, Cu, Ag, Au, Al.

Deformația $\epsilon = \frac{a' - a}{a} = \frac{l' - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$, mm/m, se numește **alungire specifică liniară** (longitudinală) sau **extensie**, iar $\epsilon_t = \frac{b - b'}{b}$ se numește **contracție specifică transversală**.

În cazul deformațiilor elastice, **alungirea specifică liniară** (ϵ) este direct proporțională cu efortul unitar normal (σ) sau tensiunea și invers proporțională cu **modulul de elasticitate longitudinal** (**E**) al materialului supus încercării, conform legii lui Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{sau} \quad \frac{F}{S_0} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.3)$$

În mod asemănător, **modulul de elasticitate transversal** (**G**) este raportul dintre efortul unitar tangențial aplicat (τ) și **lunecarea specifică** (φ), dacă valoarea efortului nu depășește limita de proporționalitate, și se determină pe o epruvetă sollicitată la răsucire.

$$\tau = G \cdot \varphi \quad (2.4)$$

Exemple:

✓ Pentru un **oțel carbon** uzual la care efortul unitar mediu din exploatare este $\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$, iar $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ și $G = 0,8 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \epsilon$ de ordinul de mărime 10^{-3} adică, deformația elastică este de până la 0,001 mm/m.

✓ Pentru **aluminiiu**, la același efort unitar de exploatare $\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$, deformația elastică este de până la 0,003 mm/m, iar **fierul** are modulul de elasticitate de trei ori mai mare decât al aluminiiului.

Coeфициentul Poisson se notează cu μ și reprezintă raportul dintre contracția specifică transversală ϵ_t (contracția) și alungirea specifică liniară ϵ (alungirea) $\mu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon}$. Are valori cuprinse între 0 și 0,5 astfel: pentru oțel $\mu = 0,3$, pentru fontă $\mu = 0,27$, iar pentru beton $\mu = 0,25$.

Mărimea deformației elastice a materialelor este caracterizată cu ajutorul celor trei constante: E, G și μ , legate prin relația:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.5)$$

Variația dimensiunilor (Δl) unui material în funcție de sarcina aplicată (F), se determină cu ajutorul instrumentelor (mașinilor de încercat), fig. 2.5, prevăzute cu dispozitive de măsurare a forței aplicate și a dimensiunilor epruvetei. Deoarece efortul și alungirea depind de mărimea epruvetei (S_0 , l_0), pentru a elimina această dependență, se utilizează mărimile intensive: **efort unitar** ($\sigma = F/S_0$) și **alungire specifică sau extensie** ($\epsilon = \Delta l/l$). Astfel, se poate trasa o curbă care corelează cât mai fidel comportarea materialului la întindere (compresiune), denumită **curba caracteristică** a materialului $\sigma = f(\epsilon)$. Experimental, aceasta se obține prin încărcarea treptată, la temperatură normală, a epruvetelor de lungime l_0 și secțiune S_0 , până la distrugerea lor.



Comportarea mecanică a materialelor în timpul unei solicitări poate fi: **elastică sau elasto-plastică**.

Intr-o comportare mecanică **perfect elastică** (fig. 2.6a), la întindere (tracțiune), alungirea epruvetei materialului este direct proporțională cu efortul unitar, până în momentul ruperii. Curba caracteristică $\sigma - \epsilon$ este o dreaptă, care respectă legea lui Hooke. La rupere, care este elastică, tensiunea maximă este egală cu rezistența materialului ($\sigma_r = \sigma_{e \max}$).

Fig. 2.5. Mașină universală de încercat
Hegewald & Peschke

În realitate, deoarece nu există deformații perfect elastice, curba caracteristică nu arată o comportare mecanică perfect elastică a materialului ci, una care conține deformații elastice mici, înainte de rupere ($\epsilon_{e \max}$), și deformații plastice remanente neglijabile (fig 2.7); se întâlnește la **materialele casante** sau **fragile** (beton, fontă, oțel dur, ceramică, sticlă).

Într-o comportare mecanică **elasto – plastică** (fig. 2.6b) deformația elastică, care respectă legea lui Hooke, este urmată de o deformație plastică, caracterizată de o curbă de ecuație $\sigma = f(\epsilon^n)$. În acest caz ruperea epruvetei materialului, la tensiunea maximă σ_r , este însoțită de o deformație plastică la rupere $\epsilon_{p r}$, ce poate fi măsurată experimental.

Tensiunea σ_e , care delimitează deformațiile elastice de cele plastice, se numește **limită de curgere**, tensiunea σ_r se numește **limită la rupere**, iar deformația totală la rupere ($\epsilon_{t r}$) este dată de suma deformațiilor elastice ($\epsilon_{e r}$) și plastice ($\epsilon_{p r}$): $\epsilon_{t r} = \epsilon_{e r} + \epsilon_{p r}$ (fig. 2.6b).

Materialele care prezintă deformații plastice mari înainte de rupere se numesc **ductile**, cum ar fi: oțelurile de uz general, aluminiul, zincul, plumbul, cuprul, aurul etc. La acestea poate sau nu să se producă o consolidare a structurii (ecruisare) în timpul deformațiilor plastice; astfel, materialele ductile sunt **tenace** (fig. 2.8) sau **maleabile** (fig. 2.7).

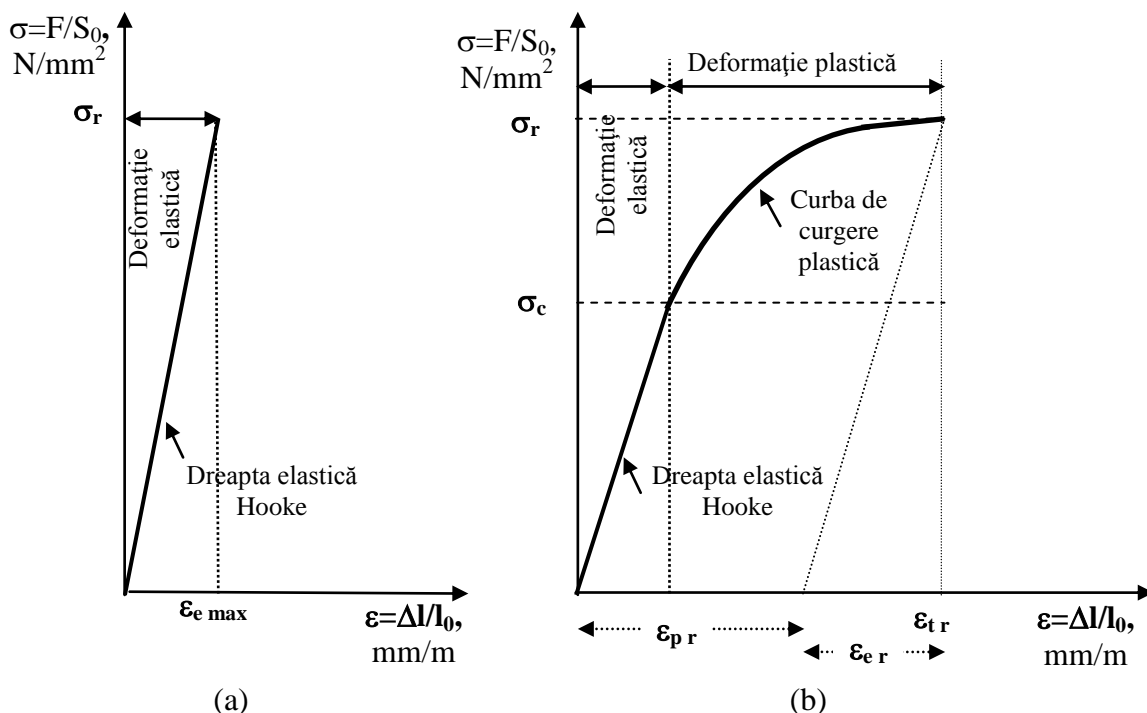


Figura 2.6. Curbe caracteristice pentru deformații perfect elastice (a) și deformații elasto – plastice (b)

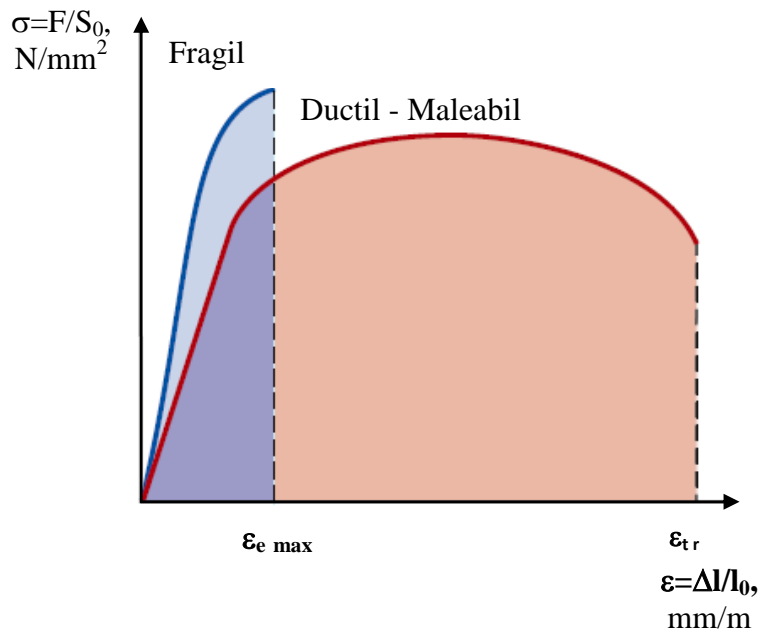


Figura 2.7. Curbe caracteristice pentru materiale fragile și maleabile

Curba caracteristică a unui oțel cu un comportament ductil-tenace, ca urmare a solicitării la tracțiune, este prezentată în fig. 2.8 și evidențiază zone și puncte care definesc cele mai importante caracteristici mecanice ale oțelului.

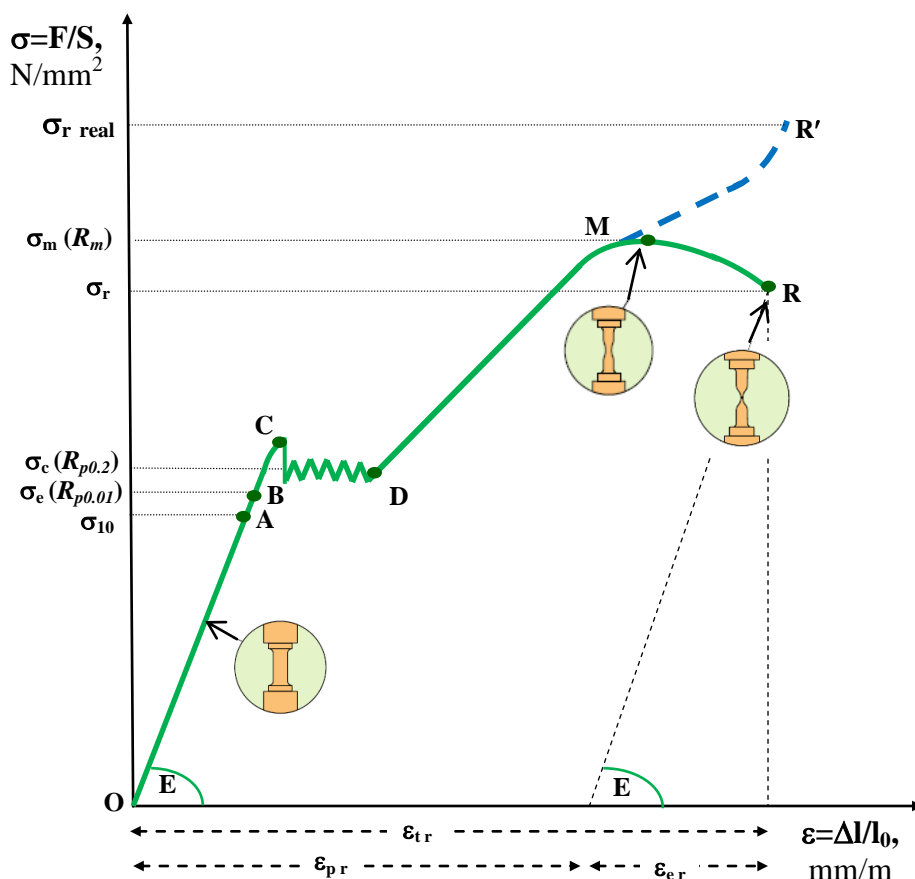


Figura 2.8. Curba caracteristică a unui oțel moale (ductil - tenace)

- Curba OABCDMR este *curba caracteristică convențională* deoarece σ este convențional; calculul acestuia s-a făcut prin raportarea valorii momentane a forței F , care acționează asupra epruvetei, la secțiunea inițială S_0 care, de fapt, în timpul solicitării se micșorează continuu până la valoarea S_f .

- Curba OABCDMR' este *curba caracteristică reală* obținută dacă, forța F s-ar raporta la valoarea momentană a secțiunii, iar Δl s-ar raporta la valoarea momentană a lungimii epruvetei. Această curbă este mai greu de obținut experimental. De aceea, în practică, se utilizează curba convențională, dar și pentru că, în calculele ingineresti, se folosesc mărimile din zona comună a celor două curbe.

- Dreapta OA evidențiază o deformare perfect elastică a oțelului, adică se respectă legea lui Hooke. A este **limita de proporționalitate** adică, limita până la care abaterea de la proporționalitate a modulului de elasticitate este sub 10%. Pentru oțeluri aceasta de notează cu σ_{10} .

- AB este zona în care materialul începe să se comporte neliniar, adică nu mai respectă legea lui Hooke însă, acesta își revine la forma inițială după încetarea acțiunii forței; punctul B reprezintă **limita de elasticitate** σ_e . În această zonă apar deformările plastice remanente care, convențional, pentru oțeluri sunt de maxim 0,01%. Din acest motiv **limita de elasticitate tehnică** se notează cu $R_{p0.01}$.

- După punctul B materialul suferă deformări plastice, iar zona CD este zona de curgere în care, alungirea crește chiar dacă efortul rămâne aproape constant (se înregistrează mici oscilații ale forței în jurul unei valori medii). În această zonă materialul își consolidează structura prin ecrisare deci, este un material tenace; tot aici se pune în evidență o limită inferioară și o limită superioară de curgere, de aceea aceasta zonă de simbolizează în zig-zag. σ_e se numește **limita de curgere aparentă**,

adică limita efortului de la care deformația plastică remanentă depășește 0,2%, și căreia îi corespunde **limita de curgere tehnică** $R_{p0.2}$

- După consolidarea structurii în zona de curgere, materialul poate prelua eforturi din ce în ce mai mari în zona DM în care se continuă ecruisarea, până la **limita maximă** σ_m , dată de punctul M, care reprezintă **rezistența la tracțiune** R_m . Astfel, materialul tenace este mai dur și de aceea prezintă mai multă siguranță în exploatare decât un material maleabil.

- Din punctul M efortul începe să scadă până în punctul R când se produce ruperea materialului paradoxal, la un efort mai mic decât poate să suporte σ_m , deoarece scăderea efortului în zona MR este legată de apariția fenomenului de gâtuire al epruvetei, adică de scăderea secțiunii transversale. Tensiunea corespunzătoare rupei se notează cu σ_r .

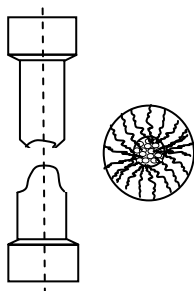
Gâtuirea sau stricțiunea la rupere, Z, a epruvetei materialului se calculează cu relația:

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

Gâtuirea este o măsură a plasticității materialului; cu cât este mai mare cu atât materialul este mai plastic, iar pentru materiale fragile $Z = 0$.

- ϵ_{tr} , ϵ_{pr} , ϵ_{er} reprezintă alungirile specifice totală, plastică și elastică ale materialului după rupere. Din punct de vedere tehnic importanță prezintă ϵ_{pr} sau $A_{pr} = 100 \cdot \epsilon_{pr}, \%$, **alungirea specifică plastică după rupere**. De obicei această mărime se notează A_5 , pentru $L_0 = 5 \cdot d_0$, sau se precizează valoarea lui L_0 ($A_{50 \text{ mm}}$, $A_{80 \text{ mm}}$) unde L_0 și d_0 sunt lungimea respectiv diametrul inițial al epruvetei materialului.

În cazul materialelor ductile tenace ruperea epruvetei se produce sub formă de **con – cupă** (fig. 2.9) deoarece, o jumătate a epruvetei se termină cu un con, iar cealaltă jumătate are o adâncitură sub formă de cupă conică.



Printr-o analiză metalografică a suprafețelor de rupere înclinate ale conului, respectiv cupei se observă că acestea au un aspect neted, mătăsos (fibros), specific pentru o **rupere ductilă**, iar în centrul lor (la vârful conului și în zona cea mai adâncă a cupei) au un aspect grăunțos (cristalin), specific pentru o **rupere fragilă** (vezi §.2.2.b2).

Figura 2.9. Ruperea con – cupă a unui material ductil

Pentru **corpurile vâscoase** (au proprietăți intermediare între corpurile solide și lichide) deformațiile plastice, pe care acestea le suportă, se numesc **deformații vâscoase** sau **deformații la curgere**. Acestea sunt diferite de cele ale corpurilor solide cristaline deoarece particulele constitutive ale corpurilor vâscoase au un grad de organizare diferit, iar deplasarea acestora se face pe direcții nelegate, prin mutarea lor dintr-o poziție de echilibru în alta.

Deformațiile vâscoase se întâlnesc la substanțele amorfe, la geluri cum ar fi: bitumuri, sticle, pământuri, polimeri și se produc, uneori, în continuarea unei deformații elastice, dacă forța exterioară crește continuu. Acestea se mai întâlnesc și la beton, numindu-se în acest caz **curgere lentă** care se dezvoltă în timp și este parțial reversibilă, după încetarea acțiunii efortului. Deformațiile la curgere pentru materialele vâscoase (fig. 2.10) sunt descrise de ecuația:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{\eta_c} (\tau - \tau_0)^n \quad (2.7)$$

unde: $\frac{dv}{dx}$ - gradientul de viteză, η_c - vâscozitatea la curgere, τ - tensiunea tangențială aplicată, τ_0 - tensiunea limită de curgere, n - coeficient ce caracterizează tipul de curgere.

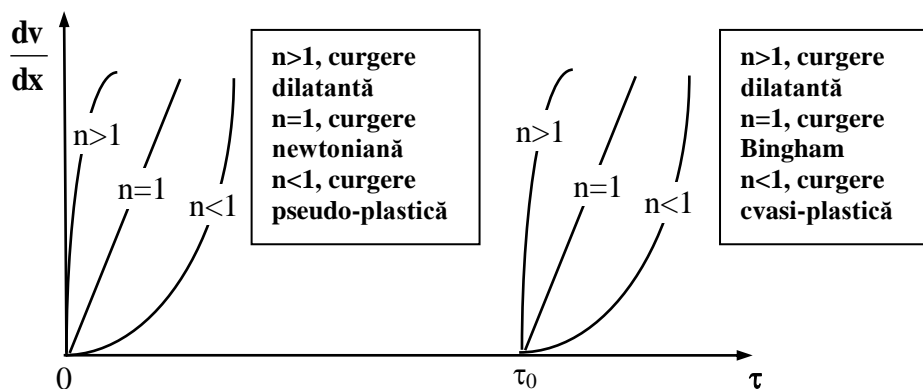


Figura 2.10. Curbe de curgere pentru materiale vâscoase

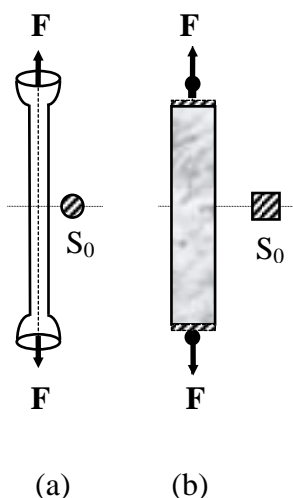
Materialele vâscoase care curg la $\tau = 0$ se numesc **lichide newtoniene**, iar cele care încep să curgă de la $\tau > \tau_0$ se numesc **corpuri Bingham**.

2.2. Proprietăți mecanice.

2.2.1. Metode distructive de încercare a materialelor. Încercări statice, dinamice și ciclice

a) Încercări statice

a1) *Rezistența la tracțiune (întindere axială) (f_t)* se determină pe epruvete de forme și dimensiuni diferite (bare cu secțiuni, circulare, pătratice, dreptunghiulare) cu ajutorul mașinilor hidraulice. Încercarea constă în acționarea, pe direcția axei longitudinale a epruvetei, cu o forță până la rupere (fig.2.11) SR EN ISO 6892-1/2010. Pentru metale, acest tip de încercare constituie un indice de calitate.

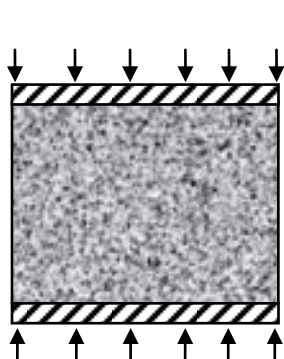


Rezistența la tracțiune se calculează cu relația de mai jos și se exprimă în N/mm^2 :

$$f_t = \frac{F_{\max}}{S_0}, \frac{N}{mm^2} (MPa) \quad (2.8)$$

Figura 2.11. Solicitarea la tracțiune pe tipuri de epruvete din (a) metal și (b) beton

a2) *Rezistența la compresiune (f_c)* se determină pe epruvete cubice sau cilindrice, prin aplicarea, până la rupere, a unei solicitări continue și uniforme, pe întreaga suprafață a epruvetei (S_0), până la rupere (fig.2.12). Se calculează ca raportul dintre forța maximă de rupere și aria secțiunii pe care acționează; se exprimă în N/mm^2 :

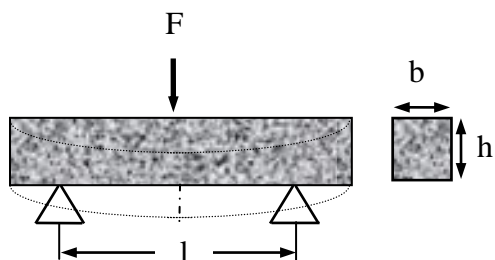


$$f_c = \frac{F_{\max}}{S_0}, \frac{N}{mm^2} \quad (2.9)$$

Pentru betonul întărit această încercare reprezintă principalul criteriu de apreciere a calității lui. Astfel, **rezistența caracteristică** reprezintă rezistența la compresiune a betonului, încercat după 28 de zile de la turnare, în condiții standardizate, pe epruvete cubice cu latura de 150 mm sau cilindrice cu diametrul de 150 mm și înălțimea de 300 mm, prin intermediul unor plăci metalice de mărime cât suprafața epruvetei SR EN 12390-3/2009

Figura 2.12. Solicitarea la compresiune

a3) *Rezistența la încovoiere statică (f_{inc})* se determină frecvent pe epruvete prismatice, cu secțiune dreptunghiulară sau pătrată, așezate pe două reazeme aflate la distanța l , pe care se acționează cu o forță, concentrată la distanța $l/2$ dintre reazeme (fig. 2.13) SR EN 12390-5/2009. Este calculată ca raportul dintre momentul încovoiător (M) și modulul de rezistență (W) al materialului, exprimat în N/mm^2 :



$$f_{inc} = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F \cdot l}{4}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}, \frac{N}{mm^2} \quad (2.10)$$

Figura 2.13. Solicitarea la încovoiere statică

Rezistența la încovoiere statică reprezintă un indice de calitate și de clasificare a betoanelor rutiere (BcR 3,5; BcR 4,0; BcR 4,5; BcR 5,0 unde BcR - beton de clasă rutieră, iar cifrele 3,5; 4,0; 4,5 și 5,0 - rezistențele caracteristice la încovoiere, în MPa).

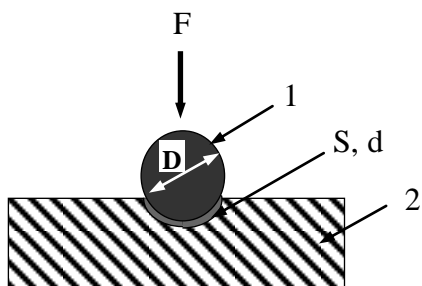
Cu ajutorul relației empirice dintre rezistența la tracțiune a betonului și cea de încovoiere statică se poate calcula rezistența la tracțiune din efort de încovoiere:

$$f_{tinc} = 0,59 \cdot f_{inc} = \frac{3,5}{4} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} = 0,875 \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}, \frac{N}{mm^2} \quad (2.11)$$

a4) *Duritatea (H)*, reprezintă proprietatea materialelor de a se opune pătrunderii în masa lor a unui corp dur și nedeformabil. Corpul dur poate avea forme geometrice variate: piramidă din diamant, con/sferă din diamant, bilă din oțel sau carbură de wolfram. Din acest motiv și metodele de determinare a durității se numesc diferit: Vickers, Rockwell, Brinell.

Metoda Brinell

Determinare durității constă în aplicarea unei bile din oțel dur (1), cu masă și diametru (D) standardizate pe suprafața orizontală și polizată a unei epruvete (2), și acționarea asupra acesteia cu o anumită forță (F) și un timp, stabiliți de standard SR EN ISO 6506-1/2006 (fig. 2.14) (vezi Materiale de Instalații - Lucrări de laborator, Lucrarea nr.6).



Ca urmare a acțiunii forței F, bila va pătrunde în epruveta de încercat și va lăsa o amprentă, sub forma unei calote sferice, cu suprafața (S) și diametrul mediu (d).

Figura 2.14. Reprezentarea schematică a determinării durității Brinell

Duritatea Brinell, HB, se calculează ca raportul dintre forța (F) și aria amprente (S). Se exprimă în daN/mm² sau în unități Brinell (convențional, 1 unitate Brinell ≈ 1 daN/mm²):

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \quad (2.12)$$

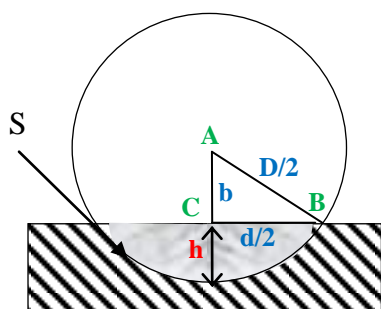
Exercițiu:

- ✓ Să se demonstreze relația de calcul a durității Brinell 2.12. pornind de la definiția acesteia:

$$HB = \frac{F}{S}, \text{ daN/mm}^2.$$

✓ Rezolvare:

Considerăm amprenta lăsată de bilă, pe suprafața epruvetei, ca în figura de mai jos:



În triunghiul dreptunghic ABC se aplică teorema lui Pitagora, știind că: AB = D/2, BC = d/2, iar AC se notează cu b.

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = b^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow b = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$$

În figură s-a notat cu **h** adâncimea de pătrundere a bilei în epruveta de încercat, care se calculează astfel: **h** = D/2 - b.

$$\text{Adică, } h = \left(\frac{D}{2} - b\right) = \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}\right), \text{ iar suprafața amprente calotei sferice } S = \pi \cdot D \cdot h.$$

$$\text{Astfel, } S = \pi \cdot D \cdot h = \pi \cdot D \cdot \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right) = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Înlocuind în relația de calcul a durității Brinell se obține:

$$\text{HB} = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \text{ (unități Brinell)}$$

Atunci când corpul dur este o bilă din oțel, duritatea este notată HBS (H - Hardness, B - Brinell, S - Steel) sau, mai scurt, HB. Pentru materialele metalice foarte dure, se utilizează o bilă din carbură de wolfram, iar duritatea se notează HBW.

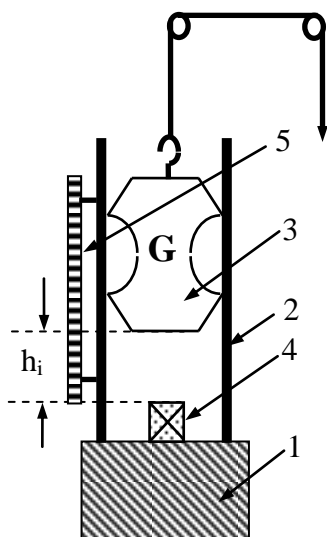
Pentru ca amprenta lăsată de corpul dur, pe materialul de încercat, să fie măsurabilă se alege forța (F) de încercare dintr-o serie standard de 1, 2, 5, ..., 62,5...187,5.....3000 kgf (daN), diametrul bilei (D) de 1, 2,5, 5 și 10 mm și timpul de menținere al forței de încercare de 10-30 secunde. Aceste 3 mărimi se vor preciza în notație.

Exemple:

- ✓ **350 HB 2,5/62,5/20** - reprezintă duritatea Brinell de 350 daN/mm², utilizând o bilă de oțel dur cu diametrul de 2,5 mm, cu o forță de încercat de 62,5 daN timp de 20 secunde.
- ✓ Simplificat se mai notează astfel: **HB 2,5/62,5/20 = 350**.
- ✓ Cea mai mare duritate ce se poate determina prin metoda Brinell este de **650 HBW**.

b) Încercări dinamice

b1) *Rezistența la compresiune prin șoc ($f_{c \text{ șoc}}$)* se determină pe epruvete cubice, cilindrice și constă din supunerea acestora la acțiunea distructivă a unei greutăți G, ce cade de la diverse înălțimi h, cunoscute.



Dispozitivul utilizat pentru determinarea rezistenței la compresiune prin șoc este alcătuit dintr-o nicovală (1) pe care sunt fixate două tije (2), între care poate glisa o greutatea G (3), ce cade peste epruveta (4), de la diverse înălțimi h_1, h_2, \dots, h_n citite la rigla gradată (5), până la distrugerea epruvetei (fig. 2.15).

Se exprimă prin raportul dintre lucrul mecanic L, consumat la distrugerea epruvetei, și volumul acesteia V.

$$f_{c \text{ șoc}} = \frac{L}{V} = \frac{G \cdot (h_1 + h_2 + \dots + h_n)}{V} = \frac{G \cdot \sum_{i=1}^n h_i}{V} \quad (2.13)$$

Figura 2.15. Dispozitiv pentru determinarea rezistenței la compresiune prin șoc

b2) Rezistența la încovoiere prin șoc (reziliența) (KU , KV) se determină pe epruvete prismatice, de dimensiuni standardizate, prevăzută la mijloc cu o creștătură în U sau în V (fig. 2.16) cu ajutorul unui aparat a cărui piesă principală este un ciocan pendul Charpy (fig. 2.17). Determinarea constă în ruperea epruvetei așezate pe două reazeme (fig. 2.18a), dintr-o singură lovitură, în dreptul creștăturii cu ajutorul ciocanului. Se exprimă prin energia absorbită, în Jouli, de epruvetă, la ruperea din încovoiere prin șoc, adică reziliența, notată cu K (kerbschlagfestigkeit) SR EN ISO 148-1/2011.

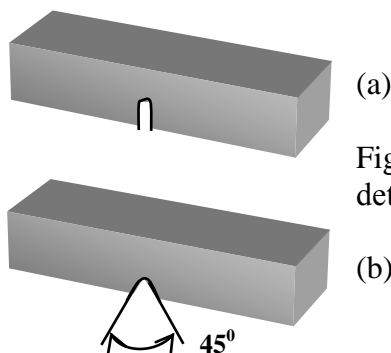


Figura 2.16. Epruvete cu creștătură în U (a) și în V (b) pentru determinarea rezilienței



Figura 2.17. Ciocanul pendul Charpy

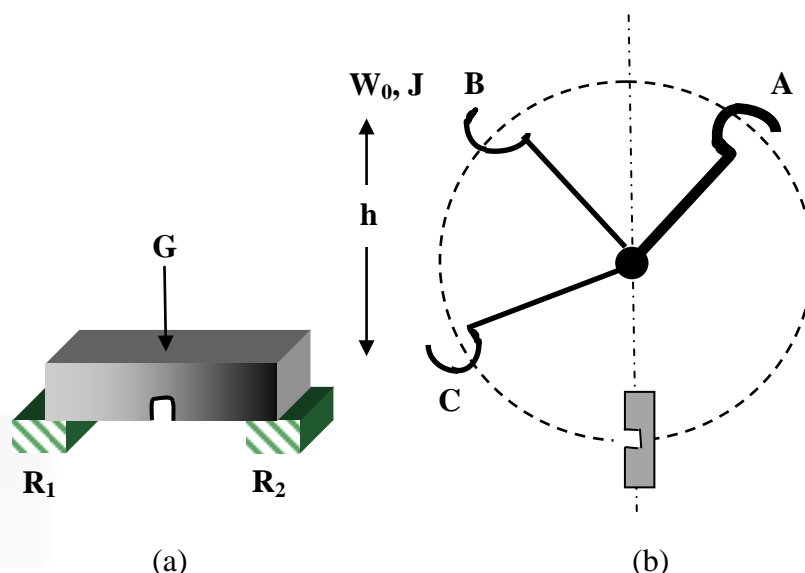


Figura 2.18. Poziționarea epruvetei pe cele două reazeme R_1 și R_2 (a) și în dreptul ciocanului pendul Charpy (b)

Dacă ciocanul este lăsat să cadă liber din poziția A, în absența epruvetei, acesta va ajunge în poziția B. Atunci când se așează epruveta pe cele două reazeme R_1 , R_2 , perpendicular pe planul de rotire al ciocanului astfel încât ciocanul să izbească epruveta în dreptul creștăturii, acesta, în cădere liberă, o va rupe, dintr-o singură lovitură și va ajunge în poziția C (fig. 2.18b). Diferența de înălțime h , dintre cele două poziții B și C ale ciocanului, după ruperea epruvetei, este o măsură a energiei consumate (absorbită de epruvetă) și este utilizată în calculul acesteia: $G \cdot h$, unde G este greutatea ciocanului. Valoarea acestei energii se citește pe o scală alăturată a aparatului și se notează astfel:

$$KU \text{ } W_0/l = G \cdot h, J \quad (2.14)$$

unde: W_0 este energia potențială a ciocanului, în J, și l lățimea epruvetei, în mm.

Ciocanul poate avea energii potențiale disponibile (nominale, W_0) variate: de 300, 150 și 100 Jouli, de aceea, la încercare, se alege un ciocan capabil să rupă epruveta dintr-o singură lovitură. Ruperea este influențată de prezența microfisurilor, a porilor, a defectelor, a macrofisurilor rezultate din defecte de fabricație etc.

Rezultatele încercării la încovoiere din șoc, obținute pe epruvete cu creștătură în U sau V, oferă informații diferite astfel: încercarea pe epruvete cu creștătura în V arată capacitatea materialului de a se opune propagării fisurii, iar încercarea pe epruvete cu creștătură în U arată capacitatea materialului de a se opune inițierii și propagării fisurii.

Scopul acestei încercări este de a determina comportarea materialului la rupere sub efectul simultan al unei viteze mari de solicitare și al prezenței concentratorilor de tensiuni, la diferite temperaturi. Încercarea este una dintre cele mai severe, iar rezultatele obținute se referă atât la tenacitatea cât și la rezistența materialului și reprezintă un indice de calitate obligatoriu, mai ales, pentru un *material metalic exploatat la temperatură scăzută*.

Cu cât reziliența este mai mare cu atât metalul este mai plastic (ductil-tenace), iar dacă metalul este fragil acesta are reziliență mică.

Încercarea de reziliență este și o măsură a **fragilității** metalelor, de aceea se determină, mai ales, la temperaturi scăzute. Cu cât temperatura este mai mică cu atât metalul își pierde din plasticitate (tenacitate) și devine mai fragil, caracteristică măsurată prin scăderea rezilienței.

Importanță prezintă și aspectul microscopic al secțiunii de rupere a epruvetei, încercată la încovoiere prin șoc, prin evidențierea a două zone distincte (fig. 2.19) însoțite de două mărimi specifice: **cristalinitatea** și **fibrozitatea**.

- Zona 1, centrală, cu aspect cristalin, grăunțos și strălucitor, datorată ruperii de tip fragil, se caracterizată prin **cristalinitate**, notată prescurtat C_r , și se calculează ca raportul dintre aria suprafeței de rupere cu aspect cristalin, strălucitor, S_c , și aria secțiunii epruvetei, S_0 : $C_r = \frac{S_c}{S_0} \cdot 100$;

- Zona 2, cu aspect fibros, mat, datorată deformațiilor prealabile ruperii, consecință a ruperii plastice, se caracterizează prin **fibrozitate**, notată prescurtat F_b , și se calculează ca raportul dintre aria suprafeței de rupere cu aspect mat, fibros, S_f , și aria secțiunii epruvetei, S_0 : $F_b = \frac{S_f}{S_0} \cdot 100$.

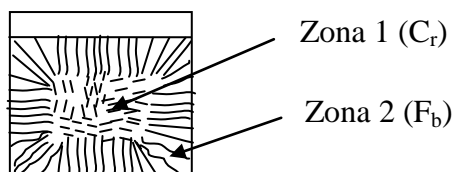


Figura 2.19. Zone de cristalinitate (C_r) și fibrozitate (F_b) ale suprafeței rupturii la încercarea de reziliență

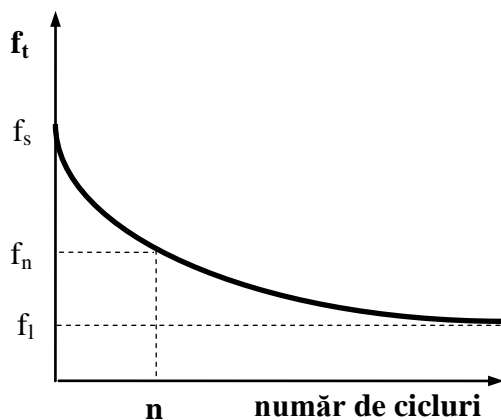
Odată cu scăderea temperaturii încercării se constată că pe suprafața rupturii zona de cristalinitate crește (fragilitatea crește), iar zona de fibrozitate scade (ductilitatea scade). Astfel cu ajutorul rezilienței se poate determina temperatura de tranziție de la ruperea ductilă la ruperea fragilă.

c) Încercări ciclice

c1) Rezistența la oboseală

Rezistența la oboseală este dată de capacitatea unui material de a rezista la solicitări ciclice repetate (fig. 2.1c) fără ca valoarea eforturilor să depășească limita de elasticitate, adică la eforturi mici

dar numeroase. În material au loc modificări structurale lente și continui, iar ruperea se numește rupere la oboseală; nu este precedată de o deformare plastică vizibilă, ci de apariția, în material, de fisuri microscopice.



Rezistența la oboseală se determină cu ajutorul mașinilor pulsatoare care produc vibrații de amplitudini și frecvențe reglabile, iar rezultatele se înscriu sub forma diagramei Wöhler (fig. 2.20).

Se exprimă fie prin numărul de cicluri n , care micșorează rezistența la rupere f_t , de la f_s (rezultată din încercare statică) la o anumită valoare impusă f_n , fie prin efortul unitar limită f_l , (limita de duranță) sub a cărei valoare, oricâte cicluri s-ar aplica, materialul nu se distruge.

Figura 2.20. Diagrama Wöhler

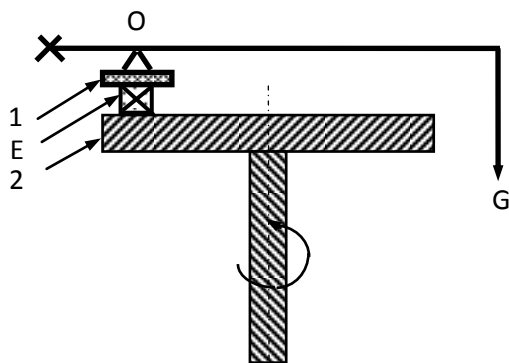
Toate materialele din componența construcțiilor sunt supuse la solicitări ciclice dar, în mod special, cele din alcătuirea drumurilor, podurilor, pistelor de aeroporturi, barajelor supuse la încărcări diferite de trafic sau supuse la parametri meteorologici ca vânt, valuri etc.

Materialele feroase supuse la încercări ciclice pot suporta un număr de $10^6 - 10^7$ cicluri, iar cele neferoase $10^7 - 10^8$ cicluri.

c2) Rezistența la uzură este diferită de celelalte tipuri de rezistențe, deoarece încercarea pentru determinarea acesteia duce la distrugerea epruvetei numai în straturile superficiale.

Rezistența la uzură este proprietatea materialelor de a se opune pierderilor de masă, ce au loc sub acțiunea unor forțe de frecare. Încercarea se execută pe epruvete prismatice, cubice, cilindrice sau sub formă de plăci.

Epruveta E, este fixată în dispozitivul (1), care o presează pe discul (2), prin greutatea G (fig.2.21), iar uzura se produce în urma frecării dintre disc și epruvetă, după un număr standardizat de rotații, folosindu-se ca material abraziv nisipul silicios.



Se exprimă prin pierderea de masă ΔM a epruvetei, raportată la suprafața S_0 supusă uzurii:

$$f_u = \frac{\Delta M}{S_0} = \frac{M_0 - M_u}{S_0}, \text{ kg/m}^2 \quad (2.15)$$

unde: M_0 - masa inițială a epruvetei, în kg; M_u - masa epruvetei după uzură, în kg; S_0 - suprafața epruvetei șlefuite, în m^2 .

Figura 2.21. Dispozitiv pentru determinarea rezistenței la uzură



Bibliografie



1. Maria Popescu, *Materiale de Construcții*, Institutul de Construcții București, 1990.
2. Maria Gheorghe, *Materiale de Construcție, Vol. 1 și 2*, Editura Conspress, București, 2010, 2011, ISBN 978-973-100-107-4.
3. Liliana Crăciunescu, Eugenia Popa, *Materiale de Construcție*, Editura Matrix Rom, București, 2004, ISBN 973-685-787-5.
4. William D. Callister, David G. Rethwisch, *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An integrated approach*, 4th edition, John Wiley and Sons Inc, 2012, ISBN 1118061608, 9781118061602.





Test de autoevaluare – MODULUL 2

Completați spațiile libere:

1. După variația lor în timp, solicitările pot fi:.....
2. Elasticitatea reprezintă proprietatea corpului solid de a-și restabilidupă încetarea acțiunii forței exterioare; se măsoară prin
3. Plasticitatea reprezintă proprietatea materialelor deformată de..... după încetarea acțiunii forțelor exterioare.
4. Materialele care prezintă înainte de rupere se numesc ductile, iar cele carese numesc fragile

Bifați căsuța corespunzătoare:

5. Comportarea mecanică a materialelor în timpul unei solicitări poate fi: elastică sau elasto - plastică.
Adevărat ☐ Fals ☐
6. Încercările mecanice distructive statice ale materialelor sunt exprimate prin rezistența la tracțiune (f_t), rezistența la compresiune (f_c), rezistența la încovoiere statică (f_{inc}) și duritatea (H).
Adevărat ☐ Fals ☐
7. Cu cât reziliența este mai mică cu atât metalul este mai plastic (ductil-tenace), iar dacă metalul este fragil acesta are reziliență mare.
Adevărat ☐ Fals ☐

8. Explicați mărimile care intervin în notația rezistenței la încovoiere din șoc (reziliența):

$KU W_0/l = G \cdot h, J$

KU -

W_0 -

L -

G -

h -

J -





Răspunsuri

1. Statice, dinamice și ciclice (pagina 2)
2. Spontan forma și volumul, modulul de elasticitate longitudinal E (pagina 4)
3. A nu mai reveni la forma inițială (pagina 4)
4. Deformații plastice mari, au deformații elastice mici (pagina 6)
5. Adevărat (pagina 6)
6. Adevărat (paginile 10, 11)
7. Fals (pagina 15)
8. KU – reziliența pe o epruvetă cu creștătură în U; (paginile 14, 15)

W_0 – energia potențială (nominală) a ciocanului pendul Charpy, în J;

l – lățimea epruvetei, în mm;

G – greutatea ciocanului, în N;

h - diferența de înălțime, dintre cele două poziții B și C ale ciocanului, după ruperea epruvetei, în m;

J - Jouli.

