

Histerezisul mecanic la materiale cu anizotropie naturală

Gheorghe FRUNZĂ

1. Introducere

Din punct de vedere biomecanic lemnul poate fi considerat un material compozit, cu *anizotropie naturală* cu proprietatea ca în stare biologică se poate adapta la diferite stări fiziologice de solicitare. Fizic, lemnul este un material sensibil la variațiile de umiditate și temperatură, (Curtu și Roșca, 1993).

Comportarea mecanică a elementelor din lemn depinde de orientarea fibrelor respectiv de orientarea tensiunilor normale principale. Dependența direcțională de acest comportament mecanic poate fi caracterizată de trei direcții principale, care sunt ortogonale una pe cealaltă. Acesta este cel mai simplu caz de anizotropie, cunoscut sub denumirea de ortotropie ortogonală. Fizic, un astfel model nu redă cu precizie descrierea comportamentului mecanic al lemnului, (Ranta 1993).

Actual, multe cercetări sunt dirijate spre studiul comportamentului lemnului, ținând seama de interacțiunea cu diverse fenomene precum cele cauzate de acțiunile chimice și termice.

Cercetările privind solicitările complexe ale lemnului și răspunsul în deformație cu luarea în considerare a diverșilor factori sunt subiecte încă nerezolvate.

Pentru a reduce costurile dezvoltării și proiectării de tipuri noi de structuri din lemn sunt necesare simulări numerice pe modele privind comportamentul mecanic al acestora. Astfel de modele trebuie să fie bazate și pe informații experimentale.

Analiza configurație buclei de histerezis funcție de numărul de cicluri de solicitare la tensiuni variabile impuse, pentru diverse esențe de lemn reprezintă obiectivul principal al prezentei lucrări.

2. Fenomenul de histerezis

Este cunoscut că amortizarea de material, numită uneori și frecare internă, sau simplu histerezis, se referă la disiparea de energie în volumul unui mediu macro-continuu. Ca urmare, amortizarea de material este asociată cu disiparea de energie care are loc când un volum de material, mai mult sau mai puțin omogen, este supus unor tensiuni ciclice impuse, iar mecanismul amortizării este asociat cu microstructura și macrostructura materialului.

Pentru a înțelege fenomenologia amortizării este necesar să se prezinte tipurile de comportări neelastice care pot să apară în practică. Prin neelasticitate se înțelege orice deviație de la elasticitatea perfect liniară, indiferent de natura ei. În general se pot întâlni patru tipuri de comportări neelastice precum cele dependente

de viteză și independente de viteză, fiecare dintre acestea două pot conține deformații reversibile și ireversibile, (Diaconescu et al, 1997).

Materialele ideal elastice au o caracteristică tensiune-deformație perfect liniară, Figura 1a. Ca urmare, atunci când sunt supuse la o tensiune ciclică variabilă, rezultă o deformație specifică de asemenea ciclică variabilă și sinfazică cu tensiunea. Neelasticitatea este totdeauna prezentă la toate tipurile de încărcare, deși de multe ori sunt necesare măsurători extrem de precise pentru a o detecta. Ca efect al neelasticității deformația specifică ciclică produsă de o tensiune ciclică impusă se defazează, iar locul geometric al punctului reprezentativ în coordonate tensiune-deformație ($\rho - \delta$) devine o buclă închisă numită buclă de histerezis, în coordonate $\rho - \delta$ (ρ -tensiune = $\{\sigma, \tau\}$; δ -deformație = $\{\varepsilon, \gamma\}$), Figura 1b.

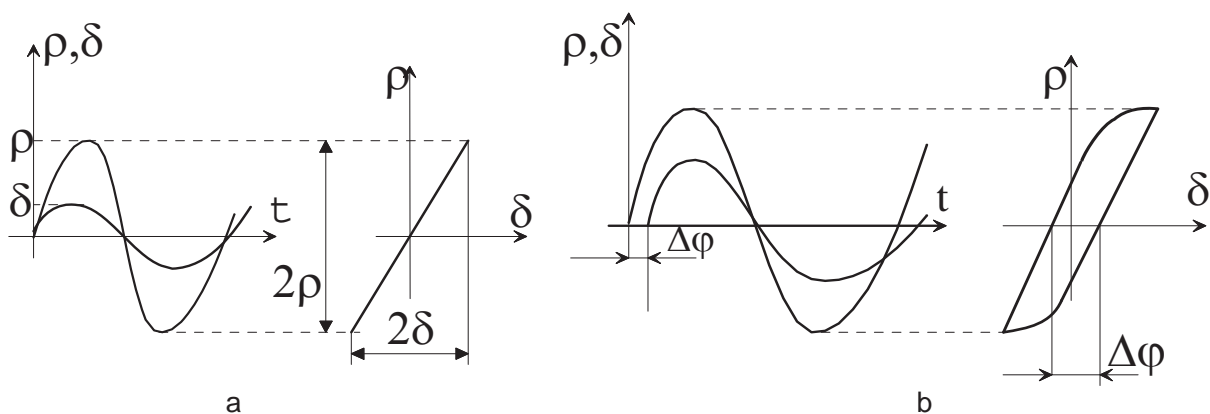


Figura 1. Fenomenul de histerezis
Figure 1. Hysteresis history

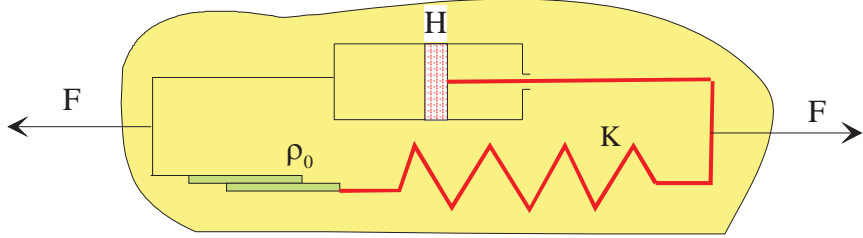
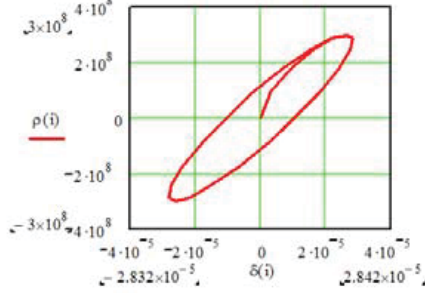
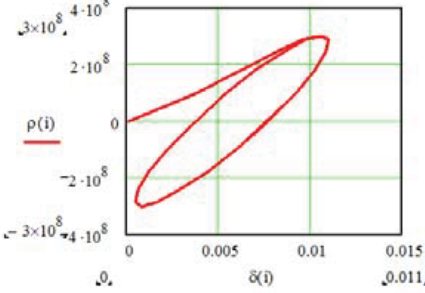
Deoarece materialele absorb energie la sarcină ciclică, curba de descărcare este totdeauna situată sub cea de încărcare, configurația buclei de histerezis depinzând de tipul de neelasticitate manifestat. Aria închisă de bucla de histerezis reprezintă totdeauna energia disipată în material la un ciclu de încărcare-descărcare. Teoretic histerezisul poate fi obținut dacă se acceptă un model reologic, precum cel Tabelul 1 atunci când tensiunea dinamică este impusă și se urmărește răspunsul în deformație,

$$\begin{aligned}\rho(t) &= A \sin(\omega t); \\ \delta(t) &= A \sin(\omega t + \varphi),\end{aligned}\tag{1}$$

unde φ reprezintă defazajul dintre tensiune și deformație.

Bucula de histerezis se obține prin reprezentarea celor două funcții armonice $\rho(t)$, $\delta(t)$, definite prin ecuațiile 1. Rezultatul numeric obținut prin combinarea celor două funcții armonice este de forma $f(\rho, \delta) = 0$, (Frunză, 2005). Evidențele numerice pentru solicitări în domeniul elastic și plastic sunt prezentate tot în Tabelul 1.

Tabelul 1. Model reologic
Table 1. Rheological model

Specificație	Figuri și ecuații
Model vâsco-elasto-plastic	
Ecuația diferențială	$\rho + \rho_0 = K \delta + H \dot{\delta}$
Tensiune variabilă ciclic	$\rho(t) = \rho_0 \sin(\omega t)$
Răspunsul în deformație	$\delta(t) = \frac{\rho_0}{K(1 + \omega^2 t_r^2)} \left[\sin(\omega t) - t_r \omega \cos(\omega t) + \omega t_r \exp\left(-\frac{t}{t_r}\right) \right],$ <p>dacă $\rho < \rho_0$.</p> $\delta(t) = \frac{\rho_0}{H(1 + \omega^2 t_r^2)} \left[\sin(\omega t) - t_r \omega \cos(\omega t) \right] + \frac{\rho_0}{K} \left(\frac{\omega t_r}{1 + \omega^2 t_r^2} \right) \exp\left(-\frac{t}{t_r}\right),$ <p>dacă $\rho > \rho_0$.</p>
Histerezis obținut numeric, prin aplicația Mathcad	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="448 1133 874 1424">  <p style="text-align: center;">Histerezis elastic</p> </div> <div data-bbox="951 1133 1377 1424">  <p style="text-align: center;">Histerezis plastic</p> </div> </div>

3. Bază experimentală

Configurația reală a buclei de histerezis s-a obținut pe un echipament experimental, special conceput și realizat în Laboratorul de Biomecanică al Universității din Suceava. Detalii privind baza experimentală pot fi găsite în lucrarea, (Frunza și Diaconescu, 1997).

Experimentele s-au efectuat pe epruvete confecționate din patru tipuri de esențe lemnoase precum fag, brad, paltin și carpen, fără defecte și uscate foarte bine la temperatura camerei. Aceste epruvete au fost supuse unor teste, efectuate în condiții dinamice prin inducerea solicitării de torsiune, astfel:

- cu amplitudine constantă și frecvență variabilă;
- cu frecvență constantă și amplitudine variabilă.

Solicitarea de torsiune a epruvetei din lemn, s-a realizat cu ajutorul unui excitator electrodinamic, comandat de un echipament electronic evidențiat în fotografiile din Figura 2.



Figura 2. Baza experimentală

Figure 2. Experimental basis

În prima situație amplitudinea a fost fixată la o valoare constantă, astfel încât epruveta să fie solicitată în domeniul elastic și s-a variat frecvența în sens crescător și descrescător, în intervalul 1-20 Hz, la diferite cicluri de solicitare. În cea de a doua situație frecvența a fost fixată la valoarea de 5 Hz, amplitudinea fiind modificată crescător cu o unitate de scară, de la valoarea cea mai mică până la o valoare maximă posibilă și apoi descrescută prin revenire la valoarea inițială. O parte din rezultatele obținute în condițiile precizate mai sus sunt evidențiate în Tabele 2, 3, 4, 5, 6, 7 și 8. În toate situațiile înregistrarea datelor s-a efectuat după un anumit număr de cicluri de solicitare, menționate în tabele.

4. Rezultate experimentale și concluzii

Rezultatele experimentale obținute și prezentate în prezenta lucrare reflectă influența unei solicitări de frecvență variabilă, comparată cu influența solicitării în amplitudine variabilă, asupra buclei de histerezis. Este clar evidențiat variația histerezisului, în cazul modificării parametrilor testului la diferite cicluri de solicitare. Aceasta demonstrează faptul că variația în timp a solicitării la care este supusă o epruvetă de lemn cauzează modificarea buclei de histerezis. Ca urmare, bucla de histerezis poate da informații asupra comportamentului mecanic.


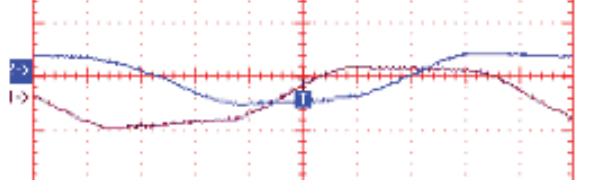
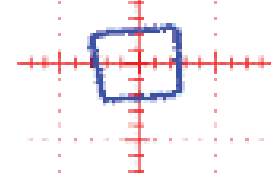
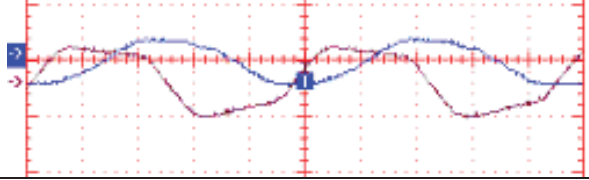
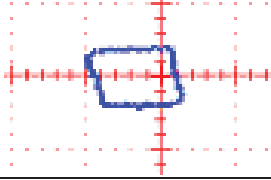
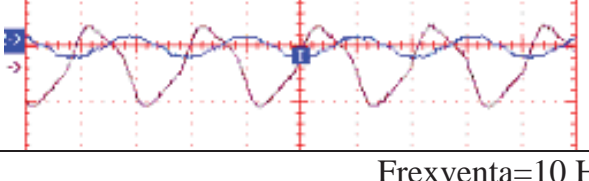
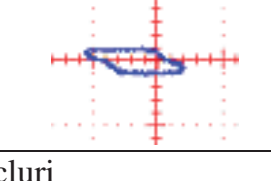
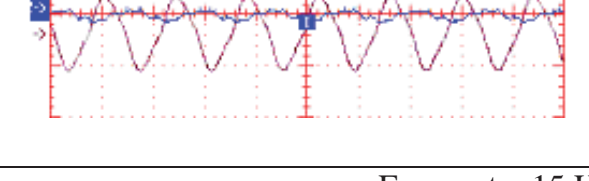
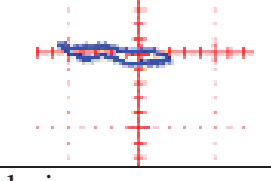
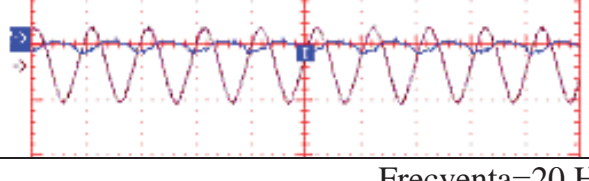
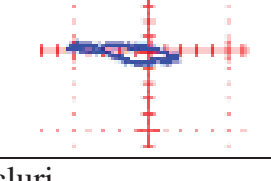
Histerezisul mecanic al lemnului suferă modificări evidente funcție de numărul de cicluri de solicitare. O configurație deosebită s-a obținut în cazul când epruvetele a fost supus solicitării de torsiune - prin tensiuni tangențiale, cu amplitudine variabilă și frecvență constantă, tabelele 3, 5, 6 și 7.

În cazul solicitării cu frecvență variabilă și amplitudine constantă s-a obținut modificări mai puțin spectaculoase ale curbei de histerezis, dar și în acest caz acestea diferă unele față de altele prin mărimea buclei, fapt evidențiat în tabelele 2, 4 și 8. Lemnul fiind o structură compact-complexă histerezisul mecanic este


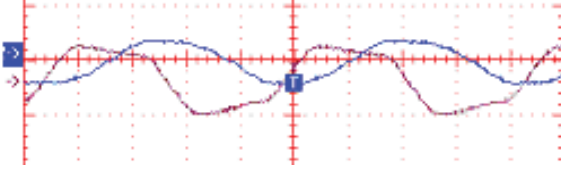
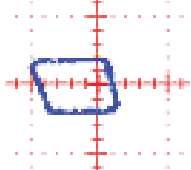
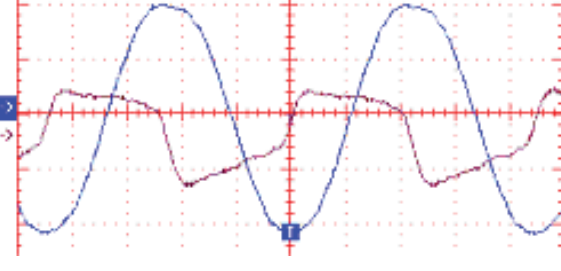
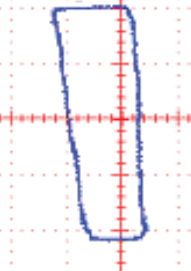
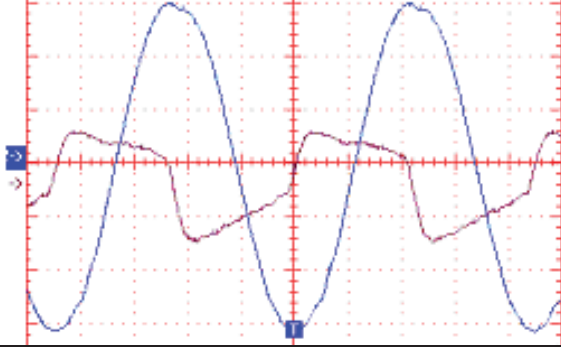
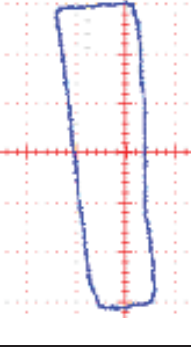
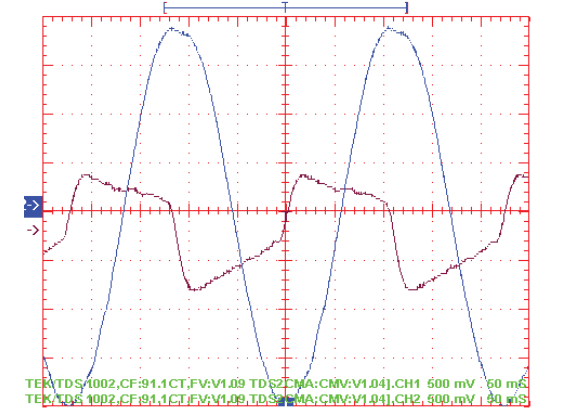
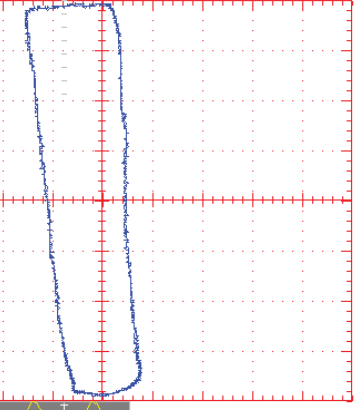
influențat și de tipul esenței, modul de solicitare, anizotropia, frecvența și amplitudinea solicitării, ș.a. Parametrii care trebuie luați în considerare la astfel de materialele sunt cei biologici, de mediu, fiziologici, mecanici și structurali.

Ca urmare, se pune problema să se găsească un model pentru lemn care să ia în considerare relațiile tensiune-deformație, cuplate cu proprietățile mecanice, termice și conținutul de umiditate.


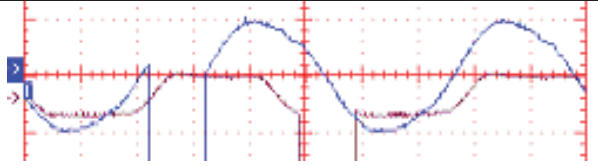
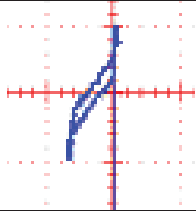
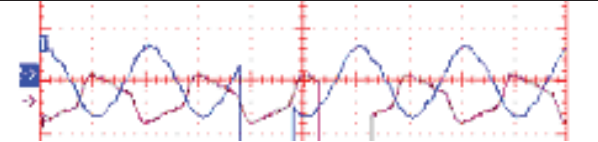
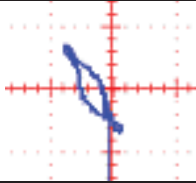
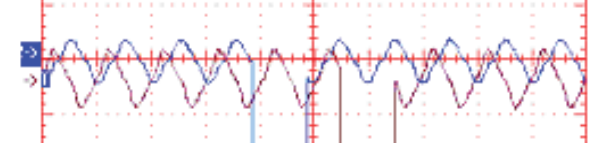
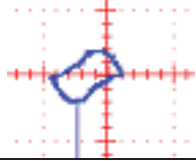
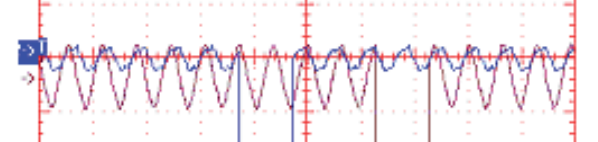
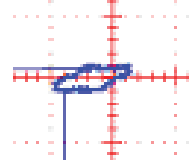
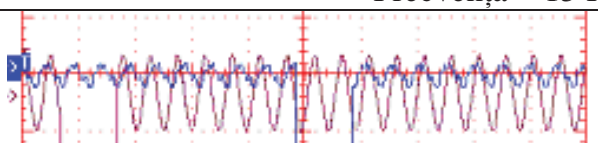
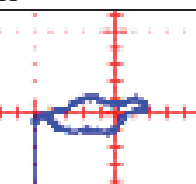
Tabelul 2. Configurația histerezisului la amplitudine constantă și frecvență variabilă
Table 2. Hysteresis variation for constant amplitude and increasing frequency

<i>Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație</i>	<i>Configurația histerezisului pentru epruveta din brad</i>
 <p data-bbox="683 882 906 913">Forma epruvetei</p>	
	
<p data-bbox="580 1113 1011 1144">Frecvența=2 Hz și 1420 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="580 1337 1011 1368">Frecvența=5 Hz și 2160 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="580 1568 1011 1599">Frecvența=10 Hz și 3230 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="580 1798 1011 1830">Frecvența=15 Hz și 4320 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="580 2029 1011 2060">Frecvența=20 Hz și 6000 cicluri</p>	

Tabelul 3. Forma histerezisului la frecvență constantă (5 Hz) și amplitudine variabilă
Table 3. Hysteresis variation for increasing amplitude and constant frequency, 5 Hz

Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație	Configurația histerezisului pentru epruveta din lemn de brad
 <p>Forma epruvetei</p>	
	
Amplitudinea =1a și 7570 cicluri	
	
Amplitudinea =2a și 8180 cicluri	
	
Amplitudinea =3a și 8510 cicluri	
 <p>TEK TDS1002, CF:91.1 CT, FV:V1.09 TD S2 CMA:CMV:V1.04j, CH1 500 mV, 50 ns TEK TDS 1002, CF:91.1 CT, FV:V1.09, TD S2 CMA:CMV:V1.04j, CH2 500 mV, 50 ns</p>	 <p>Y: 500 mV, X: 500 mV</p>
Amplitudine = 4a și 9010 cicluri	

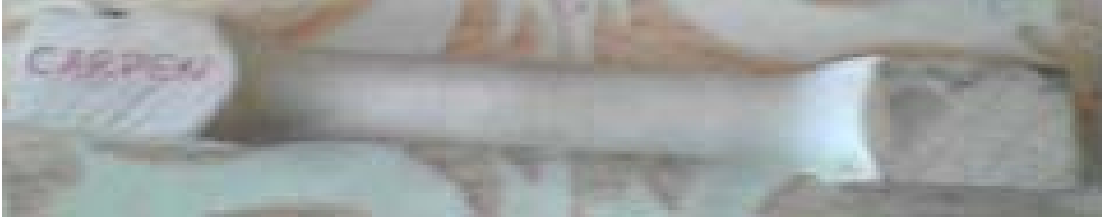
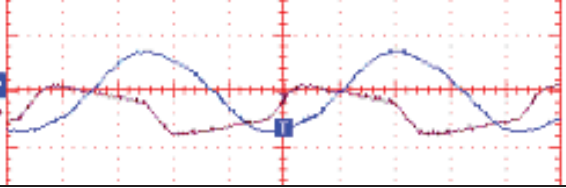
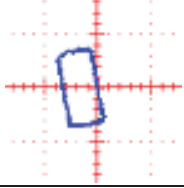
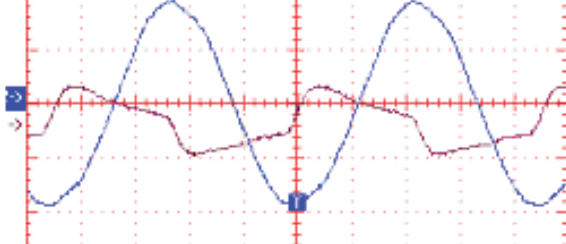
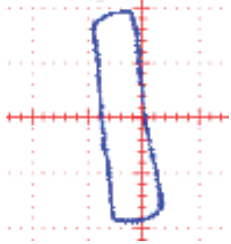
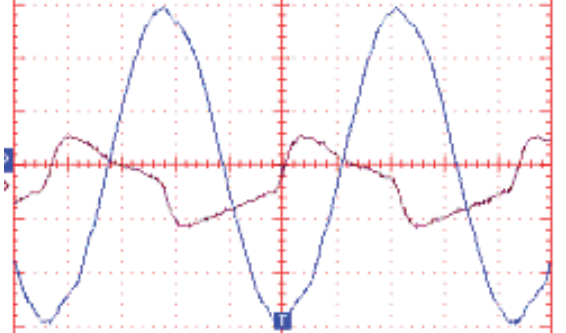
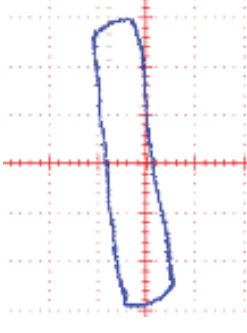
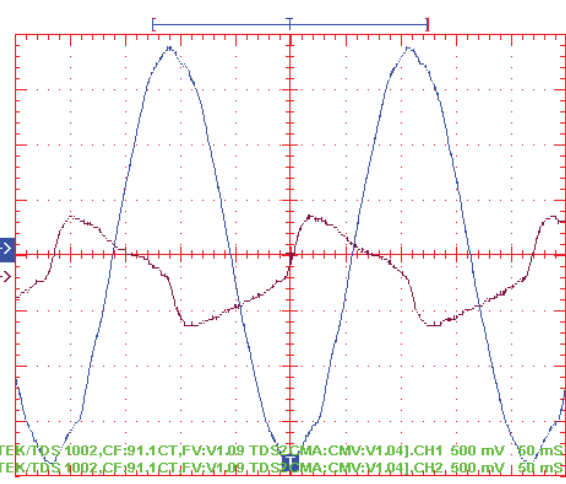
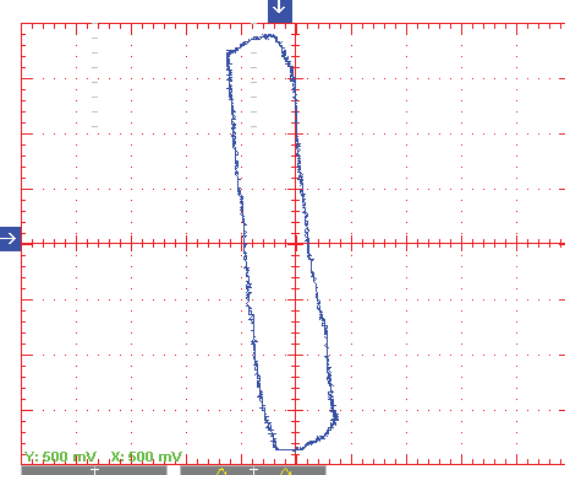
Tabelul 4. Forma histerezisului la frecvență variabilă și amplitudine constantă
Table 4. Hysteresis variation for constant amplitude and increasing frequency

<i>Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație</i>	<i>Configurația histerezisului pentru epruveta din lemn de carpen</i>
 <p data-bbox="683 584 906 618">Forma epruvetei</p>	
	
<p data-bbox="576 831 1011 869">Frecvența = 3 Hz și 610 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="576 1055 1011 1093">Frecvența = 5 Hz și 1435 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="576 1256 1011 1294">Frecvența=10 Hz și 2020 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="576 1458 1011 1496">Frecvența = 15 Hz și 3600 cicluri</p>	
	
<p data-bbox="576 1682 1011 1720">Frecvența=20 Hz și 4700 cicluri</p>	

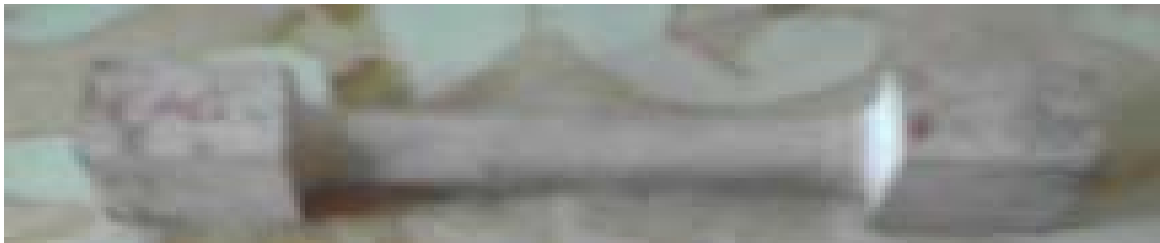
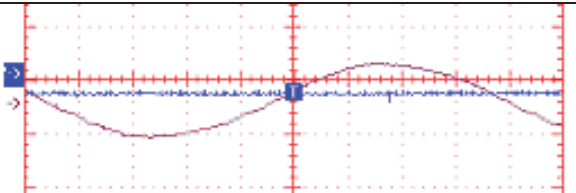
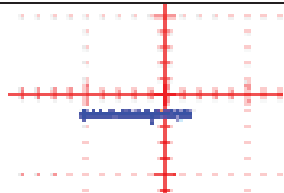
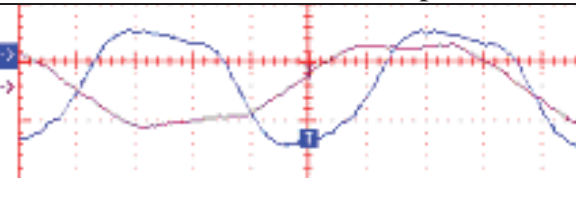
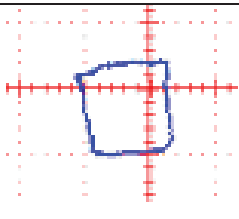
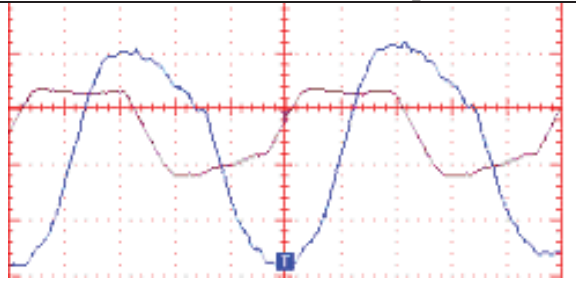
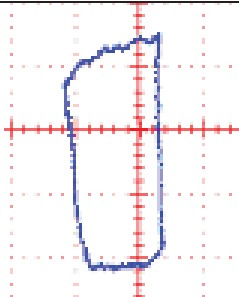
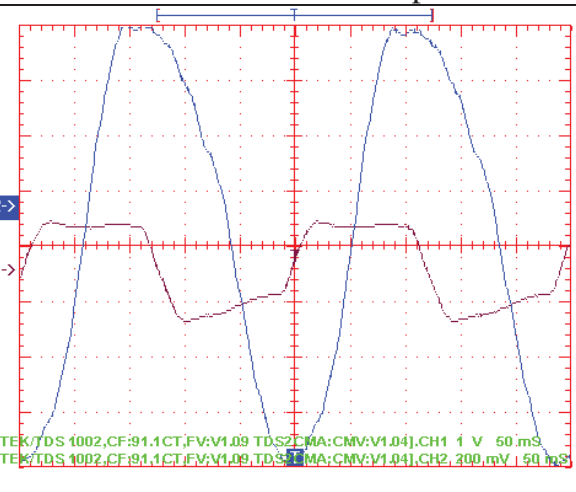
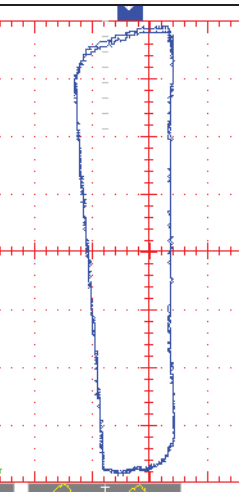
Ca urmare, se pune problema să se găsească un model pentru lemn care să ia în considerare relațiile tensiune-deformație, cuplate cu proprietățile mecanice, termice și conținutul de umiditate.

Mediul înconjurător poate avea o interacțiune semnificativă cu proprietățile mecanice ale lemnului. Acești parametri legați de mediu sunt umiditatea relativă, modificările chimice, temperatura instantanee și variația de temperatură.

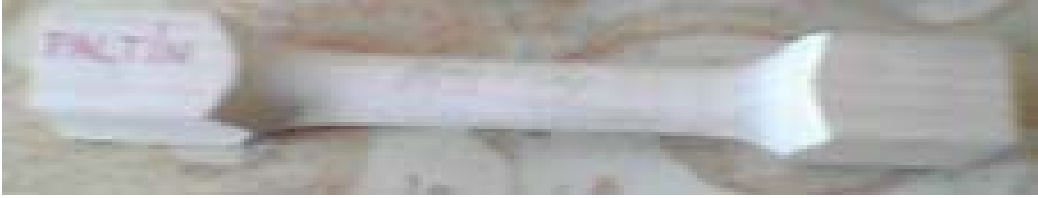
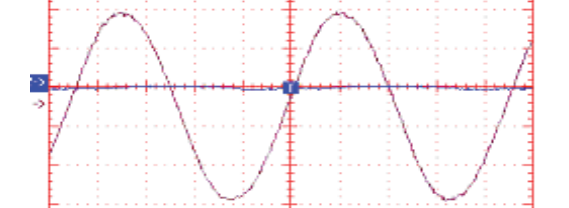
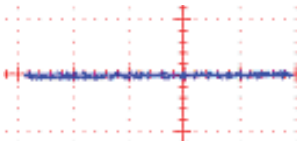
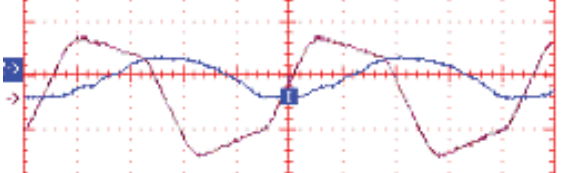
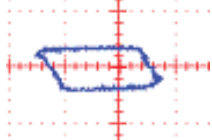
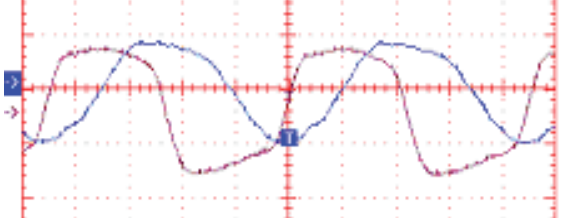
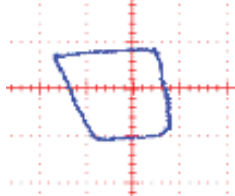
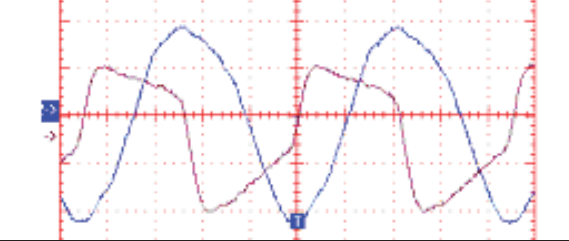
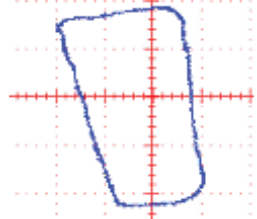
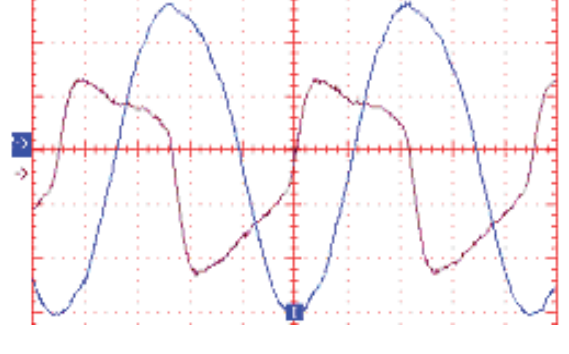
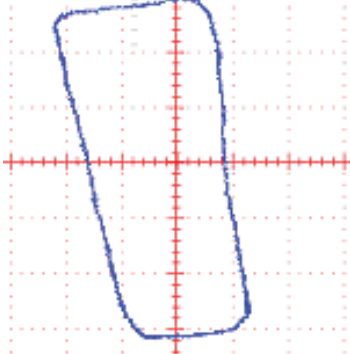
Tabelul 5. Forma histeresisului la frecvență constantă (5Hz) și amplitudine variabilă
Table 5. Hysteresis variation for increasing amplitude and constant frequency, 5 Hz

Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație	Configurația histeresisului pentru epruveta din lemn de carpen
 <p style="text-align: center;">Forma epruvetei</p>	
	
Amplitudinea = 1a și 7475 cicluri	
	
Amplitudinea = 2a și 7825 cicluri	
	
Amplitudinea = 3a și 8240 cicluri	
 <p style="font-size: small; color: green;">TEK/TDS 1002, CF:91.1CT, FV:V1.09, TDS2, CMA:CMV:V1.04, CH1, 500 mV, 50 mS TEK/TDS 1002, CF:91.1CT, FV:V1.09, TDS2, CMA:CMV:V1.04, CH2, 500 mV, 50 mS</p>	 <p style="font-size: small; color: green;">Y: 500 mV, X: 500 mV</p>
Amplitudine = 4a și 8670 cicluri	

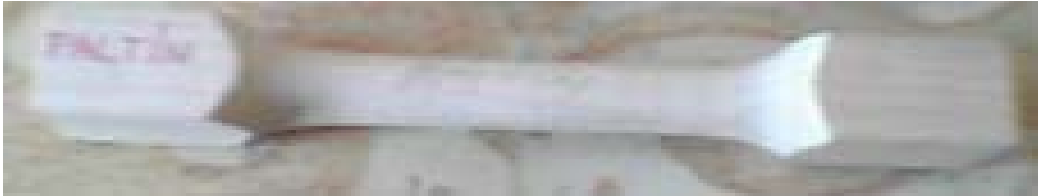
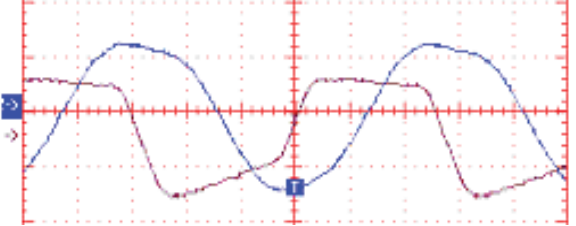
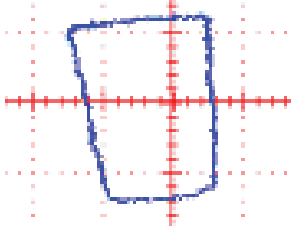
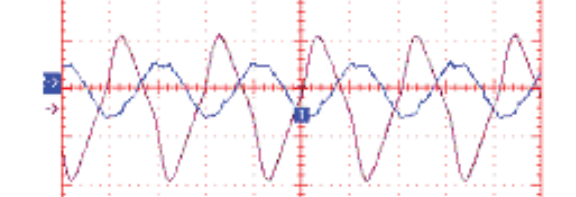
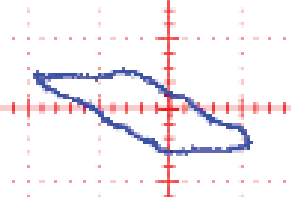
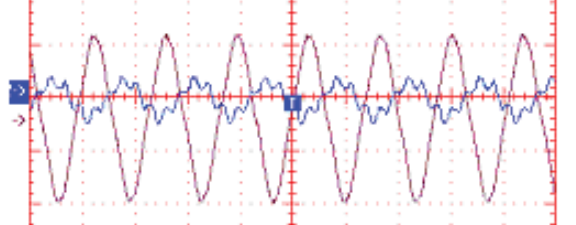
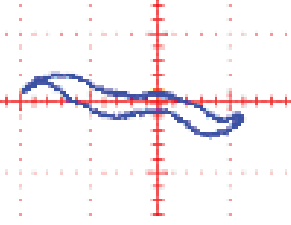
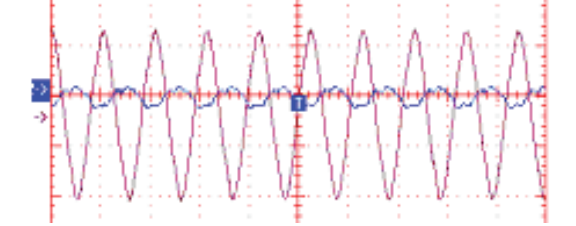
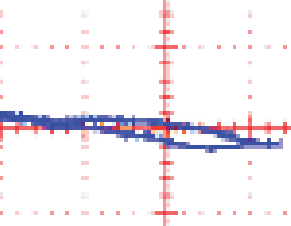
Tabelul 6. Forma histerezisului la frecvență constantă (5Hz) și amplitudine variabilă
Table 6. Hysteresis variation for increasing amplitude and constant frequency, 5 Hz

<i>Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație</i>	<i>Configurația histerezisului pentru epruveta din lemn de fag</i>
 <p>Forma epruvetei</p>	
	
Amplitudinea = 0 și 1210 cicluri	
	
Amplitudinea = 1a și 1525 cicluri	
	
Amplitudinea = 3a și 1785 cicluri	
 <p>TEK/TDS 1002,CF:91.1CT,FV:V1.09 TDS2C(MA:CMV:V1.04),CH1 1 V 50 ms TEK/TDS 1002,CF:91.1CT,FV:V1.09 TDS2C(MA:CMV:V1.04),CH2 200 mV 150 ms</p>	 <p>Y: 200 mV, X: 1 V</p>
Amplitudine = 4a și 2090 cicluri	

Tabelul 7. Forma histerezisului la frecvență constantă (5Hz) și amplitudine variabilă
Table 7. Hysteresis variation for increasing amplitude and constant frequency, 5 Hz

<i>Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație</i>	<i>Configurația histerezisului pentru epruveta din lemn de paltin</i>
 <p data-bbox="671 568 900 600">Forma epruvetei</p>	
	
Amplitudinea = 0 și 1445 cicluri	
	
Amplitudinea = 1 și 2020 cicluri	
	
Amplitudine = 2a și 2400 cicluri	
	
Amplitudine = 3a și 2750 cicluri	
	
Amplitudine = 4a și 3300 cicluri	

Tabelul 8. Forma histerezisului la frecvență variabilă și amplitudine constantă
Table 8. . Hysteresis variation for constant amplitude and increasing frequency

<i>Defazajului dintre tensiunea aplicată și răspunsul în deformație</i>	<i>Configurația histerezisului pentru epruveta din lemn de paltin</i>
 <p>Forma epruvetei</p>	
	
Frecvența = 5 Hz și 4150 cicluri	
	
Frecvență = 10 Hz și 4630 cicluri	
	
Frecvența=15 Hz și 6750 cicluri	
	
Frecvența = 20 Hz și 8500 cicluri	

Mărimea și configurația buclei de histerezis evoluează în timp. În fapt, bucla de histerezis obținută experimental oferă informații cu privire la elasticitatea, plasticitatea și deci reologia lemnului.

Practic, descrierea matematică a comportamentului elementelor din lemn este bazată pe rezultate experimentale care se găsesc sau se vor găsi în viitor disponibile în literatura de specialitate. Cu toate acestea, formularea matematică trebuie să satisfacă principiile de bază ale mecanicii și termodinamicii.

Bibliografie

- Ranta-Maunus, A, 1993, Rheological behaviour of wood in directions perpendicular to the grain. *Materials and structures*, 26, pp. 362-369.
- Curtu, I. Roșca, C., 1993, *Reologia lemnului*, Editura Transilvania Brașov, 218p.
- Diaconescu, E.N., Frunză, Gh. and Glovnea, M., 1997, A Smart Way to Predict the Final Stage of Fatigue in Steels, *Smart 3*, Kosice, Slovakia, pp. 68-77.
- Frunză, Gh., Diaconescu, E.N., 1997, Metodă de monitorizare a histerezisului la oțeluri solícitate dinamic, *Tehnomus IX*, Suceava, vol. III, pp. 19-26.
- Frunză, Gh., 2004, Hysteresis and biomechanical fatigue, AIMETA International Tribology Conference, September 14-17, Rome, Italy, on CD.
- Frunză, Gh., 2005 *Elemente de plasticitate și mecanica ruperii*, Editura Didactică și Pedagogică, Bucuresti, 405 p.

Abstract

Mechanical Hysteresis of Materials with Natural Anisotropy

This loop evolves with the number of stress cycles and may offer useful information upon the material state, namely: beech, silver fir, sycamore maple and hornbeam. For natural anisotropic materials such as wood, the biological, environmental physiological, mechanical and structural parameters should be considered.

Experimentally, the real hysteresis loop is evidenced using special equipment, conceived and set up in the Biomechanical Laboratory of our University. This paper shows theoretical and experimental results obtained in the investigation and leads to discussions and conclusions of practical applicability.

Keywords: hysteresis, mechanical, wood, natural anisotropy.

Prof. univ. dr. ing., ec. Gheorghe FRUNZĂ,
Universitatea "Ștefan cel Mare" Suceava
Facultatea de Inginerie Mecanică,
frunza@fim.usv.ro