

MODELE REOLOGICE LA ÎMBINĂRI ÎN LEMN CU BULON

Dr. ing. Rodica Nicoleta DATEȘ, Prof. univ. dr. ing. Ioan CURTU

Universitatea „Transilvania” din Brașov

REZUMAT. Lucrarea prezintă aspecte privind comportamentul reologic al lemnului. Sunt prezentate modelele reologice clasice, modurile de grupare al acestora, în vederea simplificării și ordonării problemei generale a raportului dintre solicitări și deformații ale corpurilor. Comportarea reală a corpurilor se ilustrează prin combinarea acestor modele. Pe baza modelelor reologice ale lemnului, s-au alcătuit modelele reologice specifice îmbinărilor cu tije cilindrice (buloane) testate la tracțiune, sub sarcină continuă. S-a realizat o succesiune a deformațiilor transpusă prin modele reologice.

Cuvinte cheie: îmbinare cu bulon, curgere în timp, model reologic, deformație elastică, deformație plastică.

ABSTRACT. This paper presents aspects regarding rheological behavior of wood. There are presented the classical rheological models their grouping possibilities in order to simplify and arrange the general ratio between strain and deformation of bodies. The real behavior of bodies is illustrated by combining these models. Based on the rheological models of wood, there have been made specific rheological models of bolted wood joints exposed to traction, under continuous load. A sequence of deformation has been made, transposed into rheological models.

Keywords: bolted wood joints, flow in time, rheological model, elastic deformation, plastic deformation.

1. INTRODUCERE

Reologia este știința curgerii materialelor. Denumirea derivă de la cuvintele grecești rheo = curgere și logos = știință.

Reologia descrie deformațiile dependente de timp ale materialelor supuse la acțiuni mecanice, în funcție de structura și compoziția materialului. Se poate spune că este știința curgerii lente, respectiv a creșterii deformațiilor unui corp supus unei anumite tensiuni constante, în anumite condiții de mediu (umiditate, temperatură, ș.a.) și intensitate a solicitărilor. [6]

Instrumentul de bază ce caracterizează reologia este modelul reologic.

Procesul de curgere sau deformație a unui corp este descris de un set de ecuații, în care, în mod obligatoriu, apare o ecuație de comportare reologică. Restul ecuațiilor se referă la continuitate, aspecte energetice, condițiile de stare, ș.a.

În figura 1 este reprezentat fenomenul de curgere lentă.

Lemnul, ca material de performanță, cunoaște o utilizare din ce în ce mai largă în cele mai variate domenii. Prin structura sa anatomico – morfologică și compoziția sa chimică, este un material cu puternice proprietăți reologice. De asemenea, datorită structurii sale neomogene, lemnul se află printre materialele anizotrope, având proprietăți fizice și mecanice diferite

pe cele trei direcții principale de solicitare: longitudinală (L), radială (R) și tangențială (T).

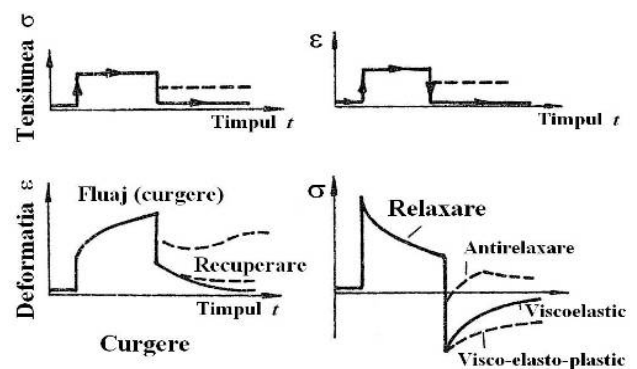


Fig. 1. Curgerea unui material și fenomenele corelate [6].

Comportarea reologică a lemnului este rezultatul comportării în timp a componentelor sale, atât din structura macroscopică, cât și a celor din structura microscopică și submicroscopică.

Procesul de deformare plastică, respectiv curgerea, se desfășoară în timp. Durata de deformare sub deformație constantă dintre două stări de echilibru poartă denumirea de *timp de relaxare*. Deformarea plastică a lemnului este însoțită de: fenomenul deformațiilor ascunse, fenomenul acțiunii elasticității întârziate (care apare după înlăturarea sarcinii) și fenomenul de relaxare.

Din diagrama caracteristică, $\sigma = f(\varepsilon)$, rezultă că deformația totală, ε , după depășirea limitei de elasticitate, σ_e , este alcătuită din două părți: o parte elastică, reversibilă, ε_e și o parte ireversibilă, denumită deformație permanentă sau plastică, ε_p (fig.2). [6]

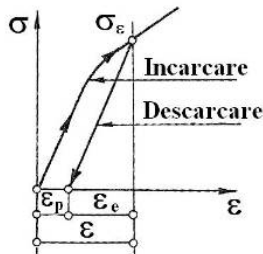


Fig. 2. Deformații elastice și plastice la lemn [6].

Caracteristic lemnului sunt curbele $\sigma - \varepsilon$, pentru tracțiune și compresiune prezentate în figura 3.

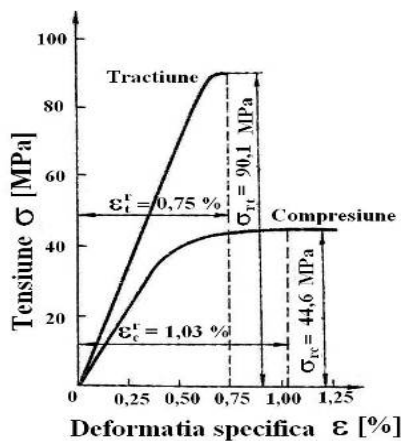


Fig. 3. Curbe $\sigma - \varepsilon$ pentru lemn [6].

Pentru a se putea explica fenomenul de curgere și relaxare ale lemnului masiv, structura acestuia se reprezintă simplificat, prin diferite faze componente ale modelelor reologice ale corpurilor elastoplastice.

Solicitarea ciclică de încărcare - descărcare determină apariția de deformații remanente, care sunt influențate de: mărimea tensiunii (cu cât aceasta este mai apropiată de cea de rupere cu atât deformațiile sunt mai mari), de umiditate (cu creșterea umidității deformațiile cresc), de temperatură ș.a.

Curgerea lentă a lemnului este influențată de factori importanți, cum ar fi: condițiile climatice; umiditatea și temperatura. Procesul de schimbare a conținutului de umiditate va mări curgerea. Ecuația curgerii lente din figură nu prevede un prag al acesteia în lemn. Un prag în curgerea lentă nu a fost niciodată cunoscut. Dimpotrivă, s-a observat că și clădirile vechi de peste de 100 de ani au, încă, o tendință de curgere lentă în timp [8].

Limita curgerii plastice este efortul la atingerea căruia apar anumite deformații ireversibile, adică apare curgerea plastică. Până la această limită, lemnul posedă însușiri elastice permanente (relația dintre deformațiile elastice și eforturi se reprezintă sub forma unei linii drepte) și rezistă bine la acțiunea sarcinilor exterioare.

La depășirea limitei curgerii plastice, lemnul trece într-o stare calitativă specială, care se caracterizează prin creșterea rapidă a deformațiilor elastice, pe măsura creșterii sarcinilor aplicate și prin ruperea inevitabilă, sub acțiunea sarcinilor prelungite, care are loc la atingerea deformației limită de curgere plastică. Astfel, limita curgerii plastice a lemnului reprezintă limita superioară a eforturilor la care lemnul este rezistent, indiferent de durata solicitării; ea este egală cu rezistența totală sub sarcini permanente a materialului dat.

Sarcinile temporare nu influențează curgerea lentă, iar sarcina de lungă durată poate varia mult proporțional cu încărcarea totală. [8]

2. MODELELE REOLOGICE CLASICE ȘI SPECIFICE LEMNULUI

Pentru simplificarea și ordonarea problemei generale a raportului dintre solicitări și deformații ale corpurilor, se introduc modelele reologice. Nici un corp material real nu corespunde practic acestora. Comportarea reală a corpurilor se ilustrează prin combinarea acestora în serie sau în paralel.

Mediul continuu perfect elastic - solidul lui Hooke caracterizat printr-un corp perfect elastic, independent de intensitatea sau natura solicitărilor, complet lipsit de „memorie”, ce revine la forma inițială odată cu îndepărtarea acestora. *Mediul continuu ideal plastic - Solidul lui de Saint - Venant* e caracterizat printr-un corp greu, rezemat pe un plan rugos, solicitat de o forță F de tracțiune nu se pune în mișcare decât în momentul în care forța F depășește forța de frecare $F_f = \mu G_c$. Poate fi considerat ca un limitator de efort. *Lichidul vâcos incompresibil - Lichidul lui Newton* se caracterizează printr-un corp pur vâcos. Sub acțiunea unei solicitări, curge. Deformația vâscoasă depinde de mărimea și durata solicitării. Comportarea este descrisă de o ecuație care prezintă proporționalitate între efort și viteza de deformare, coeficienții de proporționalitate fiind independenți de parametrii solicitării [8].

Modelul mecanic cel mai apropiat de structura lemnului este modelul *Burgers*, rezultatul legăturii în serie a unui model *Maxwell* (corp elastic Hooke legat în

serie cu lichidul vâscos al lui Newton) cu un model Kelvin-Voigt (corp elastic Hooke legat în paralel cu un corp vâscos Newton). Deformația modelului Burgers este [4]:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{ei} + \epsilon_c = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1)$$

unde: ϵ_e este deformația elastică; ϵ_{ei} – deformația elastică întârziată (curgere primară); ϵ_c – deformația de curgere (curgere secundară);

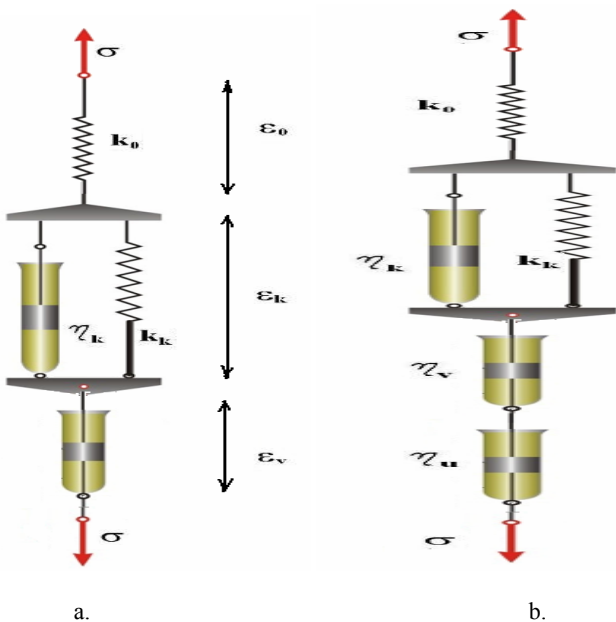


Fig. 4. Modele reologice ale lemnului:

a – model cu patru elemente (tip Burgers); b – model cu cinci elemente (mecano-sorptiv) [6].

3. MODELE REOLOGICE ALE ÎMBINĂRILOR ÎN LEMN CU BULON

Pornind de la modelele reologice ale lemnului masiv, s-a încercat sintetizarea comportamentului sub sarcină a îmbinării în lemn cu bulon din figura 5.

În vederea stabilirii unui model reologic al îmbinărilor în lemn cu bulon testate la tracțiune, s-au considerat modelele reologice ale fiecărui element al îmbinării în parte, legate între ele. Astfel, pentru elementele din lemn, se va considera modelul Maxwell (format din corpul elastic al lui Hooke și modelul vâscos Newton), iar pentru bulon se va considera modelul reologic Hooke, sau modelul Maxwell.

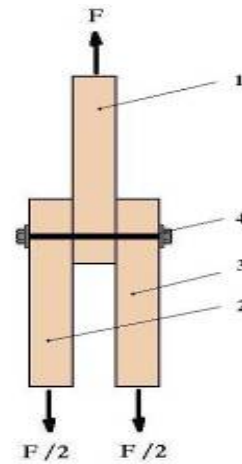


Fig. 5. Îmbinare în lemn cu bulon utilizată în construcții supusă la sollicitarea de tracțiune; [7]

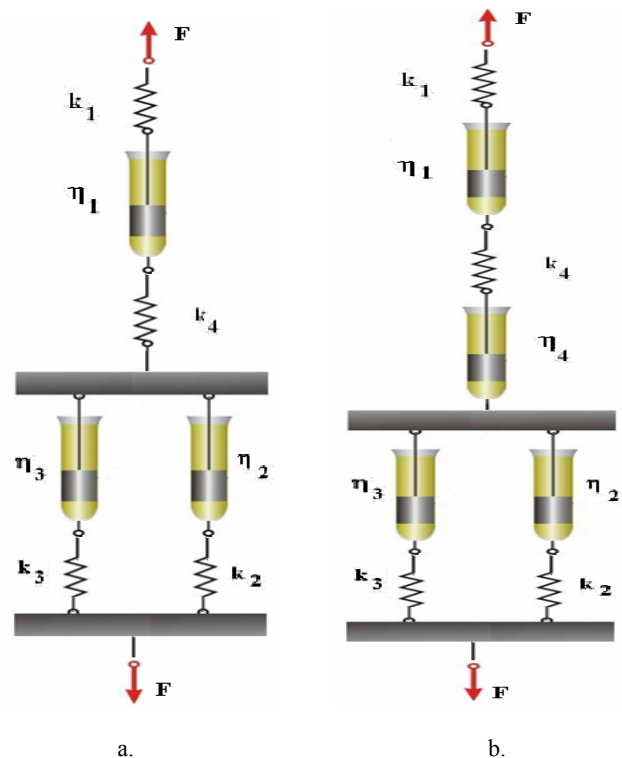


Fig. 6. Model reologic al unei îmbinării în lemn cu 3 elemente și bulon:

a – elementele din lemn: model Maxwell, tija metalică: model Hooke; b – model Maxwell pentru toate elementele îmbinării [7].

Pentru elementele 2 și 3 modelele reologice se vor lega în paralel, apoi în serie cu modelul pentru bulon (elementul 4) și modelul pentru elementul 1 din lemn.

S-au evidențiat 4 etape de curgere:

- *Etapa 1:* începe încărcarea epruvetei iar elementele din lemn au o deformație elastică, tija fiind, încă, rigidă;
- *Etapa 2:* în timpul încărcării, deformațiile lemnului intră în domeniul plastic și apare deformația elastică a tije, la început, apoi intră în starea plastică;

• *Etapa 3:* rămân doar deformațiile remanente atât ale elementelor din lemn, cât și ale tijei; s-a produs ruperea elementelor din lemn;

• *Etapa 4:* starea de deformație a asamblării, după atingerea forței maxime: apare ruperea la elementele laterale ale îmbinării, o deformație plastică a tijei și o deformație plastică, remanentă la elementul central, fără rupere.

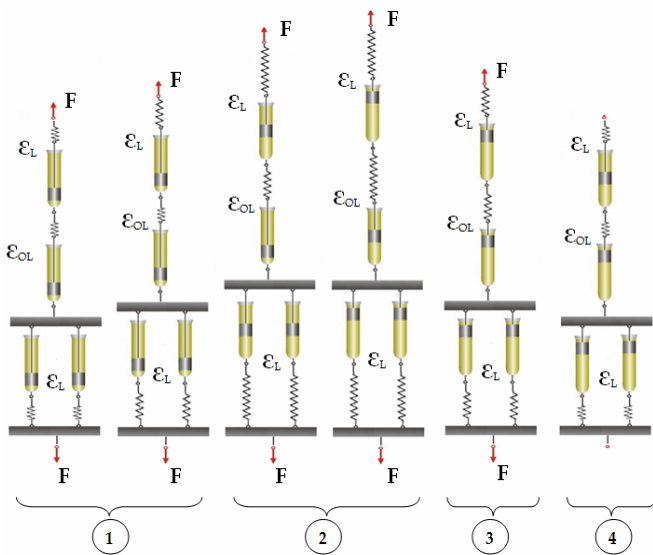


Fig. 7. Succesiunea deformațiilor, transpusă prin modele reologice, pentru îmbinarea în lemn cu bulon și tijă nefiletată, cu diametru de 10 mm:
 ε_L – deformația lemnului; ε_{OL} – deformația tijei; 1, 2, 3, 4 – etapele de curgere [7].

Comportamentul de deformație în timp observat în testele experimentale corespunde cu cel al unui solid viscoelastic. Dacă nivelul solicitării se schimbă, apare o deformație întârziată în timp, care converge către o valoare constantă. Acest comportament poate fi descris prin intermediul modelelor reologice Hooke (arc) și Newton (amortizor). Această parte este considerată a fi comportarea instantanee a materialului. Solicitarea, care apare în mod direct, este descrisă de modulul lui Young al materialului.

Comportamentul în timp se distinge după următoarele două etape [7]:

• *deformația vâscoasă* ε_{fl} : deformația ireversibilă dată de curgerea lentă, care nu revine la valoarea inițială după relaxare. Deformația vâscoasă crește permanent în timp până atinge o valoare finală. În modelul material, unul sau mai multe amortizoare captează deformația vâscoasă, căreia i se poate adăuga o funcție de îmbătrânire în timp.

• *deformația elastică* ε_{cr} : descrie tensiunea elastică a comportamentului materialului care nu are loc imediat după aplicarea încărcării, dar deformația apare, mai degrabă, după o perioadă întârziată de timp.

În funcție de modelul ales, ecuațiile vor fi definite în forma corelațiilor σ - ε - t . În general, o ecuație care arată deformația este formată prin adăugarea fiecărui component cu definițiile sale parțiale, cum se arată în ecuația 2, pentru modelul Burger.

$$\sigma = \sum_{n=1}^n \sigma_{el} + \sum_{i=1}^i \sigma_{cr,i} \quad (2)$$

La punctul t_x tensiunea și solicitarea se cunosc incluzând toate valorile lor parțiale pentru toate elementele din modelul material. Pe baza acestora, se poate defini un interval mic de timp Δt , pentru condițiile de tensiuni și deformații, la un alt punct în timp t_{x-1} t_x t . Pentru a se putea îndeplini aceasta, toate părțile sunt considerate separat. Apare o fază elastică, inițială, apoi faza de deformație, descompusă într-o parte a deformației vâscoase și o parte de revenire ușoară (faza de deformație elastică).

Faza elastică: $\sigma_{el} = c_{el} \varepsilon_{el}$, unde c_{el} = constantă în timp modulul lui Young.

Faza deformației vâscoase:

$$\sigma_{fl}(t) = a e^{-bt} \quad (3.a)$$

parametrii de deformație în timp ai amortizorului fiind:

$$\sigma_{fl}(t) = \frac{1}{a} e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (3.b)$$

Faza de deformație elastică:

$$\sigma_{cr,i}(t) = c_i \varepsilon_{cr,i}(t) \quad (4.a)$$

$$\sigma_{cr,i}(t) = \frac{1}{d_i} e^{-\frac{c_i}{d_i} t} \quad (4.b), i = 1, 2, \dots$$

Următorul pas descompune integralele de mai sus în definirea incrementelor; de exemplu, perioada observată de timp este clasificată într-o perioadă de timp cunoscută t_0 la t_x și un increment ulterior nou definit Δt care atinge punctul concludent în observarea timpului t_{x+1} . Soluția acestui suficient de mic interval de timp Δt este rezolvat printr-o cvadratură numerică.

Ecuația de bază:

$$\int_{t_0}^{t_{x-1}} \sigma_{fl} dt + \int_{t_0}^{t_x} \sigma_{cr,i} dt + \int_{t_x}^{t_{x+1}} \sigma_{cr,i} dt = I(t_0, t_x) \quad (5)$$

După definirea unui model potrivit și a parametrilor de material, o relație σ - ε - t există pentru a calcula comportamentul pe termen lung cu privire la diferite condiții solicitare-timp, la fel de bine ca folosirea pentru calculul modelelor. Sub încărcare constantă, ecuațiile

oferă un format închis σ - ε - t , în care solicitarea rezultă direct de la tensiune pentru fiecare punct de timp t . Fiecare model de unitate individuală arc-amortizor poate fi împărțit de:

$$\sigma_i(t) = \frac{1}{d_i} \int_{t_0}^t e^{-\frac{c_i}{d_i}(t-\tau)} d\tau + \sum_{k=1}^n \frac{1}{d_i} \int_{t_{k-1}}^{t_k} e^{-\frac{c_i}{d_i}(t-\tau)} d\tau \quad (6)$$

4. CONCLUZII

▪ Se observă existența a *trei etape*: la început, curgerea crește și scade ritmul de curgere. Apoi, curgerea scade și ritmul curgerii păstrează o valoare constantă. În a treia parte, ritmul de curgere este rapid până apare ruperea; aici se evidențiază începutul și evoluția degradării progresive a materialului lemnos înaintea ruperii. Se confirmă, astfel, existența unor evoluții diferite non-liniare.

▪ Pentru oricare din îmbinările studiate supuse la un efort de tracțiune F , fiecare din elementele laterale exercită o presiune în zona de contact, care se observă între tija cilindrică și periferia găurii elementului din lemn. Tija suportă prezența încărcării repartizată, mai mult sau mai puțin uniform, pe lungimea sa.

▪ În piesa centrală se produc fenomenele inverse. Asupra tije se aplică o presiune pe o zonă de contact care se creează între aceasta și gaură. Creșterea progresivă a sarcinii F arată că există o limită la încărcarea aplicabilă acestui tip de asamblare. Deformațiile ireversibile apar după atingerea primului prag al efortului. Bulonul

adoptă o curbură care poate deveni importantă, iar lemnul se strivește în regiunile din apropierea zonelor de contact cu tija.

▪ Lunecarea totală a îmbinării este produsă de o mișcare de corpuri rigide datorate deformațiilor lemnului, căreia i se suprapun fenomenele datorate încovoierii tije.

▪ Cu creșterea gradului de încărcare (raportul dintre tensiunea aplicată și rezistența limită de rupere la încercări de scurtă durată) și mărirea tensiunii de încovoierie aplicată, în condiții de variație a umidității relative și a temperaturii aerului (asemănătoare cu variațiile la care sunt supuse construcțiile) mărirea deformațiilor remanente crește liniar.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Bocquet, J.-F.**, *Modelisation des deformations locales du bois dans les assemblages broches et boulonnes*, PhD Thesis, University Blaise Pascal – Clermont – Ferrand, France (1997).
- [2] **Chaplain, M. et al.**, *Life duration of wood joints under high stress level: experimentation and modelling*, COST 508-Wood mechanics; Workshop, May 1994, p.128-135. (1994).
- [3] **Curtu, I. & Ghelmeziu, N.**, *Mecanica lemnului si materialelor pe baza de lemn, Mechanics of wood and wood products*, Editura Tehnica, Bucuresti, (1984).
- [4] **Curtu, I. et al.**, *Îmbinări în lemn – structură, tehnologie, fiabilitate, Wood joints – structure, technology, reliability*, Editura Tehnică, București, (1988).
- [5] **Curtu, I. & Roșca C.**, *Reologia lemnului*, Editura Universității „Transilvania” din Brașov (1993).
- [6] **Dateș R. N.**, *Elemente reologice la îmbinări în lemn utilizate în construcții*, Teză de doctorat, Universitatea „Transilvania” din Brașov (2011).
- [7] **Madsen, B.**, *Structural Behaviour of timber*. Timber engineering Ltd, ISBN 0-9696462-0-1, North Vancouver, British Columbia Canada (1992).

Despre autori

Dr. ing. **Rodica Nicoleta DATEȘ**

Universitatea *Transilvania* din Brașov

Absolventă a Universității *Transilvania* din Brașov, Facultatea de *Industria Lemnului* și a studiilor doctorale la Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea de *Inginerie Mecanică*, Catedra *Rezistența Materialelor și Vibrații*.

Prof. univ. dr. ing. **Ioan CURTU**

Universitatea *Transilvania* din Brașov

A absolvit Facultatea de *Industrializarea Lemnului*; dr. ing. din anul 1973.

Este conducător de doctorat în specialitatea *Rezistența materialelor, elasticitate și plasticitate*. Este membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România. Este membru al Academiei de Științe Naturale a Federației Ruse, Moscova. A publicat 20 de cărți în edituri centrale, precum și numeroase articole științifice. Are preocupări în analiza corpurilor izotrope și anizotrope.