

## CARACTERIZAREA ANIZOTROPIEI OTELULUI S600MC PRIN METODE NUMERICE VALIDATE EXPERIMENTAL

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat INGINERIE MECANICĂ

autor **ing. Iulian-Ionuț AILINEI**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. **Liviu MARȘAVINA**

luna Iulie anul 2024

### 1. INTRODUCERE

Anizotropia, caracteristica unui material de a prezenta proprietăți ce variază în funcție de direcția de măsurare și de observare, are un impact semnificativ asupra comportamentului mecanic al materialelor sub solicitări statice sau dinamice, cum ar fi cele prin șoc și vibrații. Înțelegerea profundă a acestui fenomen și cuantificarea anizotropiei este esențială pentru aplicarea corectă a materialelor în proiectarea structurală și pentru îmbunătățirea performanțelor și siguranței produselor [1]. Lipsa datelor experimentale, în special sub condițiile complexe ale deformării plastice și ale solicitărilor de impact, limitează abilitatea de a modela numeric și de a prezice comportamentul materialelor în condiții reale de exploatare. Astfel este justificată o investigație amănunțită ce combină metode avansate precum corelarea digitală de imagine, analiza cu elemente finite și testarea statică, dinamică și la oboseală indusă prin vibrații.



Fig. 1 Semifabricatul laminat, procesat prin roluire

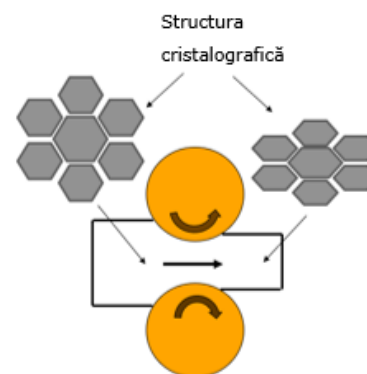


Fig. 2 Rearanjarea structurii cristaline după procesul de laminare

Lucrarea de față studiază fenomenul anizotropiei în semifabricatele laminate din oțel, subliniind în mod specific rolul său esențial în domeniul simulării numerice pentru procesele de fabricație care implică deformarea plastică. Anizotropia, sau dependența direcțională a proprietăților mecanice, se evidențiază ca un factor crucial în prezicerea precisă a rezultatelor unor astfel de procese. Studiul se concentrează pe utilizarea raportului de deformare - cunoscut și sub numele de coeficienți Lankford sau valori R - și a Curbei Limită de Formare (FLC),

ambele fiind repere industriale pentru evaluarea capacității de deformare plastică a foilor metalice.

Una dintre provocările principale subliniate este adesea lipsa datelor experimentale cuprinzătoare esențiale pentru acuratețea analizelor numerice. Pentru a depăși această barieră, cercetarea actuală este orientată către achiziționarea meticuloasă a proprietăților materialelor și a datelor de verificare necesare pentru simularea proceselor de deformare plastică la rece. Prin aplicarea testelor uniaxiale, studiul trasează cu meticulozitate curbele caracteristice convenționale ale semifabricatelor laminate de oțel S600MC în trei direcții principale: direcția de laminare sau roluire (DR), direcția diagonală (DD) și direcția transversală (DT). Această abordare metodică nu doar că îmbogățește baza de date pentru simulare, dar și sporește precizia modelării predictive. Un exemplu din industrie este utilizat pentru a ilustra impactul anizotropiei asupra formabilității produselor semifabricate laminate din oțel. Integrarea testării dinamice în cadrul studiului oferă o perspectivă valoroasă asupra rezistenței la oboseală a materialului S600MC, un aspect crucial pentru componente care vor fi supuse la solicitări ciclice în aplicațiile lor finale. Corelarea datelor obținute din testele dinamice cu rezultatele simulării numerice permite nu doar validarea modelului numeric, dar și ajustarea acestuia pentru a reflecta cu mai mare acuratețe comportamentul real al materialului în condiții de oboseală. Utilizarea actuatorilor electrodinamici pentru obținerea curbei de oboseală aduce în prim-plan capacitatea de a simula condiții de operare specifice și de a evalua performanța materialului sub acțiunea forțelor dinamice.

## 2. STADIUL ACTUAL AL EVALUĂRII ANIZOTROPIEI OȚELURILOR

În esență, obiectivul se concentrează pe integrarea metodelor experimentale cu analiza numerică pentru a obține o înțelegere cuprinzătoare și validată a comportamentului anizotrop al oțelului S600MC, cu posibile aplicații în dezvoltarea și îmbunătățirea materialelor folosite în industrie. Planul experimental al programului de cercetare este prezentat în figura 3.

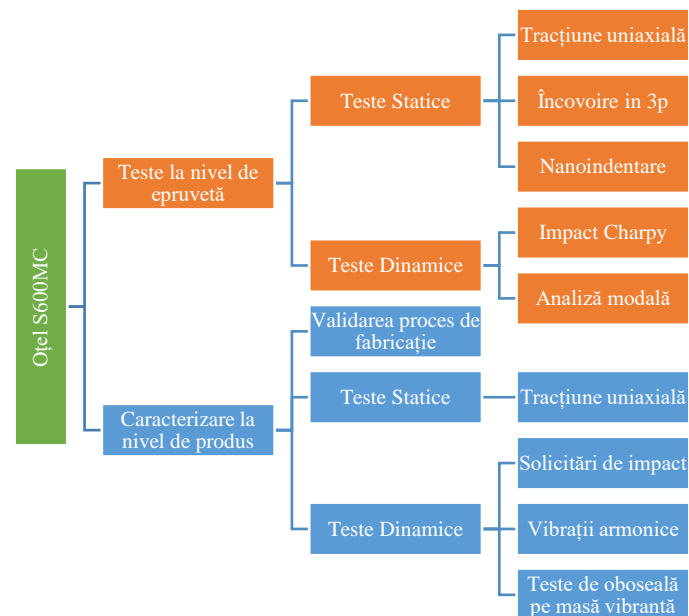
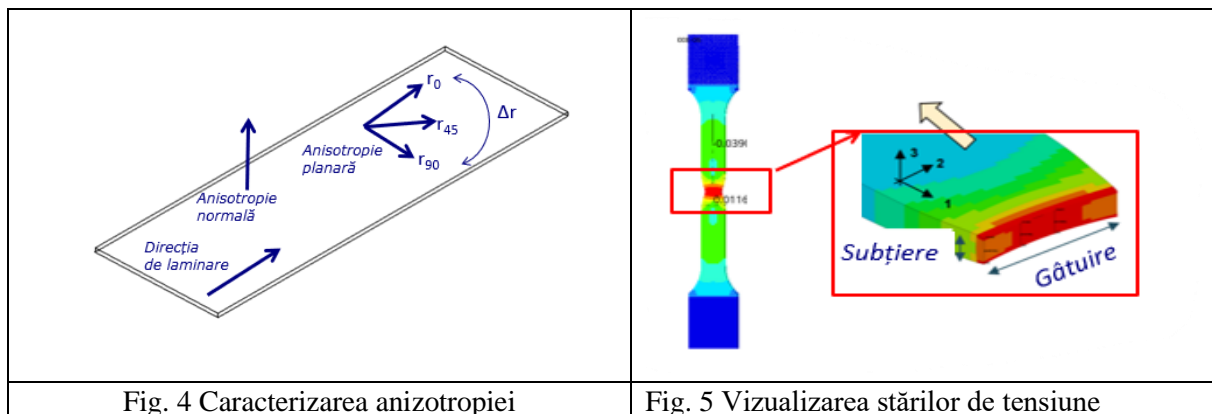


Fig. 3 Schema de principiu a programului de cercetare

Plăcile de oțel, în special cele procesate prin laminare, prezintă un comportament anizotrop datorită aliniamentului microstructurii. Acest capitol revizuieste înțelegerea actuală a comportamentului anizotrop al oțelurilor, subliniind importanța parametrilor precum coeficienții Lankford [2] (valori R) prezente în relația (1) și Curba Limită de Formare (FLC) în evaluarea formabilității laminatelor metalice. Acești parametri sunt esențiali pentru a prezice cum se vor comporta materialele în timpul proceselor de fabricație care implică deformare plastică.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{b}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 b_0}{L b}\right)} \quad (1)$$



Capitolul detaliază diverse metode numerice utilizate pentru a modela comportamentul anizotrop. Sunt discutate tehnici precum integrarea implicită și explicită în Analiza cu Elemente Finite (FEA), alături de diferite criterii de curgere precum criteriile von Mises, Hill [3] (2) și Barlat [4]. Aceste criterii ajută la descrierea anizotropiei plastice a metalelor, esențială pentru modelarea numerică precisă. Revizuirea acoperă, de asemenea, modele avansate care încorporează anizotropia în simularea deformării plastice, îmbunătățind capacitățile predictive ale analizelor numerice.

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (2)$$

Unde F, G, H, L, M, N sunt constante care trebuie determinate experimental, iar  $\sigma_{ij}$  sunt tensiunile. Acesta prezice aceeași limită de curgere la tracțiune și compresiune.

Pentru modelarea ruperii materialelor ductile, în Radioss, se folosește un criteriu simplificat bazat pe acumularea liniară a deteriorării [5]. Alungirea la rupere este descrisă de două funcții parabolice calculate pe baza alungirii la rupere la diferite tipuri de solicitări, adică în funcție raportul de triaxialitate [6] conform Fig. 5.

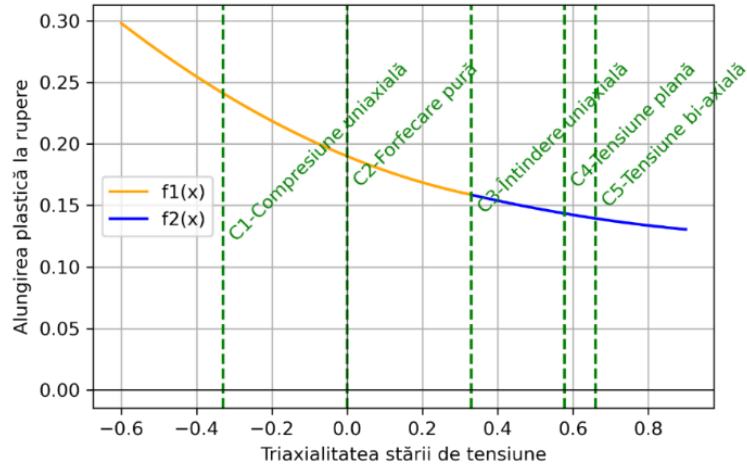


Fig. 6 Alungirea la rupere în funcție de starea de triaxialitate

### 3. CARACTERIZAREA EXPERIMENTALĂ ȘI VALIDAREA NUMERICĂ A ANIZOTROPIEI OȚELULUI S600MC

Acest capitol descrie testele experimentale statice efectuate pentru a caracteriza anizotropia oțelului S600MC. Epruvetele de test au fost decupate la orientări diferite, conform figurii 7.

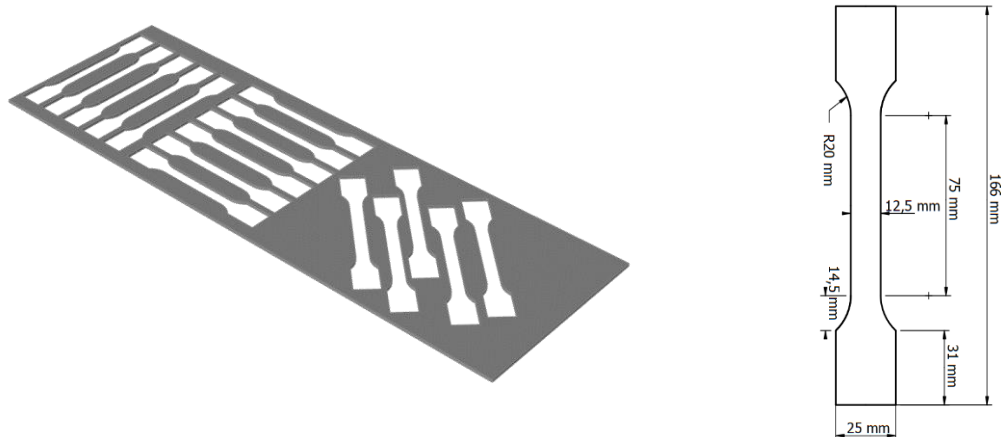


Fig. 7 Schița CAD a orientării epruvetelor de test și dimensiunile epruvetei conform standardului ISO 10113:2006

Au fost realizate solicitări de întindere uniaxială pentru toate aceste orientări, iar alungirile principale și secundare au fost măsurate prin metode optice, folosind corelare digitală de imagine. (fig. 8).

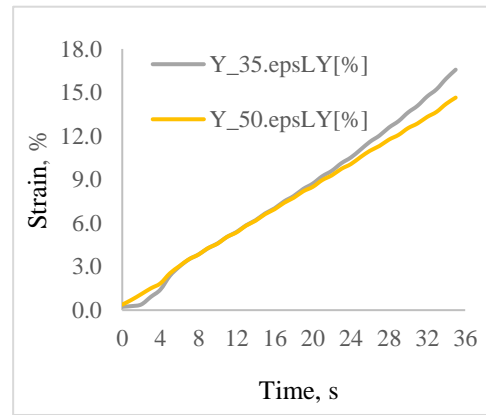
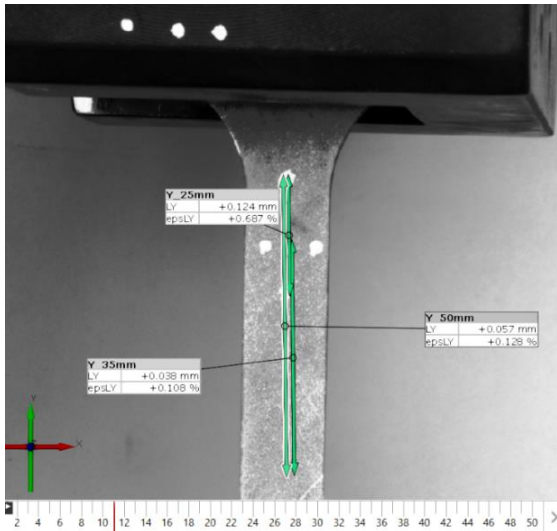


Fig. 8 Interfața grafică GOM și alungirea specifică măsurată

Pe baza acestor rezultate, (fig. 9) s-au construit curba limită de deformare plastică și criteriul de rupere ductilă, ambele folosite în simulările numerice.

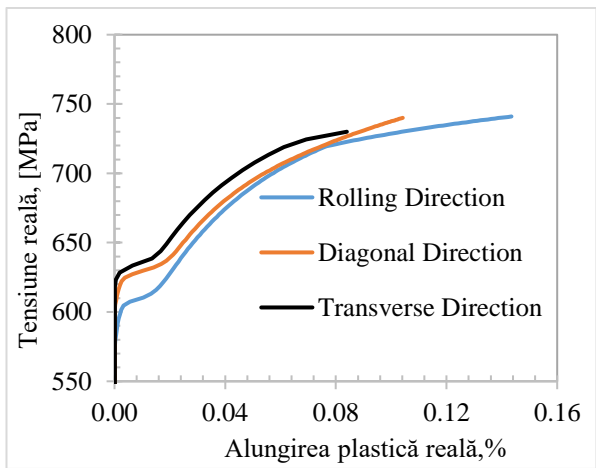
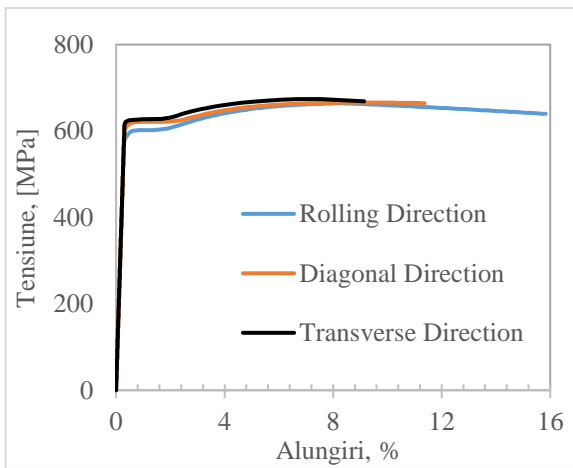


Fig. 9 Curbele caracteristice convenționale, respectiv zona de plasticitate

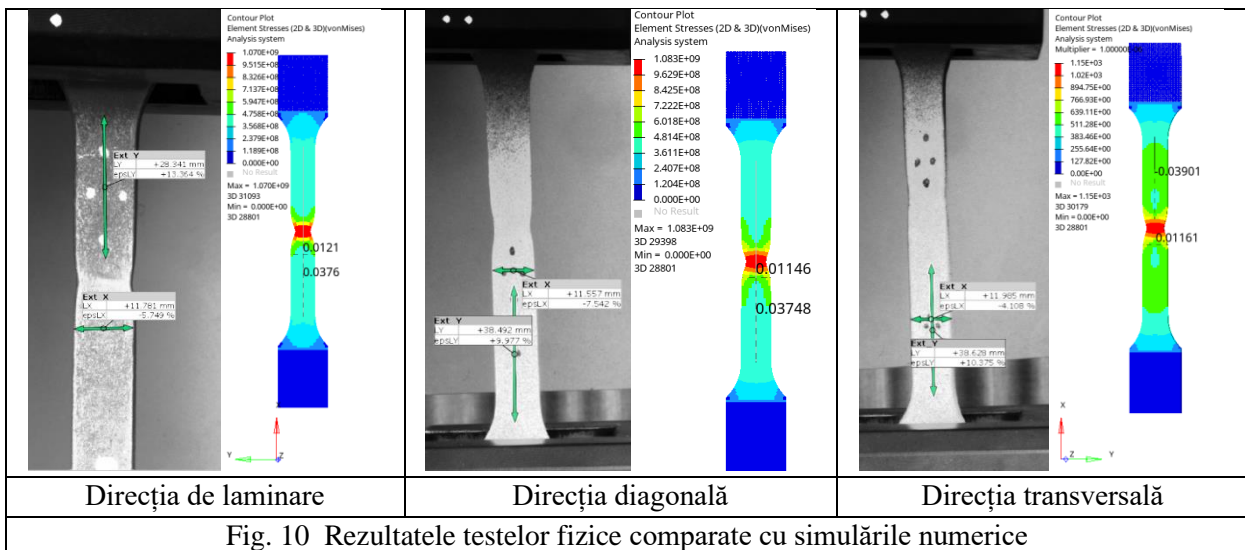


Fig. 10 Rezultatele testelor fizice comparate cu simulările numerice

Rezultatele simulărilor numerice, corelate experimental, sunt prezentate în figura 10.

Pe lângă încercările de tracțiune uniaxială, au fost realizate și solicitări de îndoire în trei puncte, nano-indentare și analiza metalografică. Aceste experimente oferă date detaliate despre proprietățile mecanice ale materialului în diferite direcții, esențiale pentru dezvoltarea unor modele numerice precise.

Pe lângă încercările statice, comportamentul dinamic al oțelului S600MC este evaluat prin teste de vibrații mecanice și încercări de impact Charpy. Aceste experimente evaluează modul în care materialul răspunde la sarcini ciclice și impacturi de mare viteză, oferind informații despre comportamentul său la oboseală și rezistența la solicitări dinamice. Capitolul subliniază importanța înțelegerii caracteristicilor dinamice ale materialelor utilizate în componentele supuse la încărcări repetitive sau de mare viteză, cum ar fi aplicațiile auto și aerospațiale. În figurile 11 și 12, se evidențiază rezultatele pe direcția transversală, materialul prezentând un comportament accentuat anizotrop.

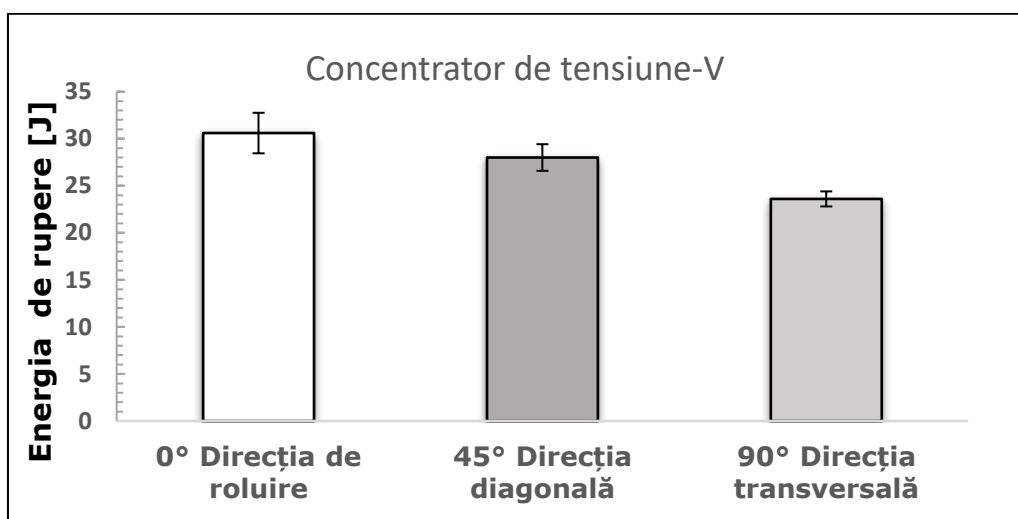


Fig. 11 Rezultatele încercărilor de reziliență ale epruvetelor cu concentrator V

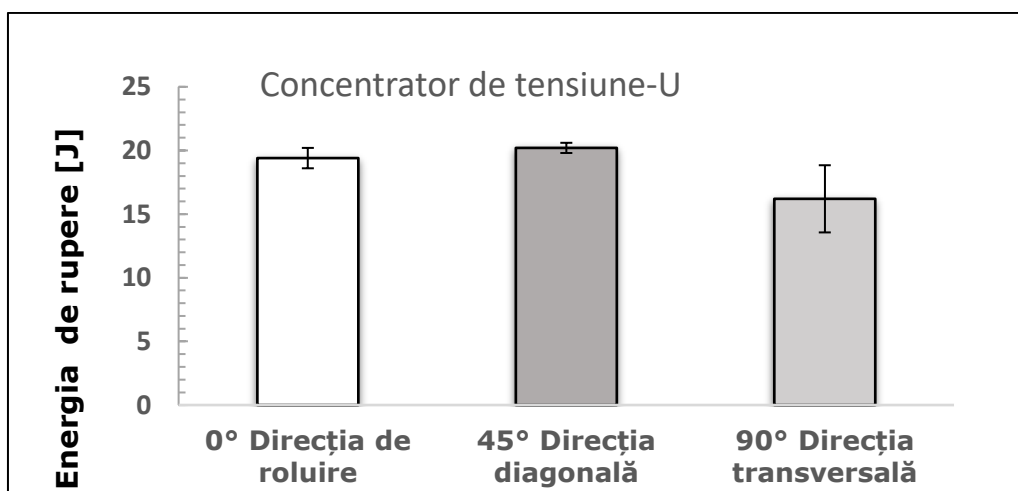


Fig. 12 Rezultatele încercărilor de reziliență ale epruvetelor cu concentrator U

Aceste rezultate arată modul în care energia de rupere variază în funcție de direcția de laminare a materialului.

Pentru *direcția de laminare*, energia medie de rupere este de 19,4 Jouli. Acest lucru sugerează că materialul are o rezistență relativ ridicată la rupere atunci când forța este aplicată în direcția de laminare.

45° (*direcție diagonală*): Energia medie de rupere crește ușor la 20,2 Jouli. Această creștere minoră indică faptul că rezistența materialului la rupere este puțin mai mare atunci când forța este aplicată în diagonală în raport cu direcția de laminare, potențial datorită orientării granulelor sau structurilor interne care oferă mai multă rezistență în această direcție.

90° (*direcție transversală*): Energia medie de rupere scade semnificativ la 16,2 Jouli. Această scădere evidențiază faptul că materialul este mai puțin rezistent la forțele de rupere aplicate în direcția transversală, prezentând un comportament anizotrop clar în care rezistența materialului variază în funcție de direcția forței aplicate.

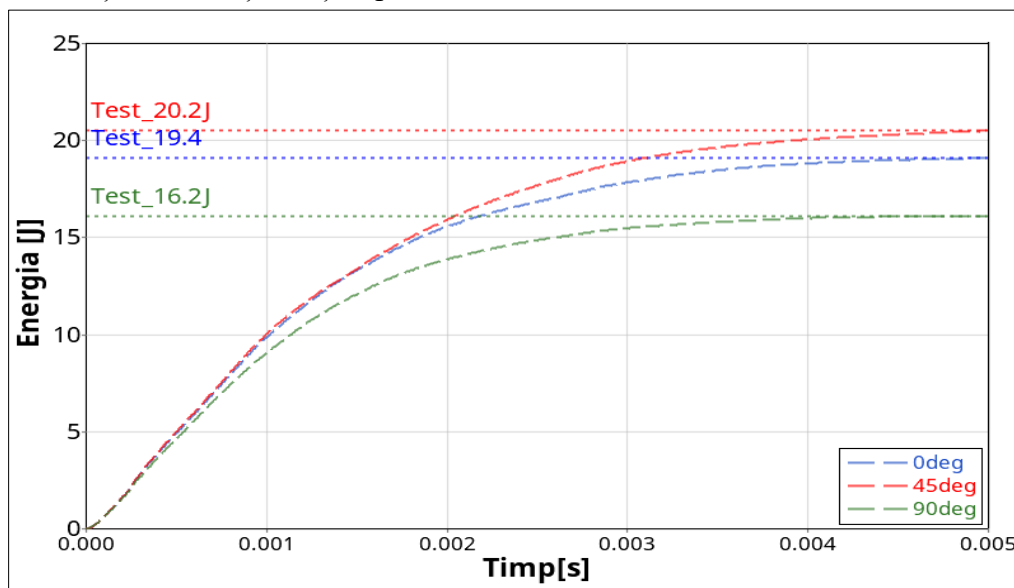


Fig. 13 Comparație test fizic vs. simulare numerică, concentrator V

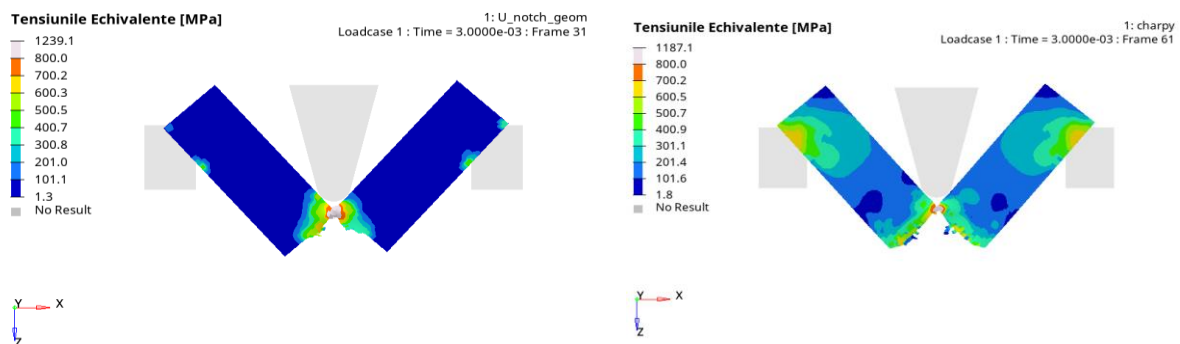


Fig. 14 Comparație între tensiunile echivalente, în timpul încercărilor de reziliență, pentru concentrator tip „U”, stânga și tip „V”, dreapta

Rezultatele testelor statice și dinamice (prezentate în figurile 13 și 14) sunt utilizate

pentru a valida modelele numerice dezvoltate în această cercetare. Capitolul descrie procesul de integrare a datelor experimentale în aceste modele, asigurând acuratețea și fiabilitatea acestora. Acest pas de validare este crucial pentru stabilirea încrederii în capacitățile predictive ale simulărilor numerice. [7]

#### 4. EVALUAREA COMPORTAMENTULUI PRODUSELOR DIN OȚEL S600MC

Capitolul se concentrează pe prezicerea comportamentului reperului „suport centură siguranță”, folosind metode numerice, ce au la baza modele de material determinate experimental, anterior. Astfel s-a realizat o simulare numerică a procesului de deformare plastică, rezultatele fiind comparate cu reperate fizice (fig. 15)

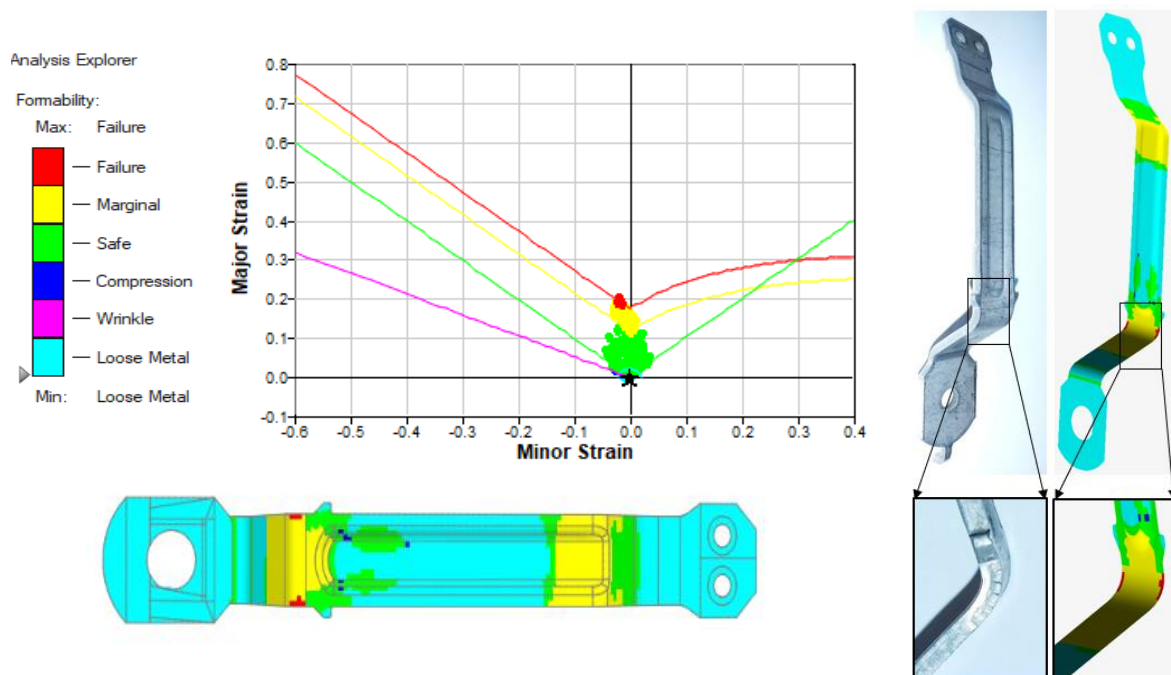


Fig. 15 Studiul numeric al procesului de deformare plastică, validat experimental

Rezultatele analizei cu elemente finite a procesului de deformare la rece este prezentată în Capitolul 4.1 furnizează informații esențiale cu privire la distribuția deformării plastice și a variațiilor de grosime de-a lungul piesei formate, care sunt indicatori direcți ai ductilității și rezistenței materialului post-deformare.

Ulterior simulării de deformare plastică la rece, au fost extrase datele rezultate referitoare la variațiile de grosimi (Fig. 16) și deformare plastică (Fig. 17) ale reperului. Pentru această etapă s-a folosit soluția software Altair HyperCrash [7]. Datele extrase au fost apoi procesate și formate corespunzător pentru compatibilitate cu software-ul de analiză structurală. Această post-procesare include interpolarea sau netezirea datelor pentru a se asigura că acestea reprezintă cu exactitate realitatea fizică a geometriei deformate fără a introduce artefacte numerice.



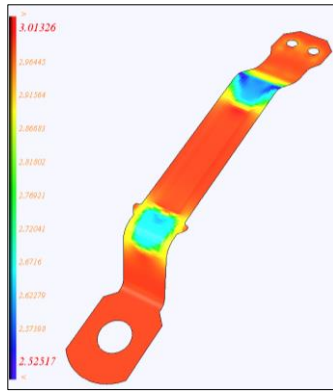


Fig. 16 Variația grosimii

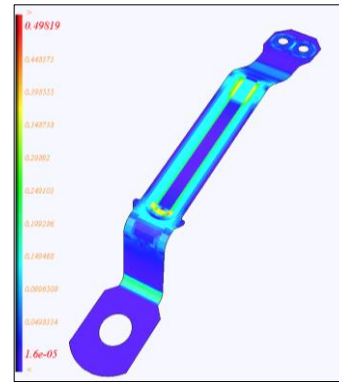


Fig. 17 Variația deformațiilor plastice

După simularea numerică procesului de deformare plastică la rece, a urmat analiza numerică a rezistenței la impact pentru același reper.

Pentru verificarea rezultatelor numerice cu cele experimentale, s-a recurs la instrumentarea pendului din **Error! Reference source not found.**, și este folosit pentru a genera șocuri mecanice controlate cu energii de 250 și 500 Jouli.



Fig. 18 Pendul instrumentat pentru încercări distructive dinamice

În figura 19 se poate observa că modelul care nu include tensiuni reziduale, supraestimează semnificativ forțele maxime cu aproximativ 30% comparativ cu datele de test. În urma analizării celor două modele numerice cu și fără includerea tensiunilor reziduale integrate din procesul de deformare plastică la rece, se aliniază mai îndeaproape cu vârful inițial de forță al datelor experimentale. Această supraestimare subliniază importanța contabilizării tensiunilor reziduale în simulări pentru a evita o proiectare mecanică mai conservativă, care ar putea duce la o formă constructivă supradimensionată.

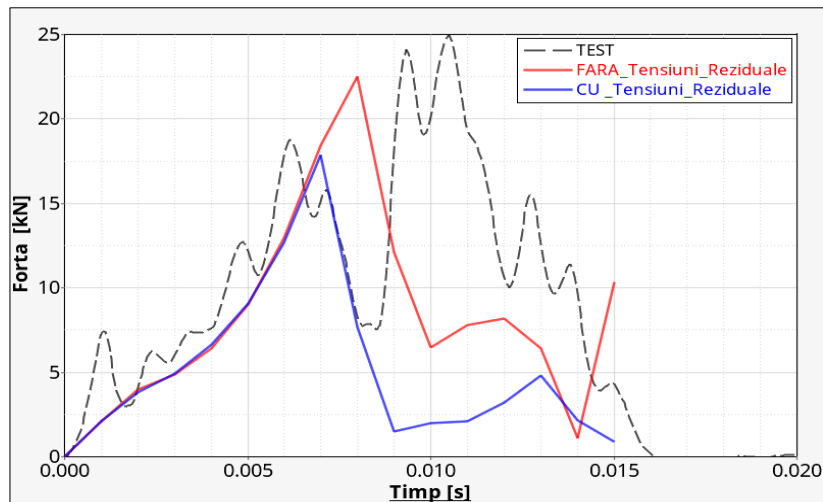


Fig. 19 Comparație între teste experimentale și simulările numerice

„Cauza principală a pentru care componentele încetează în a-și îndeplini funcția pentru care au fost realizate este oboseala materialului și uzura acumulată în timp, ca rezultat al stărilor de tensiune induse de vibrații” [9]. Tensiunile generate de vibrații provocă micro-fisuri și defecte structurale care nu sunt imediat evidente, dar care pot duce în timp la degradarea totală a materialului sau componentei. Pentru evaluarea comportamentului reperului în cauză la solicitări de oboseală cu cicluri multe de repetări, s-a recurs la o abordare hibridă. Aceasta implică testarea cu actuator electrodinamic [10], prin menținerea la rezonanță a reperului testat [11] (figura 20) și simulări numerice pentru determinarea câmpurilor de tensiune. Scăderea bruscă a frecvenței de rezonanță indică propagarea fisurii, și implică a modificării rigidității stucturii [12]. Astfel se poate ridica curba de oboseală (fig. 21), tensiuni - nr. de cicluri, folosind diferite frecvențe de rezonanță, variind greutatea din capătul liber al reperului testat. [13].

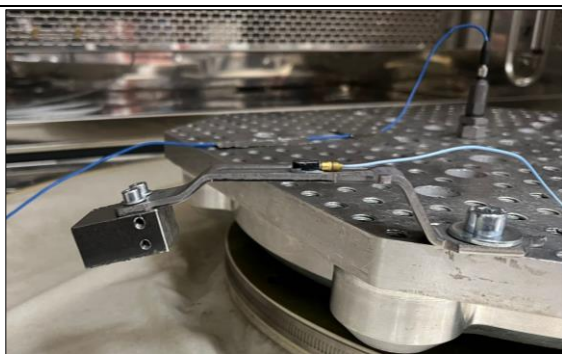


Fig. 20 Standul de încercare la oboseală cu număr ridicat de cicluri

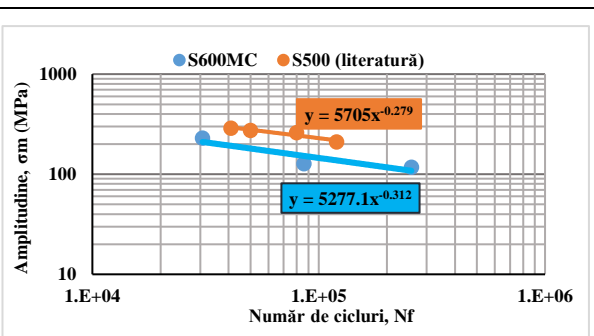


Fig. 21 Curba de oboseală obținută pe actuatorul electrodinamic pentru oțelul S600Mc, comparată cu o curbă de oboseală a oțelului S500 [10]

## 5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

În contextul acestei teze, am adresat necesitatea caracterizării anizotropiei oțelului S600MC, o temă de cercetare care prezintă provocări semnificative și aplicabilitate industrială largă. Principalele contribuții personale pe care le-am adus în acest domeniu sunt următoarele: Caracterizarea anizotropiei prin teste statice, prin utilizarea tehnicilor avansate de Corelație Digitală de Imagine (DIC) pentru a caracteriza comportamentul anizotrop al oțelului S600MC sub sarcini de tracțiune statică. Acest demers a permis o înțelegere mai profundă a răspunsului materialului la solicitări, evidențiind diferitele niveluri în funcție de direcțiile de laminare. De exemplu s-a arătat că pe direcția transversală, energia absorbită per unitatea de volum sau densitatea energiei de deformare 9% mai mică față de direcția de laminare. Pe baza acestor rezultate au fost construite curbele limită de formare (FLC) și curba de material elasto-plastice a oțelului, pe baza modelului Johnson-Cook, și au fost realizate simulări numerice corelate experimental.

Au fost efectuate încercări experimentale de încovoire în regim static și dinamic. În condițiile unui regim static, anizotropia oțelului studiat nu prezintă influență semnificativă asupra rezultatelor de încovoire. În cazul unui regim dinamic, s-a arătat că pe direcția transversală, perpendiculară pe direcția de laminare, capacitatea de absorție a energiei de impact este cu 16,5 % mai mică față de direcția de laminare. Pe baza încercărilor experimentale de impact Charpy și a modelelor numerice aferente, s-a calibrat un model de rupere ductilă, BIQUAD, care să redea mai precis modul de rupere ductilă și influența anizotropiei asupra capacității de absorbtie a energie de impact.

Cu baza proprietăților de material obținute pe epruvete, s-a trecut la performarea de încercări experimentale la nivel de reper. Astfel s-a simulat numeric procesul de fabricație prin deformare plastică la rece al reperului „suport centură de siguranță”, unde s-au putut cuantifica tensiunile și deformațiile plastice remanente. Aceste tensiuni reziduale au fost apoi incluse în modelul numeric folosit la solicitările dinamice prin impact.

S-a arătat că fără a implementa tensiunile remanente, simulările numerice supraestimează energia absorbită la impact, și nu reflectă realitatea, cu consecințe potențial periculoase.

Pentru solicitările dinamice, s-a instrumentat un pendul de impact cu senzori triaxiali de accelerație pentru a obține o verificare suplimentară asupra accelerațiilor dezvoltate în timpul impactului.

De-asemena s-a studiat și comportamentul oțelului și al reperului la solicitări dinamice induse prin vibrații armonice și aleatoare. Și în acest caz, s-a cunțificat anizotropia oțelului, prin valorile coeficientului de amortizare la diferite orientări, și s-au realizat modele numerice corelate experimental.

De-asemena au fost realizate teste de oboseală indusă prin vibrații armonice, și s-a trasat o curbă *tensiuni-nr. de cicluri până la rupere*, curbă ce a fost comparată cu cele disponibile în literatura de specialitate.

Contribuțiile mele evidențiază relevanța aprofundată a caracterizării anizotropiei în proiectarea și fabricația componentelor din oțel S600MC, oferind perspectivă și metodologii noi în acest domeniu de cercetare vital.

## 6. Bibliography

- [1] P. J. Withers, "Residual stress and its role in failure," *Reports on Progress in Physics*, vol. 70, no. 12, 2007.
- [2] W. T. S. S. C. B. J. A. Lankford, „New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets.,” *Trans. ASM*, vol. 40, p. 1197–1205, 1950.
- [3] R. Hill, „A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals,” *27 May 1948*, vol. 193, nr. 133, 1948.
- [4] M. Y. C. K. Y. M. B. J. H. Barlat F, „Yield function development for aluminum,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 45, nr. 11-12, pp. 1727-1763.
- [5] K. M. D. Pack, „Combined necking & fracture model to predict ductile failure with shell finite elements,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 182, pp. 32-51, 2017.
- [6] F. C. S. F. M. H. M. H. A. Andrade, „Estimation of stress triaxiality from optical measured Strain Fields,” in *12th European LS-DYNA Conference*, Koblenz, Germany, 2019.
- [7] Q. L. F. Liu, „Strain-rate effect on the compressive strength of brittle materials and its implementation into material strength model,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 130, pp. Pages 113-123,, 2019.
- [8] „[https://altair.com/docs/default-source/resource-library/hw\\_0000\\_datasheet\\_hypercrash\\_8.5x11\\_052019.pdf?sfvrsn=bb90a3d9\\_3](https://altair.com/docs/default-source/resource-library/hw_0000_datasheet_hypercrash_8.5x11_052019.pdf?sfvrsn=bb90a3d9_3),” 1 3 2024. [Interactiv].
- [9] *Mil-Std-810, Section 514.6*.
- [10] M. B. M. B. Benjamin Ellyson, „Characterization of bending vibration fatigue of SLM fabricated,” *International Journal of Fatigue*, vol. 99, pp. 25-34, 2017.
- [11] C. V. J. A. G.-J. C. Campos-Pozuelo, „Comparative study of the nonlinear behavior of fatigued and intact samples of metallic alloys,” *EEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 53, nr. 1, pp. 175-184, 2006.
- [12] J. S. M. C. M. B. Primož Ogrinec, „Vibration fatigue at half-sine impulse excitation in the time and frequency domains,” *International Journal of Fatigue*, vol. 123, pp. 308-317, 2019.
- [13] D. B. R. T. Davide Zanellati, „Vibration fatigue tests for tri-axis shaker: design of an innovative system for uncoupled bending/ torsion loading,” in *Procedia Structural Integrity*, Pisa, 2018.
- [14] S. Gothivarekar, C. J. Peña, S. Coppieters, R. Talemi și D. Debruyne, „Fatigue behaviour and lifetime prediction of cold-formed high strength steel,” in *Proceedings of the 22nd International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2019)*, Vitoria-Gasteiz, 2019.
- [15] H. G. L. Tomasz Trzepieciński, „Study of Material Anisotropy in Metal Forming Using Finite Element Methods,” *Anisotropy Research: New Developments*, November 2012.
- [16] D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu și T. Kuwabara, „Advances in anisotropy and formability,” *Mater Form*, vol. 3, pp. 165-189, 2010.
- [17] B. F. Cazacu O, „Generalization of Drucker’s yield,” *Mathematics and Mechanics of Solidsd*, vol.

6, nr. 6, pp. 613-630, 2001.

- [18] B. F. Cazacu O, „Application of representation theory to describe yielding of anisotropic aluminium alloys,” *International Journal of Engineering Science*, vol. 41, nr. 12, pp. 1367-1385, 2003.
- [19] K. H. R. D. Yuanxin Luo, „A new sheet metal forming system based on the incremental punching, part 1: modeling and simulation,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, nr. 5-8, pp. 481-491, 2010.