

UNIVERSITATEA din PITEȘTI
FACULTATEA de MECANICĂ și TEHNOLOGIE
Școala doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. SANDU Ionela Alina

TEZĂ DE DOCTORAT

- rezumat -

Conducător științific
Prof.univ.dr.habil.ing. TABACU Ștefan

Pitești

2020

UNIVERSITATEA din PITEȘTI
FACULTATEA de MECANICĂ și TEHNOLOGIE

Școala doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. SANDU Ionela Alina

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific

Prof.univ.dr.habil.ing. TABACU Ștefan

Mentori

Prof.univ.dr.ing. NICOLAE Viorel

Prof. univ.dr.habil.ing. POPA Dinel

Conf.univ.dr.fiz. DUCU Cătălin

Pitești

2020



UNIVERSITATEA din PITEȘTI
FACULTATEA de MECANICĂ și TEHNOLOGIE
Școala doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. SANDU Ionela Alina

TEZĂ DE DOCTORAT

***CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA DURATEI DE
VIAȚĂ A UNUI PRODUS METALIC, FUNCȚIE DE
PROPRIETĂȚILE MATERIALELOR,
TEHNOLOGIILE DE FABRICARE ȘI CONDIȚIILE DE
UTILIZARE.
APLICAȚIE: ANSAMBLUL BIELETĂ DE DIRECȚIE.***

Comisia de evaluare a tezei:

Președinte:	prof.univ.dr.ing. Viorel NICOLAE , Universitatea din Pitești
Conducător științific:	prof.univ.dr.habil.ing. Ștefan TABACU , Universitatea din Pitești
Referenți științifici:	prof.univ.dr.habil.ing. Ilie DUMITRU , Universitatea din Craiova prof.univ.dr.habil.ing. Dinel POPA , Universitatea din Pitești prof.univ.dr.habil.ing. Adrian ȘOICA , Universitatea „Transilvania” din Brașov

Cuprins

Structura și conținutul tezei de doctorat	6
1. Condiții generale de funcționare și stabilirea regimurilor de calcul pentru piesele și mecanismele automobilelor	9
1.1. Stările de încărcare și solicitare ale pieselor și mecanismelor automobilelor	9
1.2. Caracterul solicitărilor la care sunt supuse piesele și mecanismele automobilelor [3]	10
1.3. Calculul de rezistență	10
1.3.1. Calculul de rezistență la solicitări statice și solicitări dinamice tranzitorii	10
1.3.2. Calculul de rezistență la solicitări variabile periodice.....	11
1.3.3. Calculul de rezistență la solicitări variabile aleatoare	11
1.4. Stabilirea obiectivelor de cercetare ale tezei de doctorat	11
2. Stadiul actual al cercetărilor	13
2.1. Analiza oboselii.....	13
2.1.1. Curba S-N.....	13
2.1.2. Limita de durabilitate.....	13
2.1.3. Coeficienții de influență ai limitei de durabilitate	13
2.1.4. Tensiunea medie și amplitudinea tensiunii	14
2.1.5. Curbe de oboselă	14
2.1.6. Coeficientul de siguranță.....	14
2.2. Mecanica ruperii.....	14
3. Sistemul de direcție – sistem de siguranță activă a automobilului.....	16
3.1. Generalități.....	16
3.2. Bieleta de direcție.....	16
3.3. Ansamblu Bieletă – Construcție+asamblare	17
3.4. Analiza comportamentului dinamic al punții cu roți de direcție	17
3.4.1. Analiza comportamentului dinamic pe drum rectiliniu.....	17
3.4.2. Analiza comportamentului dinamic pe drum cu obstacole (denivelări).....	18
4. Caracterizarea materialului – cercetări experimentale și numerice.....	20
4.1. Solicitări dinamice întâlnite în piesele solicitate axial și multiaxial – Cercul lui Mohr.....	20
4.1.1. Starea de tensiuni în jurul unui punct.....	20
4.1.2. Coeficientul de triaxialitate	20
4.2. Alegerea materialului	21
4.3. Caracterizarea materialului prin metode și mijloace experimentale	21
4.3.1. Încercarea la tracțiune	22
4.3.2. Calibrarea curbei de material pentru modelul numeric	23
4.3.3. Modelul geometric al epruvetei.....	25
4.3.4. Metoda corelării imaginilor digitale.....	27
4.3.5 Analiza complexă.....	30
5. Analiza experimentală și numerică a Corpului Bieletă de Direcție	33

5.1. Metode experimentale pentru determinarea deformațiilor: Tensometria optică și tensometria electrorezistivă	33
5.2. Metode experimentale pentru determinarea deformațiilor: Tensometria optică și tensometria electrorezistivă – Rezultate experimentale.....	33
5.2.1. Tensometria optică	33
5.2.2. Modelare numerică.....	35
5.2.3. Tensometrie electrorezistivă.....	36
5.3. Metodă experimentală – Încercarea la oboseală.....	37
5.3.1. Montaj Ansamblu Bieletă de Direcție pe standul de oboseală	38
5.4. Analiza numerică în cazul deplasării autovehiculului pe un drum cu denivelări în condiții excepționale.....	39
5.5. Metoda elementului finit – Evaluarea secțiunii critice.....	40
5.6. Cauze înlocuire Ansamblu Bieletă de Direcție – în exploatare.....	43
6. Soluții tehnice pentru realizarea modelelor numerice	44
6.1. Analiza calității elementelor finite	44
6.2. Scalarea	45
6.3. Definirea structurii de referință	46
6.3.1. Introducere	47
6.3.2. Prezentarea soluției tehnice pentru optimizare.....	47
7. Concluzii finale, contribuții personale și perspective de cercetare	49
7.1. Concluzii finale	49
7.2. Contribuții personale.....	53
7.3. Perspective de cercetare	55
Bibliografie	56

Structura și conținutul tezei de doctorat

Teza de doctorat, CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA DURATEI DE VIAȚĂ A UNUI PRODUS METALIC, FUNCȚIE DE PROPRIETĂȚILE MATERIALELOR, TEHNOLOGIILE DE FABRICARE ȘI CONDIȚIILE DE UTILIZARE își propune, ținând seama de tendințele din domeniul siguranței active a automobilelor, prezentarea unei metodologii de proiectare capabilă să prezică condițiile de utilizare pornind de la specificațiile tehnice ale piesei analizate.

Modelul funcțional de cercetare analizat în cadrul tezei din punct de vedere al duratei de viață a fost reprezentat de Corpul Ansamblului Bieletă de Direcție, obținut prin forjare din materialul 30MnVS6, selectat în urma determinărilor importanței cercetării teoretice și experimentale a condițiilor de funcționare și a stărilor de solicitare ale pieselor și mecanismelor autovehiculelor, a pieselor din așa numitele sisteme de siguranță activă ale automobilelor – sistemul de direcție și sistemul de frânare.

Cercetările efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat au avut ca scop să răspundă următoarelor obiective generale:

- determinarea stadiului actual al cercetărilor în domeniul analizei fenomenului fizic al oboselii materialului;
- analiza mecanicii ruperii materialului;
- identificarea ansamblului constructiv al automobilului reprezentativ pentru studiu și anume Ansamblu Bieletă de Direcție;
- analiza pe modele numerice a stărilor de solicitare ale Corpului din ansamblul bieletă de direcție;
- selectarea materialului și cercetărilor experimentale și numerice pentru caracterizarea acestuia;
- analiza experimentală și numerică a piesei;
- soluții tehnice pentru optimizarea modelelor numerice.

Prezenta lucrare a fost menită să stabilească o procedură, prin testare încrucișată, pentru validarea modelelor numerice dezvoltate pentru stabilirea duratei de viață și a condițiilor de funcționare a unui model funcțional de cercetare.

Lucrarea este structurată pe capitole, astfel: în primul capitol este definită nevoia cercetării, în capitolul al doilea fiind prezentat stadiul actual al cercetărilor (analiza oboselii și mecanica ruperii).

În capitolul al treilea a fost prezentat sistemul automobilului în componența căruia intra piesa analizată (sistemul de direcție – sistem de siguranță activă). Pentru identificarea solicitărilor mecanice la care este supusa piesa care constituie obiectul principal de studiu a fost elaborat și analizat un model dinamic al punții cu roți de direcție.

Capitolul patru al lucrării, prezintă o procedură complexă de caracterizare a materialului prin cercetări experimentale care cuprinde încercarea la tracțiune și studiul influenței stărilor particulare de tensiune asupra limitelor de rupere a materialului cu ajutorul epruvetelor specializate. Informațiile au fost obținute prin evaluare directă și cu ajutorul metodei corelării imaginilor digitale. Rezultatele obținute sunt utilizate pentru definirea unui model al materialului aplicat în calculul numeric.

Capitolul cinci, dedicat analizei experimentale și numerice a Corpului Bieletă de Direcție, prezintă un concept coerent de validare a unui proces de proiectare cunoscând materialul și performanțele acestuia. Metodele de analiză folosite au fost:

- a) două metode experimentale, nedistructive, pentru determinarea deformațiilor:
 - tensometria optică (metoda D.I.C.);
 - tensometria electrezistivă (mărci tensometrice);
- b) o metodă numerică (analiză cu element finit) de validare a unei piese proiectate, din punct de vedere al duratei de viață, analiza cu element finit reprezentând unul din puținele instrumente ce pot oferi informații despre triaxialitate;
- c) o metodă experimentală (încercarea la oboseală), realizată cu scopul de a valida piesa;

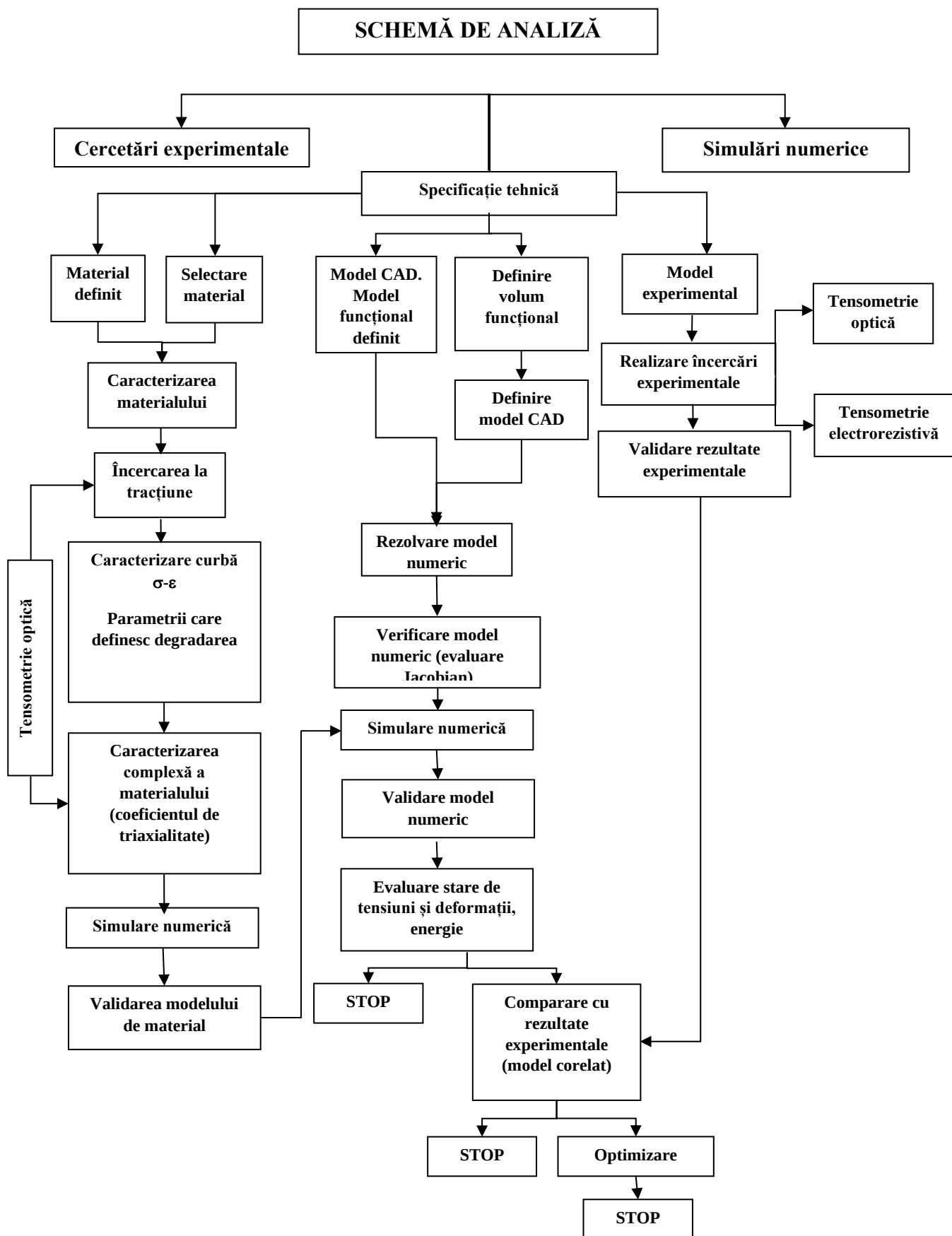
prin aceste metode de analiză fiind atins scopul acestei teze de a dezvolta un model matematic cu ajutorul analizei numerice și al determinărilor experimentale, capabil să prezică durata de viață a acestuia pentru modelul funcțional de cercetare (Corp – Ansamblu Bieletă de Direcție). Modelul numeric a fost dezvoltat pornind de la desenul funcțional, modelul CAD și specificațiile tehnice ale părții analizate.

În capitolul șase „Soluții tehnice pentru definirea modelelor numerice”, sunt discutate constrângerile de reutilizare impuse (exclusiv cu elemente finite hexaedrale generate prin mijloace automate) analizei modelului numeric, pentru forța ce determină exclusiv deformarea piesei exclusiv în domeniul elastic ($F=10\text{kN}$).

Algoritmul de predimensionare implementat s-a bazat pe îndepărtarea elementelor în funcție de starea de tensiune identificată în fiecare element al domeniului de calcul. În urma analizei formelor intermediare, prin varierea valorii factorului de amplificare (ξ^α) se determină forme pentru analiza particularizată. Prin aplicarea acestui algoritm au fost identificate forme geometrice similare celor care definesc piesa de tip Corp Bieletă de Direcție.

Ca o prezentare generală a rezultatelor se constată că prin teză a fost realizată o conexiune interdisciplinară între metodele experimentale și cele numerice de caracterizare. În urma analizelor efectuate s-a putut observa că rezultatele obținute sunt corelate, validându-se reciproc.

În urma activităților și analizelor realizate, a fost atins scopul tezei de a dezvolta un concept coerent pentru validarea unui proces de proiectare cunoscând materialul și performanțele acestuia (nu în mod special pentru validarea piesei analizate în lucrare).



1. Condiții generale de funcționare și stabilirea regimurilor de calcul pentru piesele și mecanismele automobilelor

Competiția acerbă la care sunt supuși fabricanții de autovehicule și în mod particular constructorii celor destinate transportului de persoane caracterizează un mediu concurențial extrem de dinamic în ceea ce privește cererea pieței și cadrul legislativ și impune ca pe o necesitate imperativă reducerea timpului de trecere de la idee la produs și o creștere a flexibilității activităților de dezvoltare și producție a noilor tipuri de autovehicule.

Tehnicile de calcul ce se implementează sunt axate pe trei idei principale:

- realizarea de modele virtuale în fazele de ante-proiect și concepție a produsului, ceea ce permite o reducere considerabilă a costurilor de fabricație a prototipurilor precum și scurtarea termenelor de dezvoltare;
- realizarea de bucle scurte între echipele de ingineri de calcul și echipele de concepție în toate fazele derulării proiectului, făcând astfel o aproximare mult mai exactă asupra piesei, respectiv asupra autoturismului cerut de client;
- folosirea, gestionarea și crearea de baze de date precum și realizarea unor metodologii care se supun mai multor tipuri de proiecte. Acest lucru realizează o comunalizare de practici care asigură reciprocitatea expertizei echipelor de calcul și concepție;

Simularea virtuală este realizată ținând cont de trei etape majore:

- realizarea și optimizarea procesului de concepție prin utilizarea comună a aceluiași pachet de bază pentru realizarea virtuală a pieselor de concepție.
- configurarea și standardizarea unor baze comune pentru tipurile de calcule, precum și a metodologiei folosite, aspect care face ca aceste baze de date să fie ipoteze de plecare pentru a înțelege alegerile făcute și a câștiga timp pentru viitoarele dezvoltări;
- gestionarea și optimizarea resurselor de calcul cu scopul de a câștiga în eficacitate și a multiplica numărul de simulări, fapt realizat cel mai ușor prin simulări virtuale cu modelizări diferite în paralel.

1.1. Stările de încărcare și solicitare ale pieselor și mecanismelor automobilelor

Automobilul este un complex de piese organizate în substructuri succesive sau în paralel, a căror funcționare depinde de interacțiunea dintre ele sau cu mediul exterior. În timpul proceselor de lucru aceste substructuri suferă modificări continue sau discrete, trecând astfel prin diverse stări care reprezintă abateri mai mult sau mai puțin importante de la starea inițială. Astfel de modificări sunt de natură dimensională și de formă mecanică (densitate, elasticitate), de structură chimică, fizică, electrice

sau complexe. Acestea se pot schimba cantitativ prin schimbarea valorică a unor parametri [3] care caracterizează starea organului sau structurii respective (sistem, instalație, mecanism etc.), numindu-se parametrii de stare.

Asupra sistemelor automobilului și a automobilului ca întreg acționează:

a) forte exterioare:

- forte din suprafețele de contact ale organelor de rulare cu solul;
- rezistența aerului în mișcare relativă față de autovehicul;
- forte de impact cu alte corpuri.

b) forte și momente interne:

- forța de inerție;
- momentul motor;
- momentul de frânare.

1.2. Caracterul solicitărilor la care sunt supuse piesele și mecanismele automobilelor [3]

Regimurile de funcționare ale sistemelor automobilelor pot fi dinamice tranzitorii și dinamice stabilizate.

Regimurile dinamice tranzitorii sunt caracterizate prin variații cu viteză mare în timp și în limite largi ale forțelor și momentelor care acționează asupra pieselor. Aceste regimuri de funcționare sunt întâlnite la pornirea de pe loc și la demarare, în timpul frânărilor bruște, la accidente când nu are loc decuplarea ambreiajului, la trecerea peste obstacole, denivelări mari și la suportarea unor perturbații mari, accidentale.

Regimurile dinamice stabilizate se caracterizează prin variații în domenii relativ înguste, centrate în jurul valorii medii, ale forțelor și momentelor care solicită subansamblurile automobilului, caracterul de variație a eforturilor unitare putând fi periodic sau aleator.

1.3. Calculul de rezistență

1.3.1 Calculul de rezistență la solicitări statice și solicitări dinamice tranzitorii

Evaluarea rezistenței pieselor supuse la astfel de solicitări are scopul de:

- dimensionare – prin care, pornind de la forțele și momentele care acționează asupra pieselor, se alege sau se determină rezistența admisibilă, pentru determinarea dimensiunii secțiunii dorite;
- verificare – prin care, pentru forte și momente date, știind dimensiunile piesei în secțiunea de verificat, se determină efortul unitar efectiv, real, care se compară cu efortul unitar admisibil al materialului utilizat, sau se determină coeficientul de siguranță c , al piesei, ca raport între efortul unitar de curgere/ rupere și efortul unitar real.

1.3.2 Calculul de rezistență la solicitări variabile periodice

Metoda de calcul la solicitări variabile periodice permite luarea în considerare, dar nu în totalitate, a influenței condițiilor de exploatare. Această metodă presupune:

- predimensionarea pieselor sau a mecanismelor, în comparație cu alte construcții similare sau printr-un calcul aproximativ bazat pe alegerea unei rezistențe admisibile;
- determinarea coeficientului de siguranță admis ca limită, în funcție de rolul și cerințele față de piesa sau față de mecanismul calculat;
- stabilirea coeficientului de siguranță real pentru piesa sau mecanismul considerat și compararea lui cu cel admis.

1.3.3 Calculul de rezistență la solicitări variabile aleatoare

Pentru definirea în exploatare a pieselor, se pornește de la curba Wöhler. Metodele tradiționale nu includ în procesul de proiectare solicitările reale la care sunt supuse piesele în exploatare, astfel neputând fi corect estimată durata de funcționare a acestora, pentru care solicitările se află sub sau peste valoarea rezistenței la oboseală. Efectul produs de această estimare poate fi acela de supradimensionare, piesa rezistând la un număr infinit de cicluri de funcționare, ajungându-se astfel la un consum nerațional/nejustificat de materii prime sau se pot realiza piese subdimensionate, care vor ceda în exploatare [6].

1.4. Stabilirea obiectivelor de cercetare ale tezei de doctorat

Din prezentările anterioare se desprinde importanța cercetării teoretice și experimentale a condițiilor de funcționare și a stărilor de solicitare ale pieselor și mecanismelor autovehiculelor, cu atenție deosebită asupra pieselor care sunt în legătură directă și nemijlocită cu siguranța automobilului, respectiv piesele din așa numitele sisteme de siguranță activă ale automobilelor – sistemul de direcție și sistemul de frânare – care în cadrul regimurilor de funcționare ale automobilului, la interacțiunea dintre ele sau cu mediul exterior, suferă transformări reversibile sau ireversibile, normale sau accidentale, care duc la deprecierea capacității sale calitative. Unul din rezultatele acestor transformări ireversibile este oboseala materialelor.

În conformitate cu denumirea tezei de doctorat, CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA DURATEI DE VIAȚĂ A UNUI PRODUS METALIC FUNCȚIE DE PROPRIETĂȚILE MATERIALELOR, TEHNOLOGIILE DE FABRICARE ȘI CONDIȚIILE DE UTILIZARE și ținând seama de tendințele din domeniul siguranței active a automobilelor, lucrarea își propune conceperea unei metodologii de proiectare capabilă să prezică durata de viață a acestora, pornind de la desenul funcțional, modelul CAD și specificațiile tehnice ale piesei analizate.

În acest scop se stabilesc următoarele obiective:

- determinarea stadiului actual al cercetărilor în domeniul analizei fenomenului fizic al oboselii materialului;
- analiza mecanicii ruperii materialului;

- identificarea și descrierea ansamblului constructiv al automobilului reprezentativ pentru studiu și anume Ansamblul Bieletă de Direcție;
- analiza pe modele numerice a stărilor de solicitare ale Corpului Bieletă de Direcție;
- selectarea materialului și cercetările experimentale și numerice pentru caracterizarea acestuia;
- analiza experimentală și numerică a piesei (Corp Bieletă de Direcție);
- soluții tehnice pentru optimizarea modelelor numerice.

Prezenta lucrare este menită să stabilească o procedură, prin testare încrucișată, pentru validarea modelelor numerice dezvoltate pentru stabilirea duratei de viață și a condițiilor de funcționare a unui model funcțional de cercetare. Aceasta a fost structurată în șase capitole la care se adaugă un capitol de concluzii finale, contribuții personale și perspective de cercetare.

2. Stadiul actual al cercetărilor

2.1. Analiza oboselii

În general, analiza oboselii (*eng.* fatigue analysis – F.A.) se referă la două metodologii:

- solicitare-durată de viață (*eng.* stress-life) sau metoda S-N;
- deformația locală (*eng.* local strain) sau metoda e-N.

De asemenea pentru analiza oboselii se folosește ca metodă și mecanica ruperii.

Cu ajutorul analizei numerice modelul funcțional de cercetare capabil să prezică durata de viață a acestuia, a fost dezvoltat pornind de la desenul funcțional modelul CAD și specificațiile tehnice ale piesei analizate.

2.1.1. Curba S-N

Limita de oboseală sau de duranță a unui material este definită ca amplitudinea maximă a solicitării alternative/ inverse pe care specimenul standard o poate suporta pentru un număr nelimitat de cicluri fără cedare prin oboseală. Rezultatele acestor teste sunt reprezentate grafic prin intermediul curbei S-N, aceasta fiind reprezentarea grafică a solicitării față de numărul de cicluri de solicitare [16].

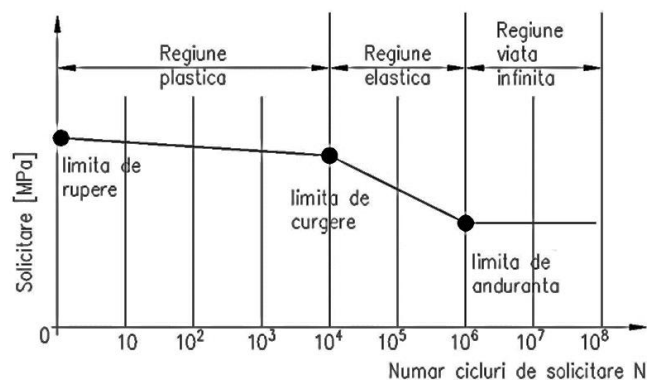


Figura 2.1. Regiuni curbă S-N

2.1.2. Limita de duranță

Sunt utilizate două notații separate referitoare la limita de duranță (S'_e) și (S_e), unde:

- (S'_e) limita la duranță;
- (S_e) limita la duranță modificată.

2.1.3. Coeficienții de influență ai limitei de duranță

Experimentele de oboseală presupun cele mai bune circumstanțe pentru promovarea duratei mari de viață. Această situație nu poate fi garantată pentru aplicațiile de proiectare, astfel încât limita de duranță a componentei trebuie modificată sau redusă din limita maximă de duranță a materialului.

a) Coeficientul de finisare a suprafeței

- b) Coeficientul de mărime/dimensiune
- c) Coeficientul de fiabilitate
- d) Coeficientul ce ține cont de concentratorii de tensiune [21], [22]

2.1.4. Tensiunea medie și amplitudinea tensiunii

Atunci când o piesă este supusă unor sollicitări fluctuante (variabile), există întotdeauna o tensiune medie σ_m și o amplitudine a tensiunii σ_a [20].

2.1.5. Curbe de oboseală

Diagrama de oboseală, pentru un caz general este prezentată în Figura 2.2, în care pe ordonată este reprezentată limita de curgere (S_{yt}) iar pe abscisă limita maximă de curgere (S_{ut}).

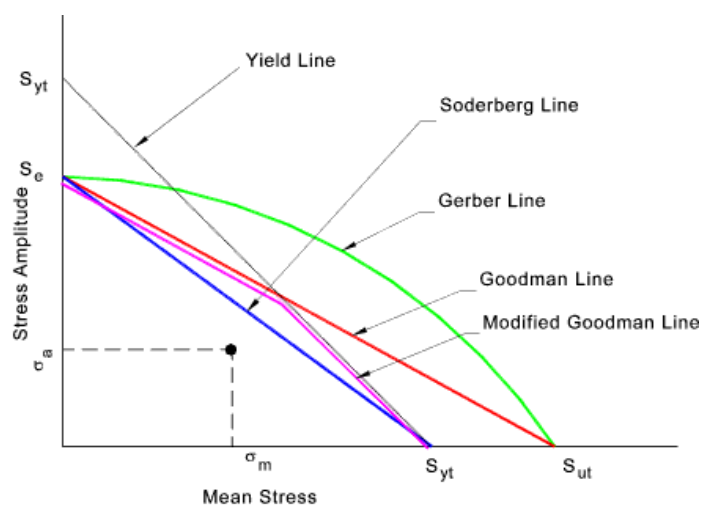


Figura 2.2. Curbe de oboseală [24]

Se propun diferite criterii pentru definirea zonei de siguranță și a zonei de rupere. Acestea includ:

- a) Curba Gerber (Gerber Line);
- b) Curba Goodman (Goodman Line);
- c) Curba Soderberg (Soderberg Line);
- d) Curba de fluaj (Yield Line);
- e) Curba Goodman modificată (Modified Goodman Line).

2.1.6. Coeficientul de siguranță

Coeficientul de siguranță este definit de relația:

$$\frac{k_f \cdot \sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = \frac{1}{k_{fs}} \quad (2.19)$$

Goodman a considerat că limitele curbei Soderberg sunt conservative și a extins zona de siguranță pentru sollicitarea constantă de la $\frac{\sigma_m}{S_{yt}}$ la $\frac{\sigma_m}{S_{ut}}$.

2.2. Mecanica ruperii

Conform principiului volumului constant al materialului, în urma încercării la tracțiune, epruveta va avea același volum, însă va fi mai lungă și mai subțire, deformarea fiind neuniformă. Din această cauză apar diferențe între valorile măsurate și cele reale, pentru care se fac corecții.

Fractografia este termenul inventat de Carl A. Zapffe în anul 1944, în urma descoperirii sale legate de depășirea a dificultății de a aduce lentila unui microscop suficient de aproape de suprafața zimțată a unei rupturi, pentru a dezvălui detaliile sale în interiorul granulelor individuale. Scopul fractografiei este de a analiza trăsăturile rupturii și de a încerca să coreleze topografia suprafeței de ruptură cu cauzele și/sau mecanismele de bază ale acesteia.

3. Sistemul de direcție – sistem de siguranță activă a automobilului

3.1. Generalități

Sistemul de direcție reprezintă interfața cea mai sensibilă dintre conducătorul automobilului și automobil. În ziua de azi, sistemul de direcție trebuie să îndeplinească standarde foarte exigente; în primul rând acesta trebuie să îndeplinească funcții multiple pentru a oferi comoditate în manevrarea autoturismului. În al doilea rând, trebuie să ofere conducătorului auto controlul activ asupra configurației traiectoriei și nu în ultimul rând să fie fiabil în timp.

Sistemul de direcție asigură virarea roților de direcție (Figura 3.1), la deplasarea automobilului pe traiectorii curbilini sau păstrarea poziției acestora la mersul în linie dreaptă. Virarea roților constă în rotirea acestora în planul drumului în jurul unei axe verticale.

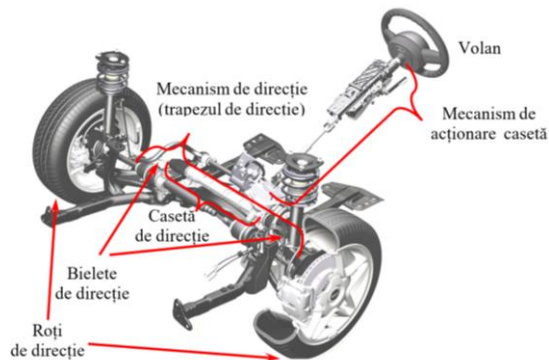


Figura 3.1. Elemente componente principale ale sistemului de direcție

3.2. Bieleta de direcție

Bieleta de direcție (Figura 3.2), este o unitate funcțională din structura mecanismului de direcție, cu funcție cinematică de bielă, prin intermediul căreia mișcarea de translație a cremalierei este transformată în mișcare de virare a roților prin rotirea acestora în jurul pivoților punții.

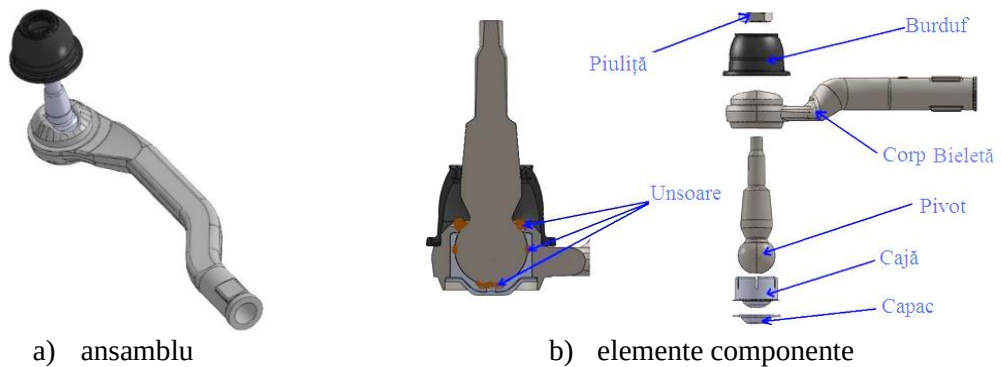


Figura 3.2. Ansamblu Bieleță de Direcție

3.3. Ansamblu Bieleță – Construcție+asamblare

Elementele componente ale Ansamblului Bieleță sunt obținute prin diferite procedee de fabricare.

A. Corp Bieleță

B. Cajă

C. Pivot

D. Capac

E. Burduf

F. Arc

G. Asamblare

3.4. Analiza comportamentului dinamic al punții cu roți de direcție

Pentru analiza comportamentului dinamic al punților cu roți de direcție, s-a avut în vedere o punte cu roți independente ghidate printr-un mecanism patrulater de tipul manivelă și culisă oscilantă, mecanism cunoscut sub denumirea de punte tip McPherson. În Figura 3.4 sunt prezentate variante constructive de punți cu roți de direcție ghidate prin mecanisme tip McPherson, evidențiindu-se pozițiile bielețelor de direcție.



Figura 3.4. Punte tip McPherson

Studiul a fost efectuat pentru o punte tip McPherson, având în vedere calitățile constructive și funcționale dintre care menționăm: simplitate constructivă, cinematică corectă a roților de direcție, mase și dimensiuni minime (puntea este practic generalizată în construcția de autoturisme).

3.4.1. Analiza comportamentului dinamic pe drum rectiliniu

Conform elementelor componente ale sistemului de direcție aflate în legătură nemijlocită cu roțile de direcție ghidate prin punte tip McPherson, în vederea determinării forțelor din Ansamblul Bieleță de Direcție, s-a construit modelul numeric al mecanismului de direcție (Figura 3.5) la deplasarea pe un drum rectiliniu orizontal.

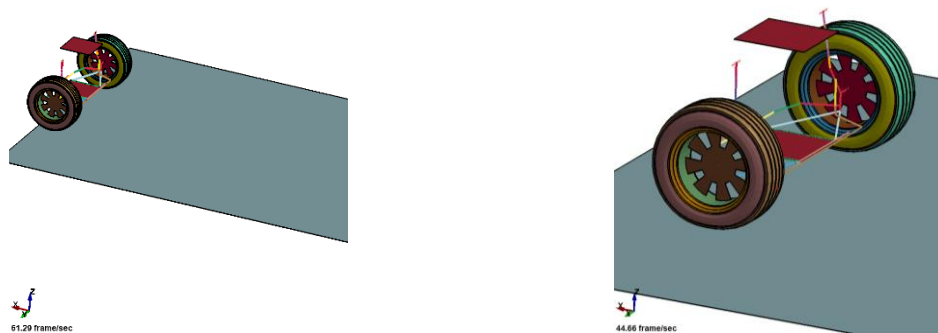


Figura 3.5. Model numeric al mecanismului de direcție – drum rectiliniu orizontal

În primă situație rezolvarea modelului numeric a fost făcută cu LS-Dyna. Au fost adăugate mase și arcuri cu rigidități echivalente materialului autovehiculului, iar roțile au fost considerate elastice – umflate la 2,2 bari.

F_Y este forța ce interesează cel mai mult, fiind cea care acționează în direcție transversală. Această forță este reprezentată grafic în Figura 3.8.

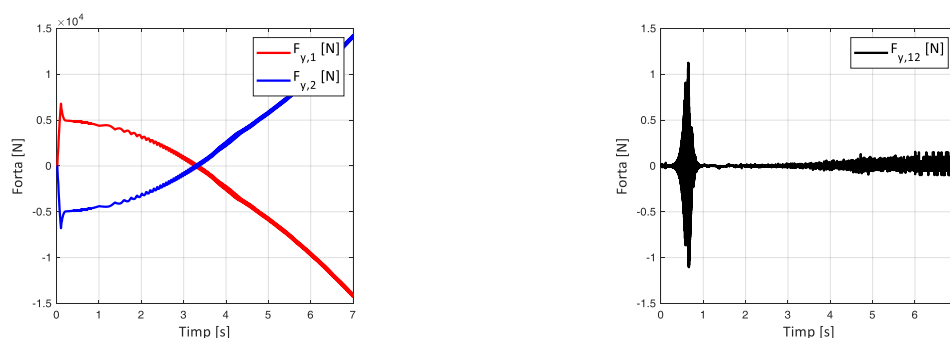


Figura 3.8. Reprezentare grafică – F_Y

3.4.2. Analiza comportamentului dinamic pe drum cu obstacole (denivelări)

În acest caz, pentru analiză, s-a considerat deplasarea rectilinie cu rularea unei roți pe cale orizontală, iar cea de-a doua roată pe cale de rulare cu denivelări (obstacole). Modelul numeric al schemei cinematice pentru această situație este ilustrat în Figura 3.10.

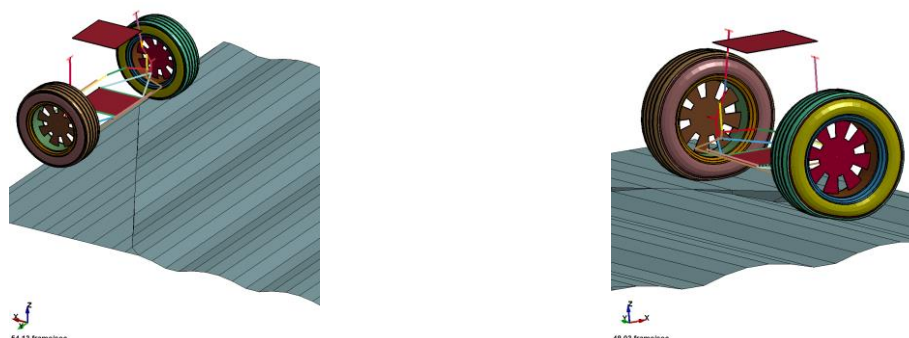


Figura 3.10. Model numeric al mecanismului de direcție la rularea rectiline cu o roată pe drum orizontal și cealaltă pe drum cu denivelări

Se urmărește, în acest caz, variația vitezei în timpul dat.

În cazul deplasării pe o cale de rulare cu denivelări pronunțate cu o viteză $v = 7\text{ m/s}$ apar valori mari ale forței F_Y , (mai mari de 15.000N conform cu Figura 3.13).

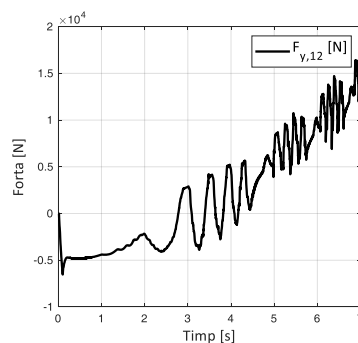
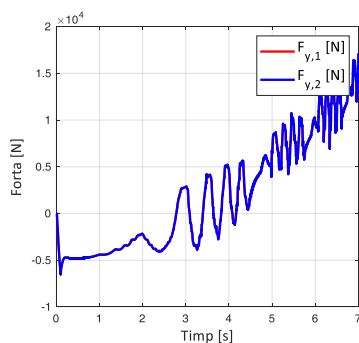
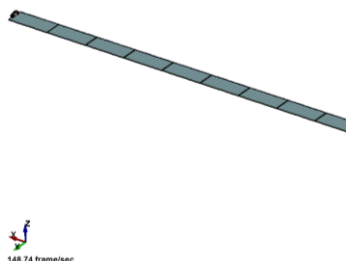


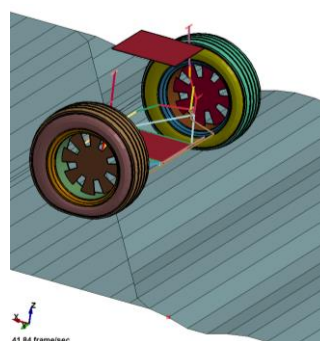
Figura 3.13. Valori calculate – F_Y

Pentru a găsi o soluție în cazul unei situații în care să fie posibilă înregistrarea unor valori excepționale ale forțelor, a fost extins modelul de calcul, ajungându-se la viteză de deplasare pentru un drum cu denivelări de 17m/s .



148.74 frame/sec

a) Porțiuni succesive ale căii de rulare



41.84 frame/sec

b) Porțiune a căii de rulare

Figura 3.15. Model numeric al sistemului de direcție – o roată pe drum rectiliniu orizontal și una pe drum extins cu denivelări

În Figura 3.18 se poate observa valoarea forței pe axa Y.

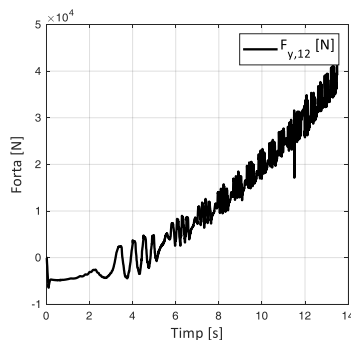
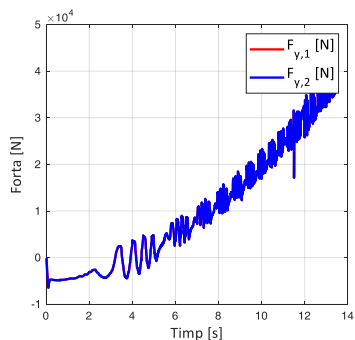


Figura 3.18. Valori calculate F_Y ($v = 17\text{m/s}$)

În situațiile prezentate, nu au fost luate în calcul și restul componentelor sistemului de direcție. De exemplu, în cazul deplasării cu viteze mari pe un drum cu denivelări, există posibilitatea îndoirii jantei.

4. Caracterizarea materialului – cercetări experimentale și numerice

4.1. Solicitări dinamice întâlnite în piesele solicate axial și multiaxial – Cercul lui Mohr

4.1.1. Starea de tensiuni în jurul unui punct

Legăturile fizice de material care alcătuiesc un solid aflat sub acțiunea unui sistem arbitrar de încărcări mecanice sunt puse la încercare cu o intensitate (tensiune mecanică) ce depinde de tipul și de nivelul solicitărilor care se produc, dar și de poziția, în volumul corpului, a punctului în care se face analiza, precum și de direcția pe care se cuantifică tensionarea materialului. Unitatea de măsură a tensiunii este [MPa] ($1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2$), fiind studiate componentele sale: normală (σ) și tangențială (τ), pe planul pe care aceasta acționează.

4.1.2. Coeficientul de triaxialitate

Starea de solitare dintr-un material poate fi caracterizată prin coeficientul de triaxialitate η . Triaxialitatea are o mare influență asupra deformațiilor plastice pe care materialul le poate prelua înainte de apariția ruperii.

Factorul de triaxialitate η , este definit ca raportul dintre tensiunea hidrostatică (σ_h) și tensiunea echivalentă von Misses (σ_m) [37], [38], [39], [40], :

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} \quad (4.15)$$

A. Solicitarea la întindere (tracțiune)

Atunci factorul de triaxialitate este:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} = \frac{\frac{\sigma}{3}}{\sigma} = \frac{1}{3} = 0,333$$

B. Solicitarea la întindere biaxială

Atunci factorul de triaxialitate este:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} = \frac{\frac{\sigma}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}\sigma} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

C. Solicitarea de forfecare

Factorul de triaxialitate este:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} = \frac{0}{\sqrt{3} \cdot \tau} = 0$$

D. Solicitarea combinată de întindere și forfecare

Atunci, factorul de triaxialitate este:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} = \frac{\frac{\sigma}{3}}{\sqrt{\sigma^2 + 2 \cdot \tau^2}}$$

E. Solicitarea de compresiune

Atunci, factorul de triaxialitate este:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_m} = \frac{-\frac{\sigma}{3}}{\sigma} = -\frac{1}{3} = -0,333$$

4.2. Alegerea materialului

Selecția materialelor din care pot fi realizate elementele componente ale modelului funcțional de cercetare se va face astfel încât acestea să asigure condițiile de prelucrabilitate, iar proprietățile acestora să fie în conformitate cu cerințele de utilizare, acestea reprezentând principalele criterii de selecție.

Așa cum a fost stabilit anterior în cadrul acestei teze modelul funcțional de cercetare este reprezentat de Corpul Bieletă al Ansamblului Bieletă de Direcție, componentă a sistemului de direcție.

În cadrul tezei materialul analizat și caracterizat este oțelul microaliat 30MnVS6.

4.3. Caracterizarea materialului prin metode și mijloace experimentale

Un obiectiv enunțat al acestei lucrări a constat în determinarea unui model al materialului pentru utilizarea în cadrul procesului de simulare numerică [47]. Pentru a furniza date credibile modelului de material, rezultatele numerice au fost corelate cu datele obținute pe cale experimentală.

Validarea metodelor numerice aplicate unui model de material s-a realizat prin caracterizarea materialului utilizându-se următoarele metode de caracterizare:

- încercarea la întindere (tracțiune);
- tehnica corelării de imagini digitale (D.I.C – Digital Image Correlation)

În urma realizării probelor de tracțiune s-a urmărit trasarea curbelor caracteristice ale materialului, prin exprimarea legăturii grafice dintre: forță-deplasare și tensiune-deformare relativă (curbă măsurată și curbă reală).

Metoda corelării imaginilor digitale (D.I.C.) reprezintă o tehnică optică noncontact, pentru măsurarea deformației specifice. Pentru captarea imaginilor epruvetelor testate și analizate prin această metodă s-a folosit o cameră digitală Nikon echipată cu lentile macro, utilizându-se pentru interpretarea rezultatelor softul DigiCamControl (www.digicamcontrol.com).

4.3.1. Încercarea la tracțiune

A. Metodă

Încercarea mecanică de rezistență se execută pe piese de dimensiuni și forme standardizate, numite epruvete (realizate din materialul analizat). Astfel, epruveta reprezintă partea din proba de tracțiune, de formă și dimensiuni standardizate, adusă în stare prescrisă în standarde pentru a fi supusă încercării. Acestea se execută din probele de material numai prin așchiere cu regimuri de lucru care să nu producă ecruisarea sau încălzirea excesivă a metalului.

B. Pregătirea epruvetelor

Pentru orice tip de încercare efectuată este necesară o etapă preliminară, de pregătire, această etapă fiind una de bază pentru asigurarea desfășurării corespunzătoare a încercării și pentru obținerea unor rezultate concludente. Din cadrul acestei etape fac parte următoarele activități principale:

- selectarea materialului analizat;
- stabilirea modului de lucru;
- selectarea instrumentelor folosite pentru analiză;
- stabilirea parametrilor de testare și a parametrilor urmăriți;
- dimensionarea epruvetelor.

Determinarea proprietăților mecanice ale materialelor în urma încercărilor trebuie să se facă conform unor norme/ standarde/ proceduri etc.

Conform celor menționate anterior, pentru ca rezultatele încercărilor la tracțiune să fie comparabile este necesar ca epruvetele să respecte anumite condiții de formă, dimensiuni și prelucrare. Astfel în cadrul acestei teze au fost folosite epruvete dimensionate conform ASTM E8 [56] (Figura 4.7): epruvete plate → materialul caracterizat: 30MnVS6 conform DIN EN 10267 [57], [58].

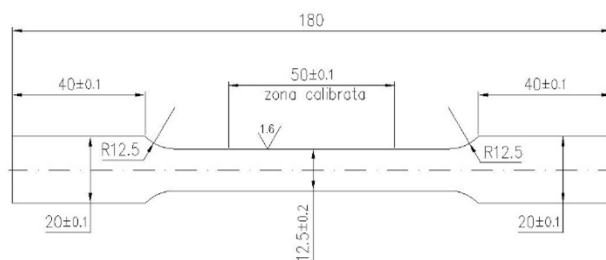


Figura 4.7. Dimensiuni epruvete analizate

C. Condiții de încercare

Încercările de tracțiune au fost realizate în cadrul laboratorului din Centrul de Cercetare „Ingineria Automobilului” al Universității din Pitești [59], la temperatura ambiantă.

În următoarele imagini din Figura 4.8 sunt prezentate epruvetele analizate înainte și după testare, prinderea acestora între bacurile mașinii de încercat și modul de montare al extensometrului pentru realizarea încercării.

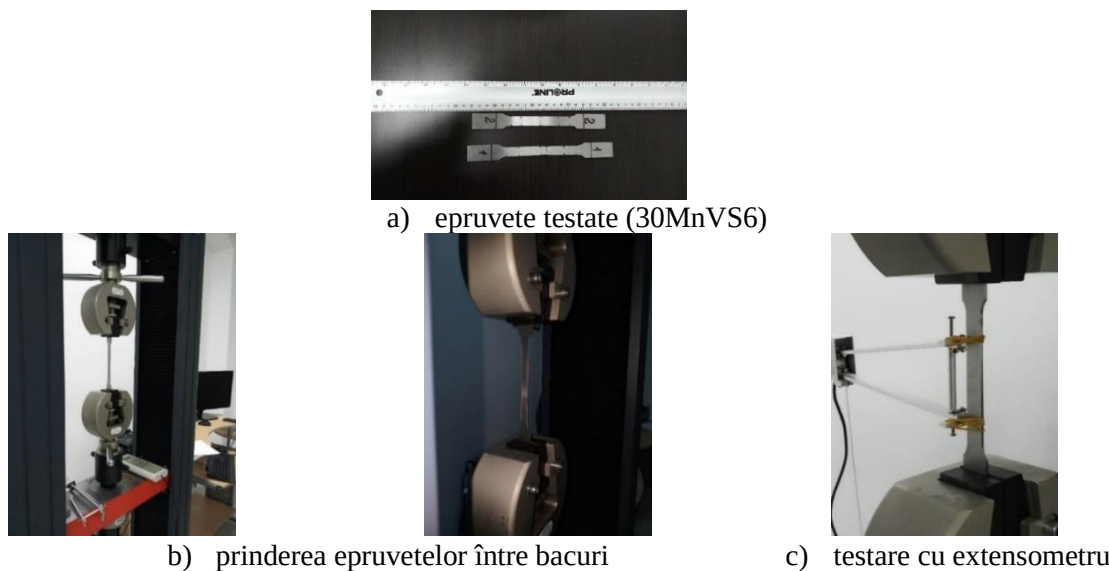


Figura 4.8. Încercarea la tracțiune

D. Rezultate

În urma realizării probelor de tracțiune au fost trasate curbele caracteristice ale materialului, prin exprimarea legăturii grafice dintre: forță-deplasare și tensiune-deformare relativă (curbă măsurată și curbă reală). Astfel, rezultatele măsurate obținute prin încercarea la tracțiune pentru setul de probe realizate pe epruvete din materialul 30MnVS6 sunt prezentate în Figura 4.9.

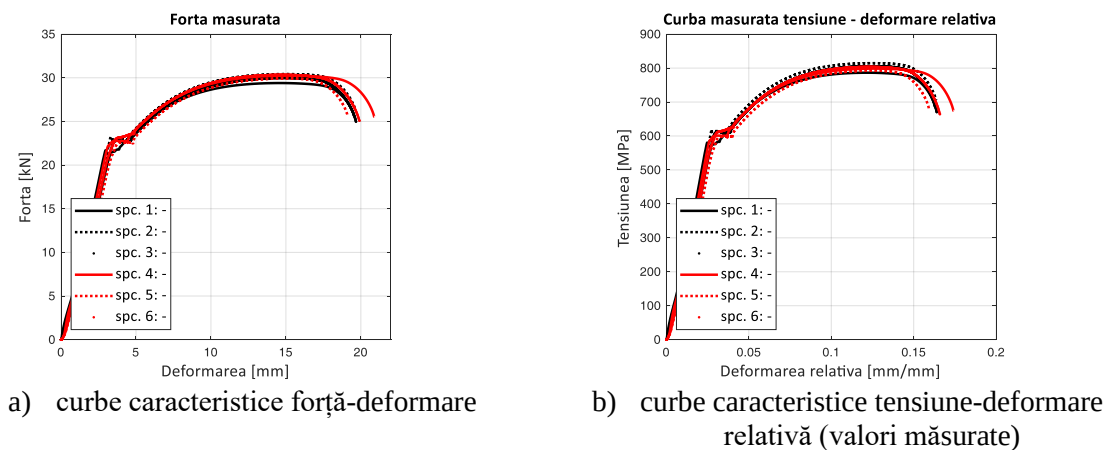


Figura 4.9. Rezultate obținute experimental

4.3.2. Calibrarea curbei de material pentru modelul numeric

Este necesar să se calibreze curba de material, iar pentru această calibrare, din setul celor șase epruvete testate s-a extras rezultatul obținut pentru epruveta (proba) numărul 2 (Figura 4.12).

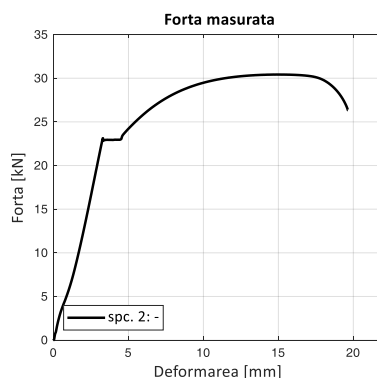
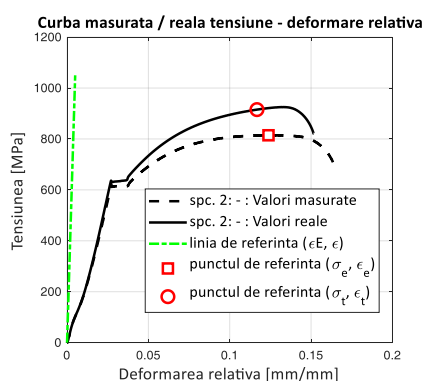
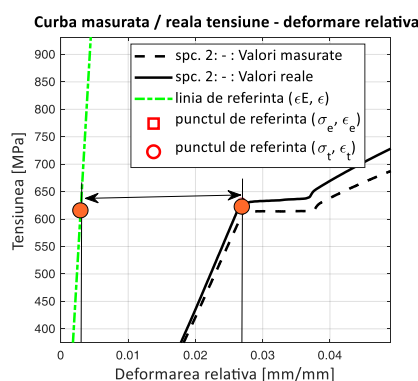


Figura 4.12. Curbă caracteristică forță-deformare pentru epruveta numărul 2

În următorul grafic (Figura 4.13 a) sunt reprezentate suprapus cele două curbe (curba măsurată și cea reală), pe ambele curbe identificându-se câte un punct la care se obține forța maximă.



a) identificarea coordonatei ϵ pentru $\sigma_{\max}$



b) corecție impusă de metoda de măsurare (fără extensometru)

Figura 4.13. Curbă caracteristică tensiune-deformare relativă măsurată/ reală (epruveta numărul 2)

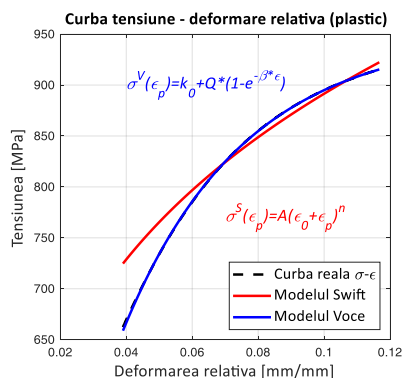
Curba ce caracterizează zona elastică se regăsește în zona verde (linia de referință). Aceasta este caracterizată de legea lui Hooke ($\sigma = \epsilon \cdot E$), unde E reprezintă modulul lui Young.

S-a considerat că începutul domeniului plastic este după zona de curgere.

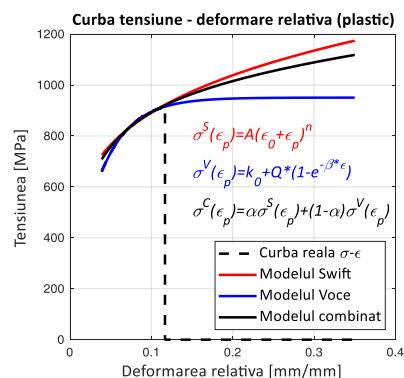
Estimarea curbei de material poate fi făcută utilizând:

- modelul Voce;
- modelul Swift.

În literatura de specialitate se folosește o variantă combinată a celor două legi (pentru o porțiune a curbei se alege un parametru pentru legea lui Voce, iar diferența pentru legea lui Swift).



a) curbă tensiune-deformare relativă (plastic) – model Swift/ Voce



b) curbă tensiune-deformare relativă (plastic) – model Swift / Voce/ Combinat

Figura 4.14. Curbe caracteristice – conform modelului Voce/ Swift/ combinat

Ecuția de calcul pentru modelul Voce este prezentată în ecuația (4.32), pentru modelul Swift în ecuația (4.33), iar pentru modelul combinat în ecuația (4.34) [60].

$$\sigma^V(\varepsilon_p) = K_0 + Q \cdot (1 - e^{-\beta \cdot \varepsilon_p}) \quad (4.32)$$

$$\sigma^S(\varepsilon_p) = A \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (4.33)$$

$$\sigma^C(\varepsilon_p) = \alpha \cdot \sigma^S(\varepsilon_p) + (1 - \alpha) \cdot \sigma^V(\varepsilon_p) \quad (4.34)$$

în care:

$\sigma^V(\varepsilon_p)$, K_0 , Q , $e^{-\beta \cdot \varepsilon_p}$, β , $\sigma^S(\varepsilon_p)$, A , ε_0 , ε_p , n , $\sigma^C(\varepsilon_p)$ și α sunt parametrii specifici ai modelelor [61].

4.3.3. Modelul geometric al epruvetei

Pentru încercarea la tracțiune se utilizează specimene (epruvete) a căror dimensiuni sunt indicate în cuprinsul standardelor de specialitate. Dimensiunile asociate epruvetelor utilizate în cadrul tezei au fost conforme standardului ASTM E8 care conține precizările necesare referitoare la pregătirea, efectuarea și prelucrarea rezultatelor obținute în urma efectuării testelor de tracțiune.

Modelul geometric al epruvetei a fost realizat în programul CATIA V5R19 atât pentru pregătirea desenului de execuție al piesei cât și pentru utilizarea acestuia ca suport pentru realizarea modelului numeric.

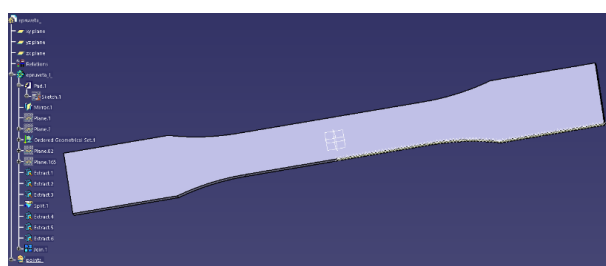


Figura 4.15. Modelul geometric al epruvetei

Modelul geometric a fost astfel modificat încât să cuprindă o serie de elemente constructive care să permită obținerea unor informații (coordonate) care descriu profilul epruvetei.

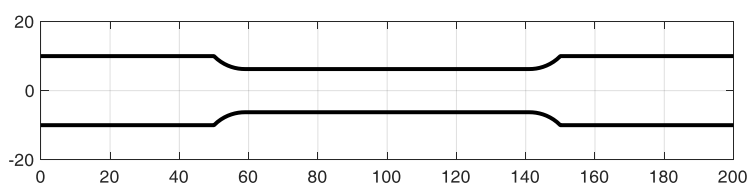


Figura 4.17. Profilul obținut al epruvetei

Pentru realizarea modelului numeric structurat al epruvetei se generează o grilă suport compusă din noduri care formează elemente finite patrulate. Dimensiunea elementului finit este un parametru ce poate fi introdus de utilizator. În Figura 4.18 sunt prezentate grilele suport, definite pentru diferite dimensiuni ale elementului finit de referință.

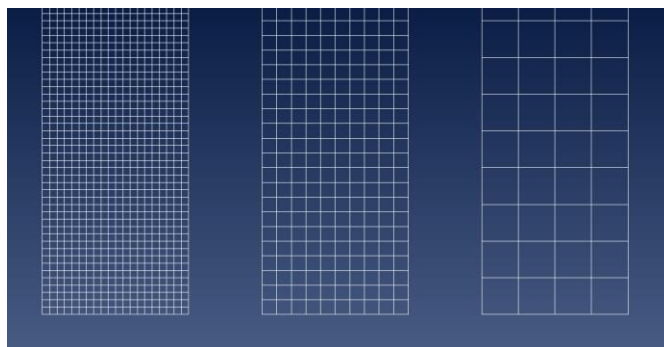


Figura 4.18. Grile suport definite pentru diferite dimensiuni ale elementului finit de referință

Structura generală a modelului numeric conține trei secțiuni, definite astfel:

- secțiunea centrală care conține și zona calibrată pentru evaluarea rezultatelor;
- zona de fixare care este definită ca un set de elemente rigide;
- zona de acționare care este definită ca un set de elemente rigide, prin intermediul căreia este aplicată deplasarea programată pentru efectuarea testului de tracțiune.

Modelul de material aplicat este complex și are în vedere faptul că ruperea piesei se produce prin dezvoltarea unor microfisuri (goluri) în piesă. Acest mecanism de rupere este implementat printr-un model specific de material `*MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE_OTH` [65] și necesită determinarea valorii critice a deformației relative în domeniul plastic prin care se manifestă acest mecanism de degradare. În urma adăugării legii lui Swift conform Figurii 4.20 a se poate observa că epruveta și-a păstrat forma până la sfârșitul simulării, iar în urma adăugării în algoritmul de calcul, exclusiv legea lui Voce, conform Figurii 4.20 b s-a observat că se produce fenomenul de gătuire.

Aplicându-se varianta combinată a celor două legi s-a căutat o soluție la care să nu apară gătuirea, ținând cont de mecanismul implementat. În urma simulărilor pentru diferite valori ale coeficientului α (0,5; 0,6; 0,75 și 0,9) s-a constatat că cea mai bună soluție este pentru $\alpha = 0,9$.

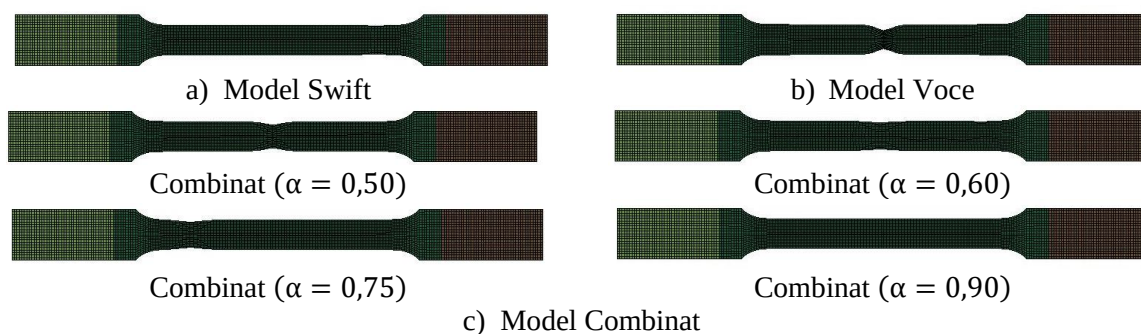


Figura 4.20. Modele numerice - epruvetă

Astfel, conform rezultatelor analizei, legea combinată devine:

$$0,9 \cdot \sigma^S(\epsilon_p) + 0,1 \cdot \sigma^V(\epsilon_p) = \sigma^C(\epsilon_p)$$

fiind determinată în acest fel curba de material, fără degradare.

Mai jos, în Figura 4.21, sunt prezentate grafic rezultatele obținute în urma simulărilor pentru diferite valori ale coeficientului α , pentru modelul Swift și pentru modelul Voce.

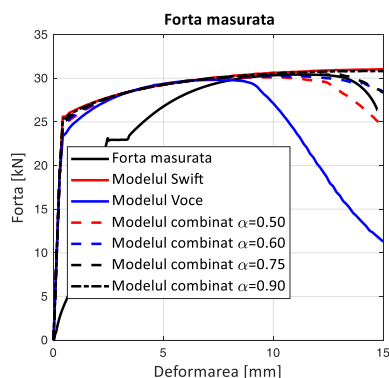


Figura 4.21. Reprezentare grafică a rezultatelor simulărilor

4.3.4. Metoda corelării imaginilor digitale

Așa cum a mai fost menționat, metoda D.I.C. este o tehnică optică, noncontact, pentru măsurarea tensiunii și deformației specifice. D.I.C. este ușor de utilizat și rentabilă în comparație cu alte tehnici. Imaginile folosite pot fi obținute de la o varietate largă de mijloace, ca de exemplu: camere video de supraveghere, camere de filmat, microscop optic sau electronic etc.

Marcarea epruvetelor testate și analizate prin metoda D.I.C. s-a realizat prin pulverizare, fiind utilizate două spray-uri, în culori cu un contrast puternic: alb-negru (Figura 4.22). După marcarea epruvetelor, acestea au fost montate pe mașina universală de testat la tracțiune, din dotarea Universității din Pitești, conectată cu un calculator pentru control automat și înregistrarea datelor. Vitezele de testare au fost de 2,5 mm/min pentru probele 8 și 9 și de 10 mm/min pentru proba numărul 10.

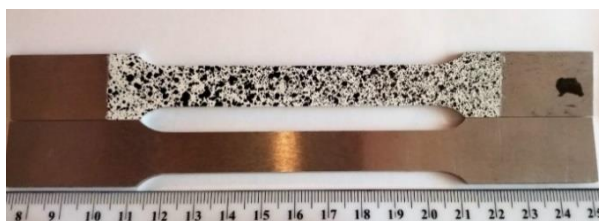


Figura 4.22. Epruvetă marcată pentru analiză D.I.C. vs epruvetă simplă (nemarcată)

Și în acest caz, pentru modelul combinat determinat anterior cu o valoare a coeficientului $\alpha = 0,90$ s-au făcut mai multe simulări pentru valori diferite ale limitei de rupere ϵ_r (0,10; 0,15; 0,20 și 0,25). Setul de rezultate sunt prezentate în Figura 4.28. Conform acestora se poate observa că pentru $\epsilon_r = 0,1$ sau $\epsilon_r = 0,15$ ruperea se produce prea devreme, în schimb când se ajunge la o valoare a limitei de rupere de 0,25 sau mai mare ruperea nu se mai produce.

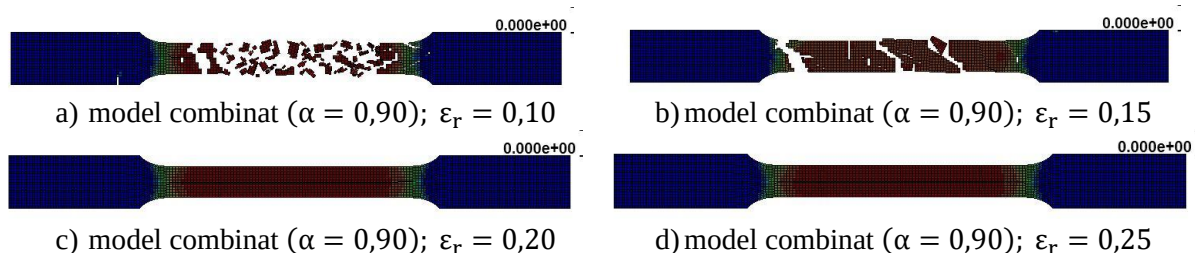


Figura 4.28. Simulări – model numeric pentru diferite valori ale limitei de rupere

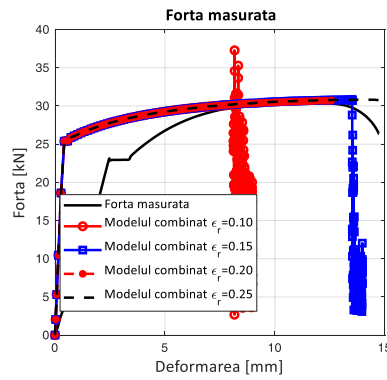


Figura 4.29. Reprezentare grafică a rezultatelor simulării

Abia după acest moment s-a introdus cea de-a treia informație: degradarea ΔD (acumularea de ruperi). După introducerea acestui element apare gătuirea epruvetei.

Determinarea alungirii relative a epruvetei nu este suficientă pentru caracterizarea materialului. Astfel că, la un moment dat, într-o anumită porțiune a epruvetei apare o subțiere (gățuire), care se accentuează destul de rapid deoarece deformarea epruvetei în continuare are loc numai în zona gățuirii la forțe tot mai mici (deoarece secțiunea epruvetei scade continuu).

După gățuire, epruveta suferă o lungire locală pronunțată și curba caracteristică reală, este crescătoare. Alungirea specifică reală la rupere este mai mare decât alungirea la rupere determinată cu baza de măsurare L_0 .

Degradarea este dată de ecuația (4.35), reprezentând parametrul „damage”, iar F reprezintă parametrul instabilitate, ecuația (4.36).

$$\Delta D = \frac{n}{\varepsilon_r} \cdot D^{1-\frac{1}{n}} \Delta \varepsilon_p \quad (4.35)$$

în care n reprezintă echivalentul parametrului DMGEXP

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{crit}} \cdot F^{1-\frac{1}{n}} \Delta \varepsilon_p \quad (4.36)$$

m fiind echivalentul parametrului FADEXP

$$\sigma_r = \sigma_e \cdot \left[1 - \left(\frac{D - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right)^m \right] \quad (3.37)$$

Mecanismul de degradare este introdus prin adăugarea unei alte comenzi, a unei alte cartele pentru material : *MAT_ADD_EROSION [65]. Din acest moment a fost introdus mecanismul GISSMO (Generalized Incremental Stress Strain Model) → mecanismul de degradare bazat pe înregistrarea tensiunilor și a deformațiilor [67], [68].

Parametrul instabilitate F este foarte interesant. În momentul în care într-o secțiune, valoarea acestuia ajunge la 1, înseamnă că secțiunea respectivă este pregătită pentru gățuire (1 reprezintă valoarea maximă a acestui parametru). După ce parametrul instabilitate ajunge la valoarea maximă, începe să se manifeste degradarea (formarea de goluri). Apoi, în funcție de momentul în care se produce instabilitatea începe

să se producă și alterarea secțiunii. În acest moment, trebuie găsite valorile parametrilor pentru a găsi curba de material (similară cu cea măsurată).

În urma realizării unei serii de experimente pentru diferite valori ale parametrilor, rezultatele sunt prezentate în Figura 4.31. Conform acestora se poate observa că soluția potrivită este pentru $\epsilon_r = 0,3$ (limita de rupere) cu parametrii DMGEXP = 2,0 (coeficientul de degradare) și FADEXP = 1,75 (coeficientul de instabilitate). Aceste concluzii sunt prezentate grafic în Figura 4.32.

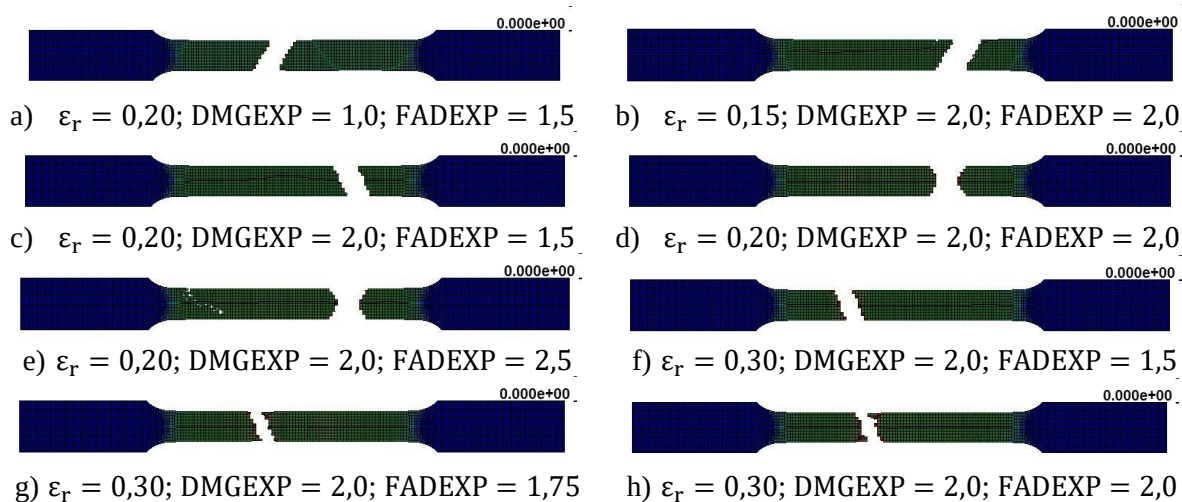
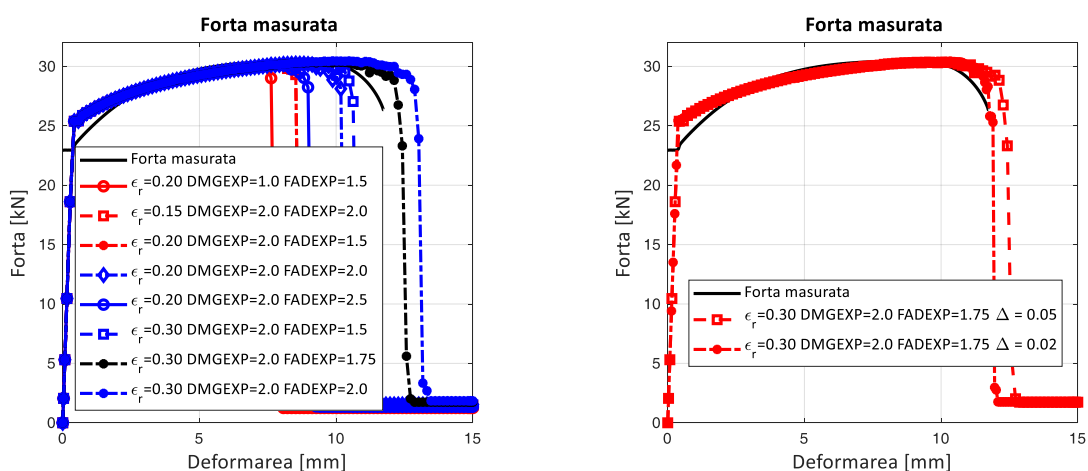


Figura 4.31 Simulări – model numeric pentru diferite valori ale parametrilor ϵ_r , DMGEXP și FADEXP



a) zona de calibrare

b) soluția identificată și verificată pentru doi pași de timp ($\Delta = 0,05$ și $\Delta = 0,02$)

Figura 4.32. Reprezentare grafică a rezultatelor simulării

În acest moment epruveta începe să se rupă conform curbei. Toate rezolvările au fost făcute cu LS-Dyna, acesta fiind motivul pentru care apare Δ (Figura 4.32 b) în care Δ reprezintă pasul de timp dintre două iterații succesive. Gâtuirea începe să se producă după punctul în care $F > 25$ kN, care e caracterizat de o deformare în domeniul plastic. Acest punct a fost identificat, ca fiind $\epsilon < 0,08$ pentru acest material cu alungirea $\epsilon_r = 0,30$ (valorile determinate sunt valabile doar pentru materialul studiat).

Rezultatele obținute în urma analizei sunt prezentate în Figura 4.33.

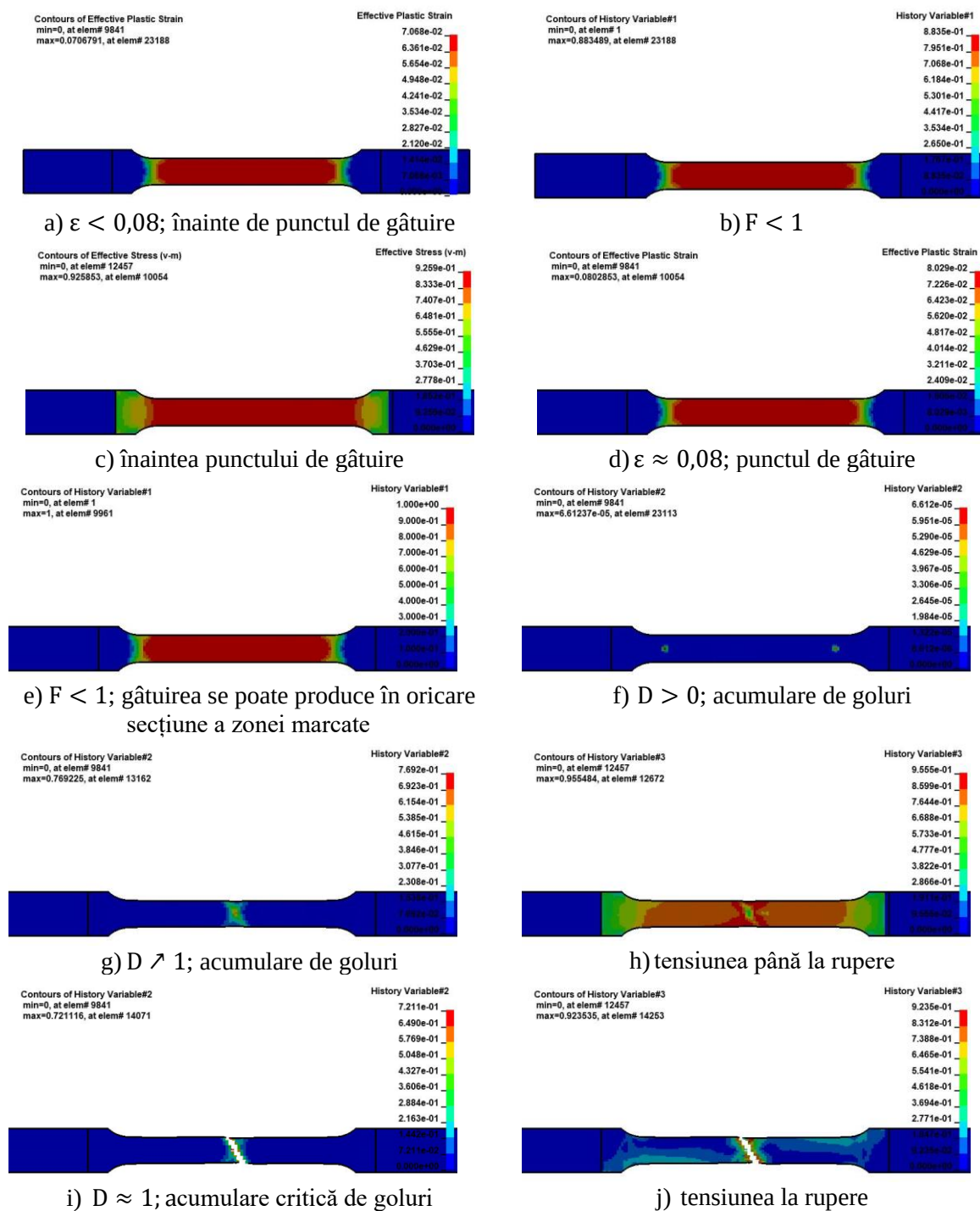


Figura 4.33. Analiza rupei pentru o epruvetă standard la întindere

4.3.5 Analiza complexă

În mecanismul GISSMO s-a făcut identificarea și particularizarea stării de tensiune în raport cu triaxialitatea.

În acest punct al cercetării s-a dorit îmbunătățirea acestui mecanism (GISSMO) cel puțin pe zona pe care poate fi realizată întinderea astfel încât să se poată realiza analiza complexă.

Pentru materialul analizat s-au realizat patru tipuri de epruvete (Figura 4.34) cu diferite valori specifice [70] [71] [39] ale parametrului de triaxialitate η (0,0; 0,197; 0,333; 0,395). Epruvetele testate au fost obținute din materialul selectat, 30MnVS6 [57], fiind obținute din bară de oțel cu diametrul de 30mm, prin frezare până la grosimea de 3mm, conturul fiind realizat prin electroeroziune cu fir (conform ASTM B831 [72]). Cele două procese au fost selectate pentru a nu influența termic structura materialului de bază [73].

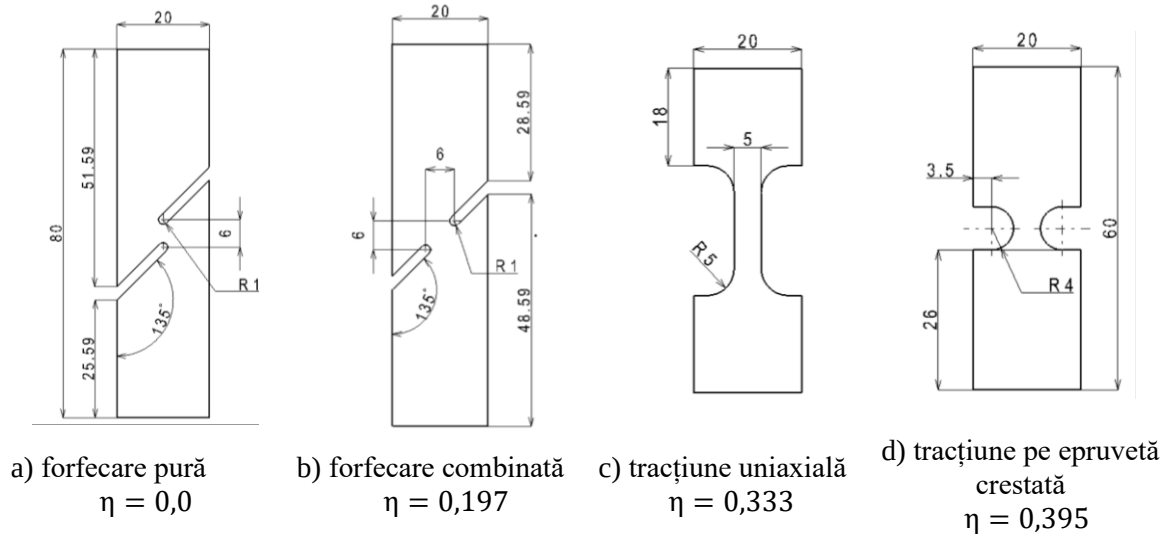


Figura 4.34. Epruvete specifice parametrului de triaxialitate η , testate la tracțiune

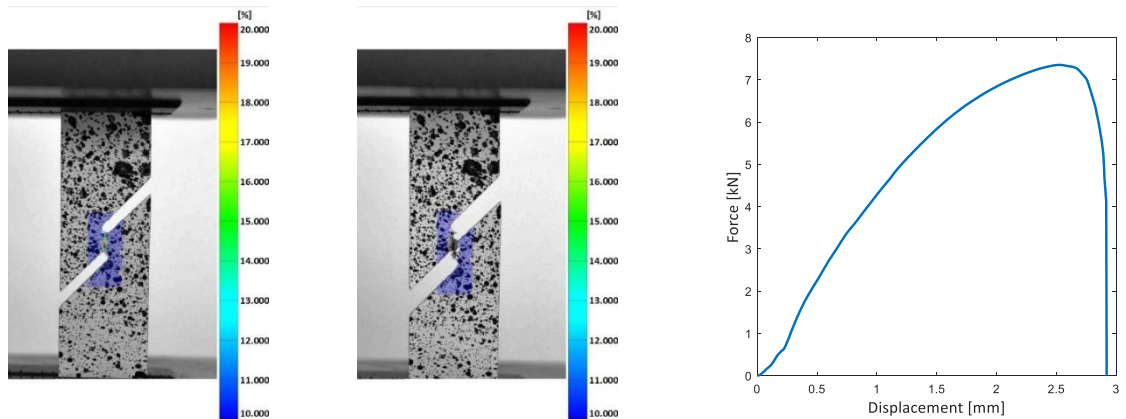


Figura 4.35. Epruvetă testată la forfecare pură

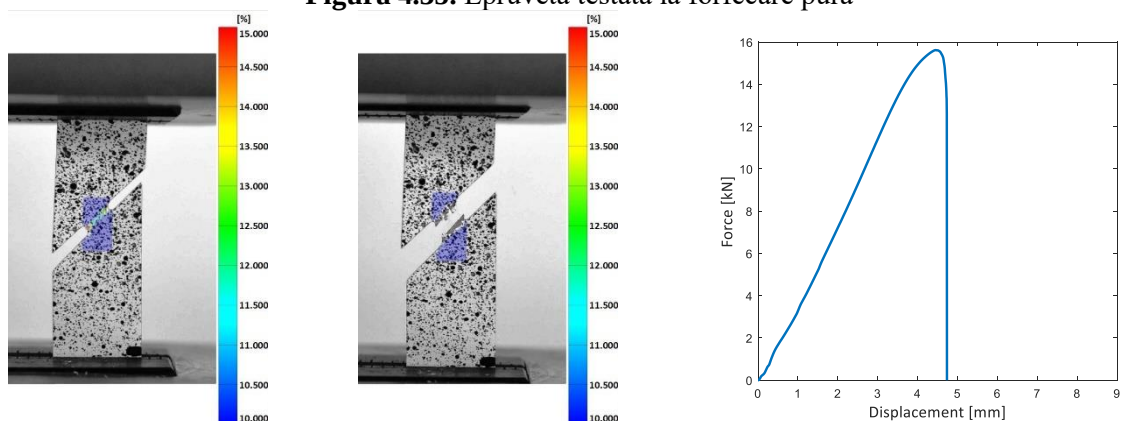
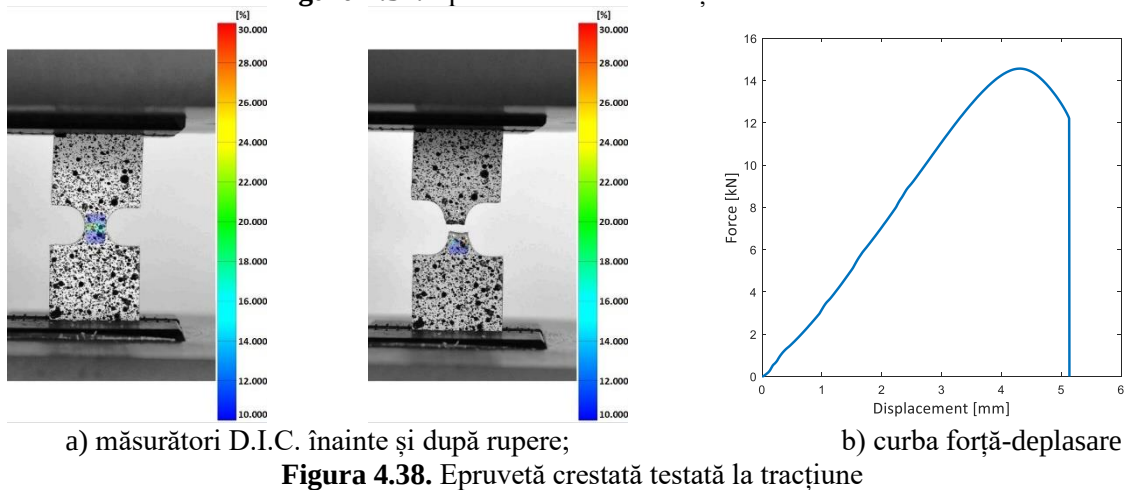
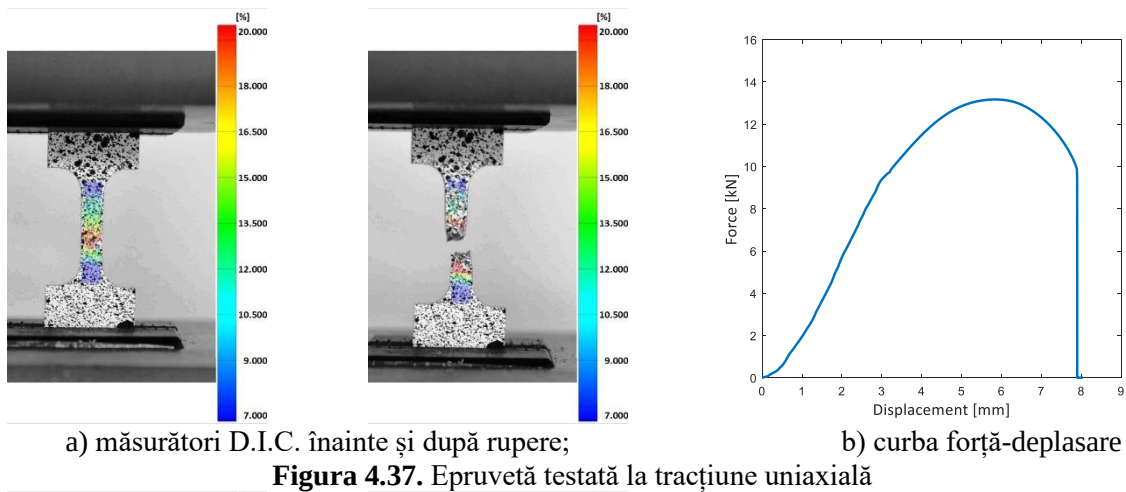


Figura 4.36. Epruvetă testată la forfecare combinată



După încercarea la tracțiune pentru epruvetele rupte din Figura 4.39 s-a determinat alungirea relativă la rupere. Pentru stările de tensiune induse în epruvetele de mai sus, în Figura 4.40 este prezentat graficul alungirii relative la rupere în funcție de factorul de triaxialitate (η), trasat prin puncte.

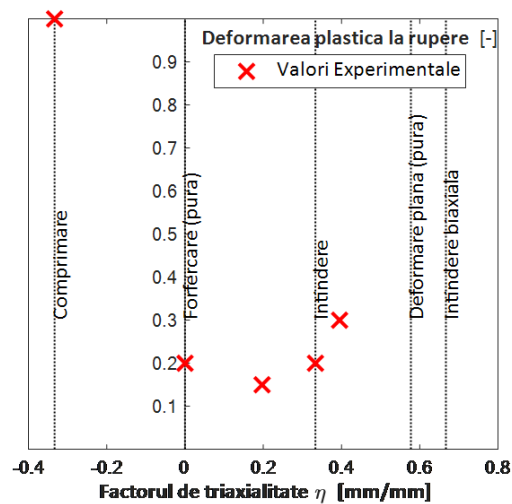


Figura 4.40. Dependența de factorul de triaxialitate a alungirii la rupere

Din Figura 4.40 se constată că alungirea la rupere este dependentă de factorul de triaxialitate, adică de tipul stării de tensiuni create în piesă. Pentru tracțiune pură și forfecare pură, valorile alungirii la rupere sunt apropiate. Valoarea crește la trecerea de la tracțiunea uniaxială la tracțiunea biaxială și la solicitarea de comprimare. Se observă că o creștere a factorului de triaxialitate duce la o scădere a ductilității [77].

5. Analiza experimentală și numerică a Corpului Bieletă de Direcție

Scopul tezei a fost reprezentat de dezvoltarea unui concept coerent pentru validarea unui proces de proiectare cunoscând materialul și performanțele acestuia, și nu în mod special pentru validarea piesei analizate în lucrare.

Sistemul de direcție este unul dintre cele mai importante sisteme ale unui automobil, iar în condiții reale de funcționare, deformările variabile ale Ansamblului Bieletă de Direcție combinate cu alte cauze pot duce în unele cazuri la defectarea componentelor. Deci, este important să se dezvolte o metodă experimentală de analiză a deformăției pentru a studia Ansamblul Bieletă de Direcție, care va fi utilizată pentru analiza numerică la oboseală [25].

5.1. Metode experimentale pentru determinarea deformărilor: Tensometria optică și tensometria electrezistivă

Starea de tensiune și deformare din corpurile supuse solicitărilor poate fi determinată pe cale experimentală sau pe cale analitică (calcul analitic, metode numerice). Determinarea teoretică a stării de tensiune și deformare impune acceptarea unor ipoteze simplificatoare cu referire la forma și structura elementului, caracteristicilor mecanice ale materialului din care este confecționat corpul sau chiar al modului de încărcare și rezemare al acestuia. În aceste cercetări, materialul din care este confecționat corpul analizat se consideră ideal: continuu, omogen, izotrop și perfect elastic. În realitate aceste condiții nu sunt îndeplinite în totalitate, ceea ce face ca rezultatele obținute să fie diferite de cele determinate experimental (cele reale).

Ambele metode prezintă avantaje și dezavantaje, însă utilizate împreună conduc la rezultate foarte bune. Rezultatele obținute pe cale experimentală pot confirma sau infirma rezultatele obținute pe cale analitică.

5.2. Metode experimentale pentru determinarea deformărilor: Tensometria optică și tensometria electrezistivă – Rezultate experimentale

5.2.1. Tensometria optică

Pentru o investigație detaliată a fost utilizată metoda D.I.C. Măsurătorile au fost realizate utilizând o cameră Aramis 3D [99], [100], [101], [102] – Configurația sistemului 6M 150, pentru măsurarea volumului MV 100 cu frecvență de achiziție de 2Hz. Viteza de testare a fost setată la 2mm/ min.

Pentru procesarea imaginilor și extragerea câmpului de distribuție al deformațiilor a fost utilizat și în acest caz programul GOM Correlate.

Combinăția celor două metode (tensometria optică și cea rezistivă) s-a realizat cu scopul de a asigura rezultate exacte ale măsurătorilor deformațiilor. Desigur, pentru a oferi un rezultat fiabil, datele experimentale au fost corelate cu rezultatele numerice.

Pentru a efectua analiza, Camera 3D Aramis a capturat 201 cadre: primele 30 de cadre au fost utilizate pentru calibrare, iar analiza a fost efectuată pentru restul cadrelor (171).

Forța de testare a fost crescută până la 10.000N (10kN) pentru a colecta date în cazurile cu sarcina medie până la mare [104].

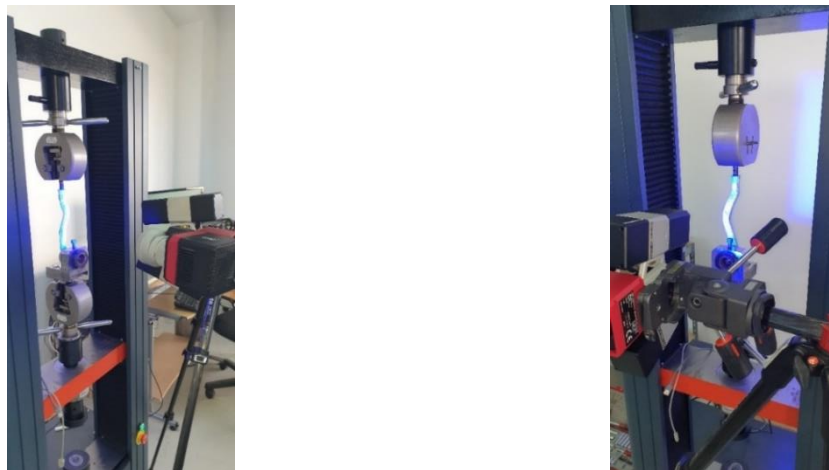
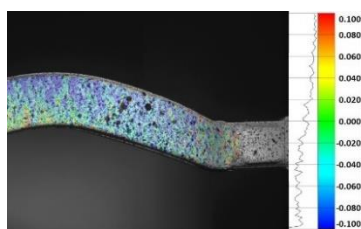
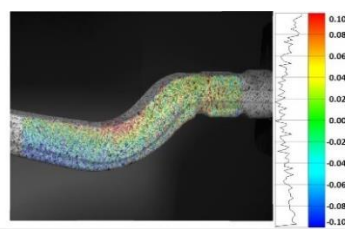


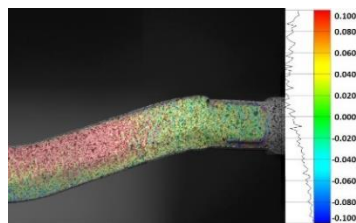
Figura 5.3. Piesa montată pentru analiză – capturare imagini analiză D.I.C.



a) vedere frontală



b) vedere rotită cu 90° față de vederea frontală



a) vedere rotită cu 180° față de vederea frontală

Figura 5.5. Rezultate analiză – diferențe de vedere

5.2.2. Modelare numerică

Modelele numerice reprezintă un mijloc eficient de investigare a structurilor mecanice în timpul procesului de proiectare. Este necesară însă o utilizare rațională a mijloacelor și metodelor de calcul pentru obținerea unor rezultate în concordanță cu determinările experimentale sau observațiile efectuate asupra produselor similare pe durata utilizării normale [105]–[107]. Componentele unui model numeric se pot categorisi în mod general astfel:

- rețeaua de discretizare formată din elemente și noduri realizate în conformitate cu modelul geometric;
- condițiile la limită reprezentate de specificarea modului de rezemare și aplicarea solicitărilor exterioare (forțe, momente, accelerații, viteze, temperatură etc.);
- definirea modului de interacțiune dintre elementele componente ale unui model (contacte sau legături materializate între noduri sau noduri și elemente);
- modelul matematic de definire a comportamentului mecanic al materialului atribuit unei componente a sistemului mecanic;
- soluția numerică de rezolvare (implicit sau explicit);
- condiții de rezolvare.

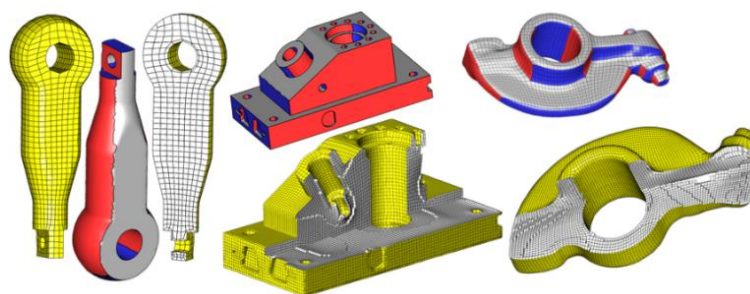
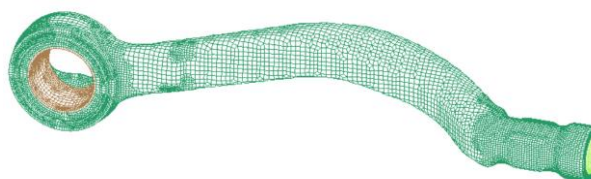


Figura 5.6. Exemple de modele numerice – elemente hexaedrale

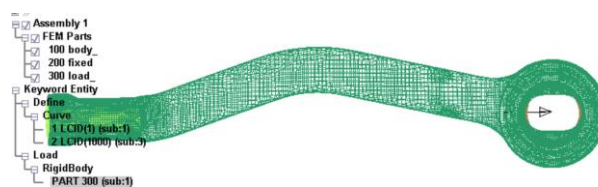
Elementele hexaedrale au fost obținute cu ajutorul softului PolyCube Based Automatic Hex-Mesh Generation (<http://www.cs.ubc.ca/labs/imager/tr/2018/HexDemo/>).

Așa cum a mai fost menționat scopul acestei teze a fost de a dezvolta un model matematic al modelului funcțional de cercetare (Ansamblu Bieletă de Direcție), cu ajutorul analizei numerice și al determinărilor experimentale, capabil să prezică durata de viață a acestuia. Modelul numeric a fost dezvoltat pornind de la desenul funcțional, modelul CAD și specificațiile tehnice ale părții analizate.

Descrierea modelului a fost realizată în concordanță cu nomenclatorul specific programului Ls-Dyna, utilizat pentru rezolvare.



a) Model de calcul – elementele componente



b) Model de calcul – condiții de încărcare

Figura 5.10. Model de calcul

Rezultatele analizei numerice pentru deformații și tensiuni sunt prezentate în seturile de imagini din Figurile 5.11 și 5.12.

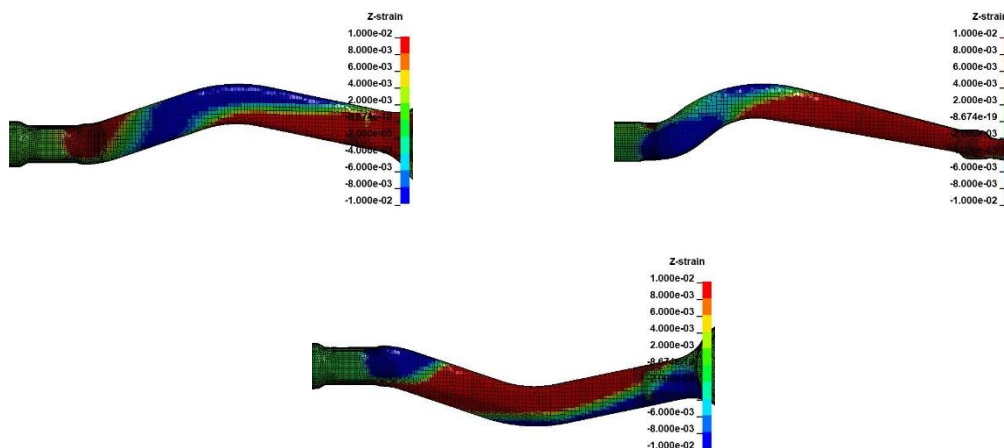


Figura 5.11. Rezultate analiză deformații

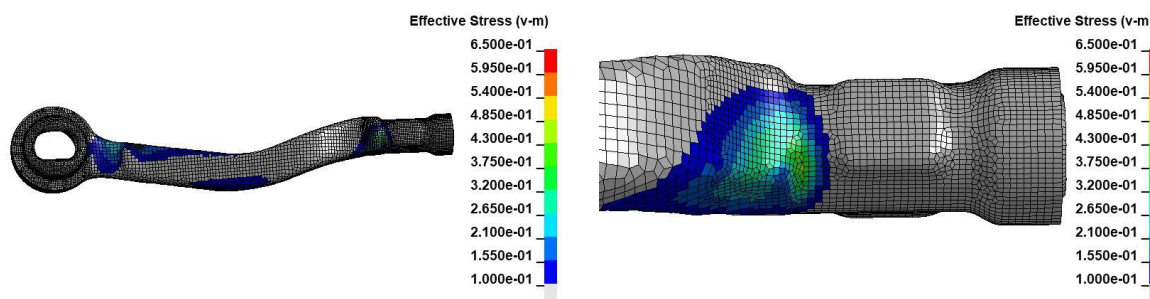


Figura 5.12. Rezultate analiză tensiuni

Calibrarea modelului numeric a fost realizată prin compararea cu rezultatele obținute pe cale experimentală (mărci tensometrice). Cu mărcile tensometrice se pot face încercări de durabilitate.

În cadrul realizării acestei analize a modelului numeric au fost cumulate următoarele date de intrare:

- curba materialului;
- starea de triaxialitate;
- curba de oboseală.

Astfel că modelul numeric are cumulate starea de triaxialitate și starea de oboseală.

5.2.3. Tensometrie electrezistivă

Pentru colectarea datelor s-a folosit un sistem de achiziție de date (Figura 5.13) alcătuit din:

- un modul Punte Wheatstone Seria C (NI 9237 Anexa 1) [109];

- un modul de intrare de tensiune și curent (NI 9207 Anexa 2) [110].

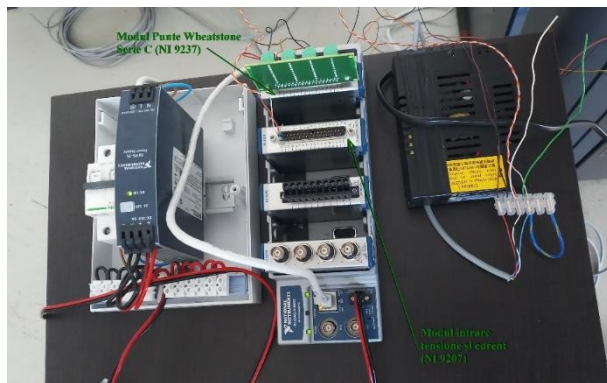
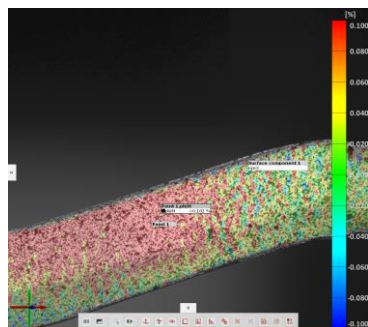


Figura 5.13. Sistem de achiziție date

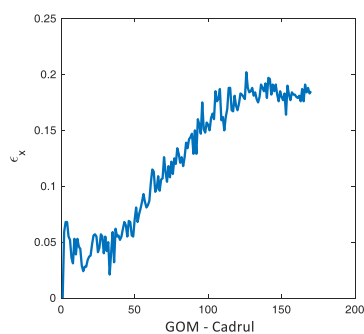


Figura 5.14. Ansamblul Bieletă de Direcție în timpul testului

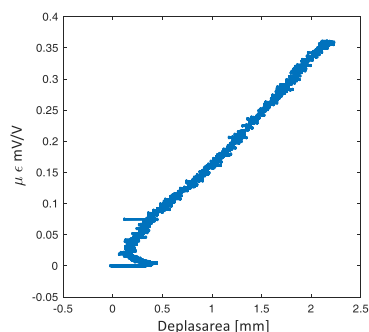
Rezultatele analizei (Figura 5.17) ilustrează reprezentarea complexă a deformației. Testul a fost efectuat pentru forța maximă de încărcare de 10kN (Figura 5.17 d), iar câmpul de tensiune este de 9,5V pentru 200mm.



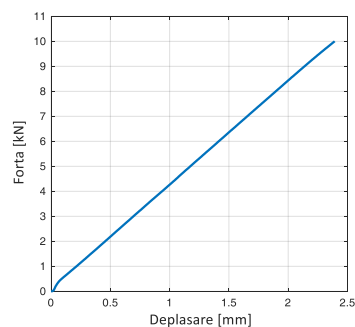
a) punct de măsurare a deformației



b) date deformații din GOM



c) microdeformații – rezultate din măsurători cu mărci tensometrice



d) curbă forță-deplasare

Figura 5.17. Rezultate analiză

5.3. Metodă experimentală – Încercarea la oboseală

Efectul urmărit prin realizarea acestui test (încercare) este determinarea condițiilor de rupere la oboseală a modelului funcțional de cercetare, Ansamblu Bieletă de Direcție.

În practică, modul de variație a solicitărilor este neregulat și imprevizibil. Pentru analiza de proiectare, ecuațiile solicitării în funcție de timp sunt modelate utilizând o curbă sinusoidală; astfel, pentru solicitările ciclice, există trei tipuri de modele matematice:

- tensiuni alternante;
- tensiuni repetate;
- tensiuni alternative [111].

În funcție de modul variației, solicitările variabile în timp se pot clasifica în:

- solicitări variabile continue;
- solicitări variabile discontinue;
- solicitări periodice sau neperiodice;
- solicitări staționare și nestaționare [6].

5.3.1. Montaj Ansamblu Bieletă de Direcție pe standul de oboseală

Determinările experimentale ale solicitării la oboseală a Corpului Bieletă de Direcție sunt efectuate pe standul pentru solicitare la oboseală aflat în dotarea S.C. Componente Auto S.A., a cărei soluție constructivă este prezentată în Figura 5.18.

Piesele înainte de montajul pe standul de încercare la oboseală trebuie să fie supuse unor operații de analiză și pregătire. Aceste operații sunt:

- verificarea vizuală a integrității și a aspectului general al piesei;
- îndepărtarea burdufului de protecție și a unsorii în exces;
- măsurarea și înregistrarea valorilor cuplurilor de basculare, rotire precum și a unghiurilor de dezbater.

După acesta succesiune de operații piesa este pregătită pentru montajul pe stand.

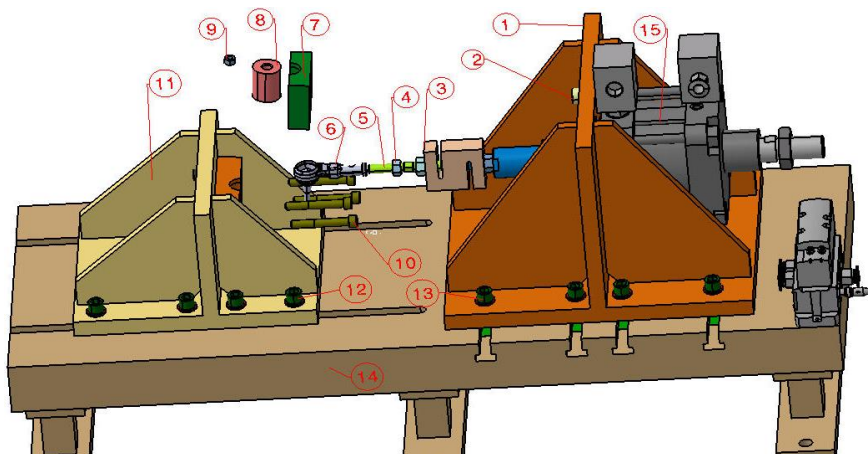


Figura 5.18. Stand solicitare la oboseală – Ansamblu Bieletă de Direcție (Corp)

5.4. Analiza numerică în cazul deplasării autovehiculului pe un drum cu denivelări în condiții excepționale

Analiza numerică în cazul deplasării autovehiculului pe un drum în condiții excepționale s-a făcut ținând cont de rezultatele obținute anterior în analiza comportamentului pe un drum cu obstacole. În Figura 5.32 este prezentată forța obținută prin simulare numerică în cazul deplasării cu viteză ridicată pe un drum cu denivelări.

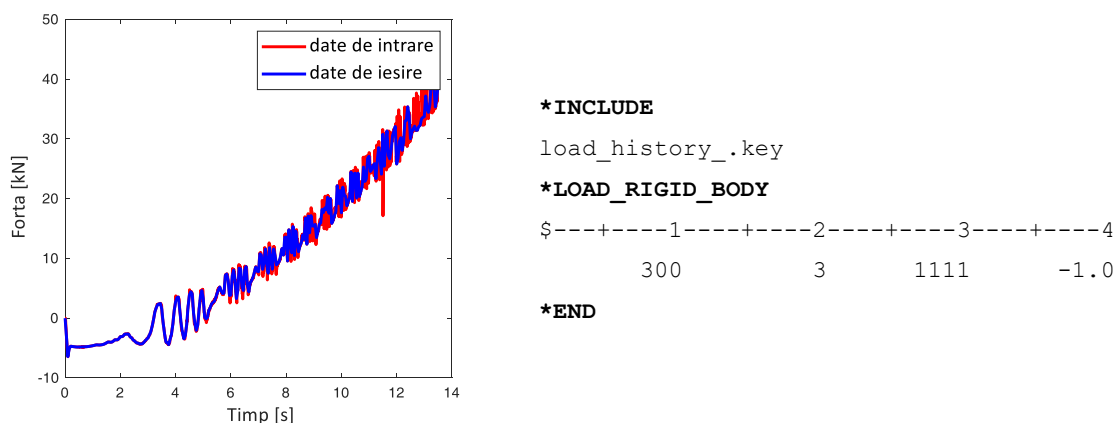


Figura 5.32. Forța obținută prin simulare numerică – deplasare pe un drum cu denivelări
Curba caracteristică S-N a materialului 30MnVS6 este prezentată în Figura 5.33.

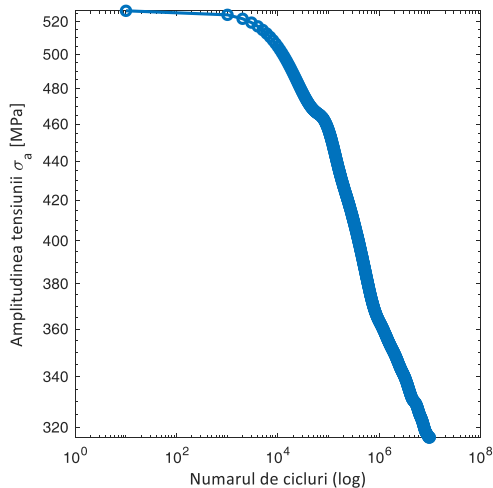
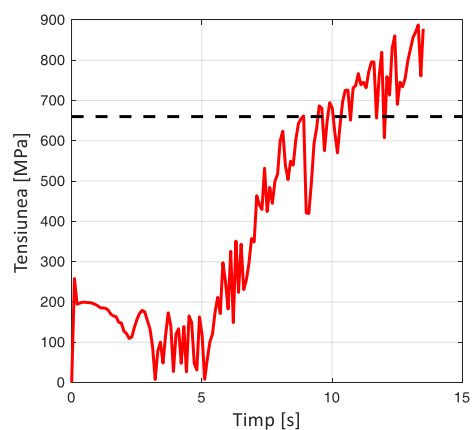
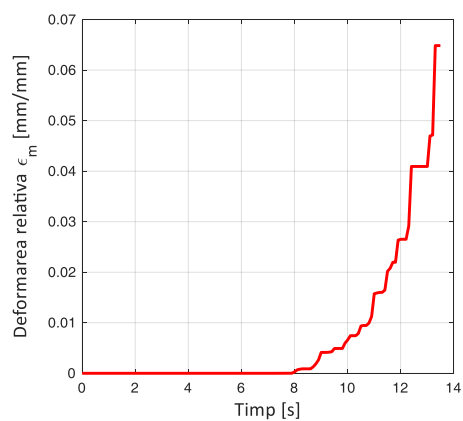


Figura 5.33. Curba S-N material 30MnVS6

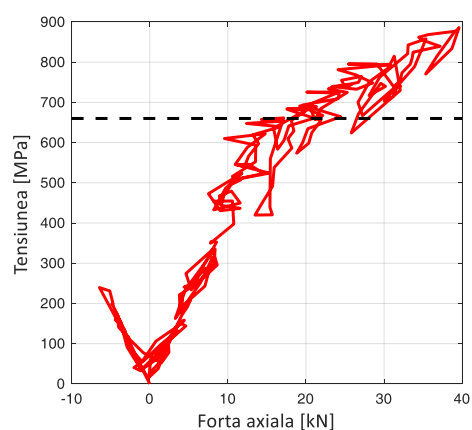
Datele referitoare la condițiile de utilizare ale materialului (curba S-N) se implementează în Ls-Dyna. În Figura 5.34 sunt prezentate și restul rezultatelor obținute prin simulare numerică, pentru acest caz.



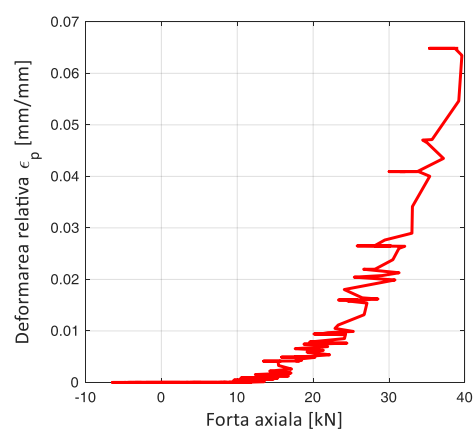
a) curbă tensiune-timp



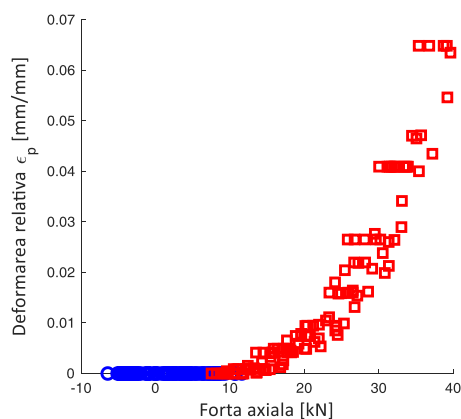
b) curbă deformare relativă-timp



c) curbă tensiune-forță axială



d) curbă deformare relativă-forță axială



e) curbă deformare relativă-forță axială

Figura 5.34. Rezultate simulare numerică

5.5. Metoda elementului finit – Evaluarea secțiunii critice

Legea lui Miner este probabil cel mai simplu model cumulativ de cedare. Aceasta spune că dacă există k niveluri de tensiune diferite și numărul mediu de cicluri i până la tensiunea de rupere σ_i este N_i atunci ecuația de degradare, C , este:

$$C = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (5.2)$$

Rezultate obținute pentru Corpul Bieleță analizat în cazul în care sunt aplicate forțele calculate pentru deplasarea pe un drum cu denivelări cu viteză ridicată sunt prezentate în Figura 5.35.

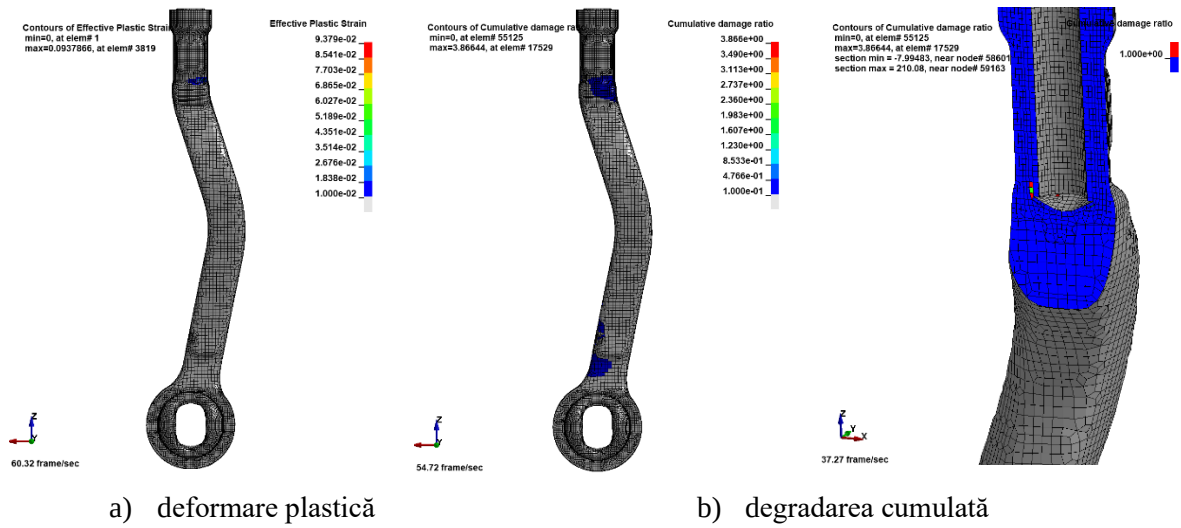


Figura 5.35. Rezultate analiză Corp Bieleță – drum cu denivelări

În Figura 5.36 sunt prezentate graficele amplitudine-timp, obținute în urma analizei.

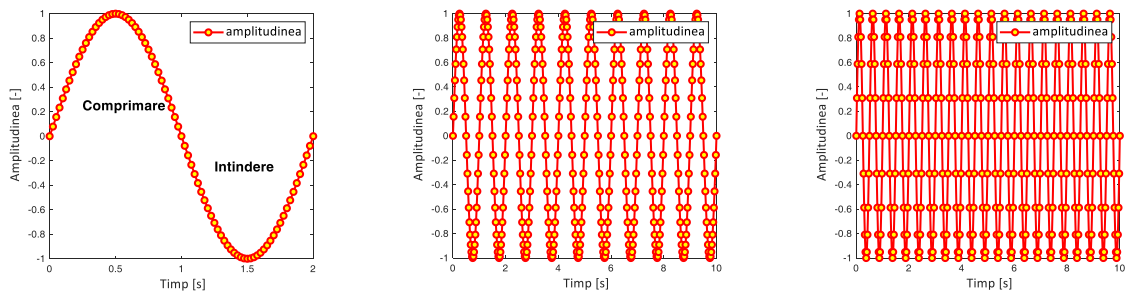
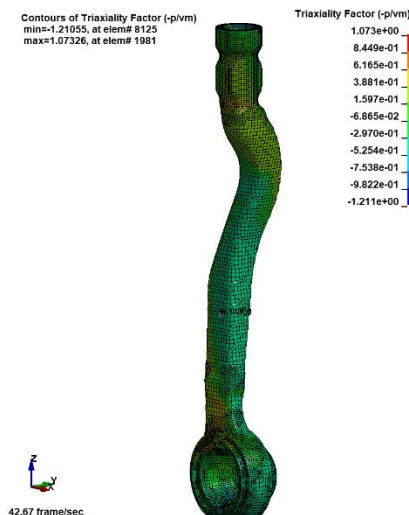


Figura 5.36. Grafice amplitudine-timp – rezultate analiză Corp Bieleță – drum cu denivelări pentru diferite frecvențe

În Figura 5.39 este prezentat factorul de triaxialitate vs. forța aplicată (pentru două elemente care se află în opoziție).



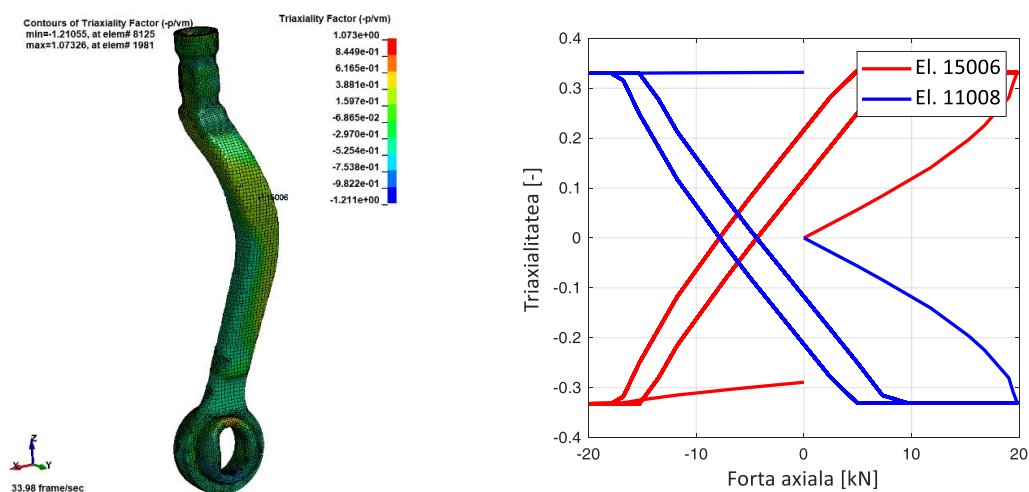


Figura 5.39. Factorul de triaxialitate vs. forța aplicată

Variația parametrilor pentru elementul 19249 care se află în zona filetului este prezentată în graficele din Figura 5.40.

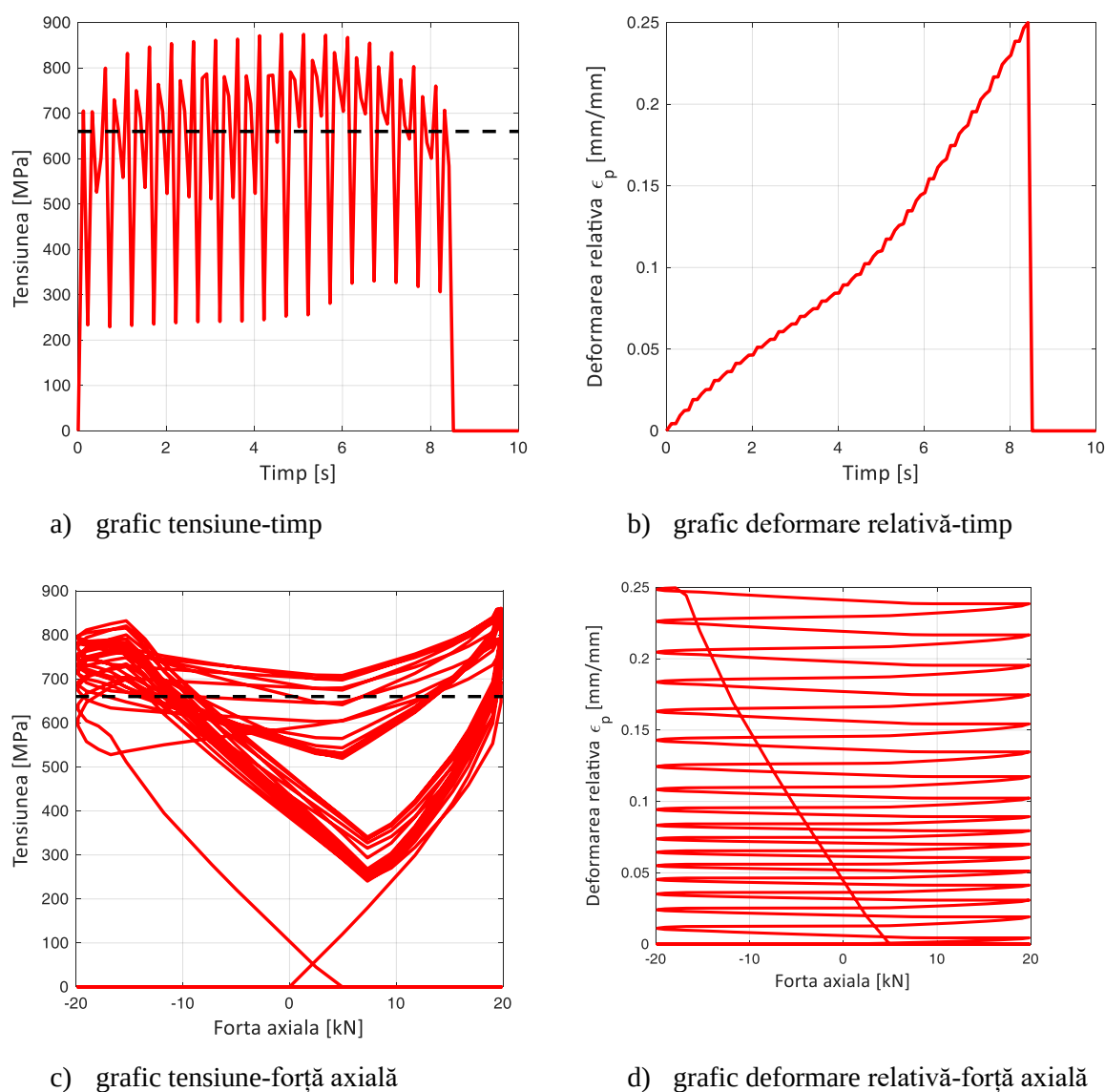


Figura 5.40. Variația parametrilor pentru elementul 19249 (zonă filet)

5.6. Cauze înlocuire Ansamblu Bieletă de Direcție – în exploatare

Conform bazei de date experimentale deținută de S.C. Componente Auto S.A. s-a realizat o analiză a cauzelor înlocuirii Ansamblurilor Bieletă de Direcție de pe vehicule și implicit a cauzelor principale de defectare.

6. Soluții tehnice pentru realizarea modelelor numerice

6.1. Analiza calității elementelor finite

Rezultatele obținute prin metodele de simulare numerică sunt dependente de modul de definire și de calitatea modelului numeric utilizat [115], [116], [117], [118].

În tehnica modelării cu elemente finite sunt utilizate criterii specifice pentru verificarea calității fiecărui element finit utilizat în cadrul modelului.

Un criteriu important de calitate este reprezentat de verificarea Jacobianului, elementului sau determinarea abaterii de la forma ideală a elementului finit care este reprezentată de un cub [119].

S-a analizat calitatea elementelor finite pentru modelul numeric al Corpului Bieletei de Direcție, rezultatele obținute fiind prezentate statistic în Figura 6.1.

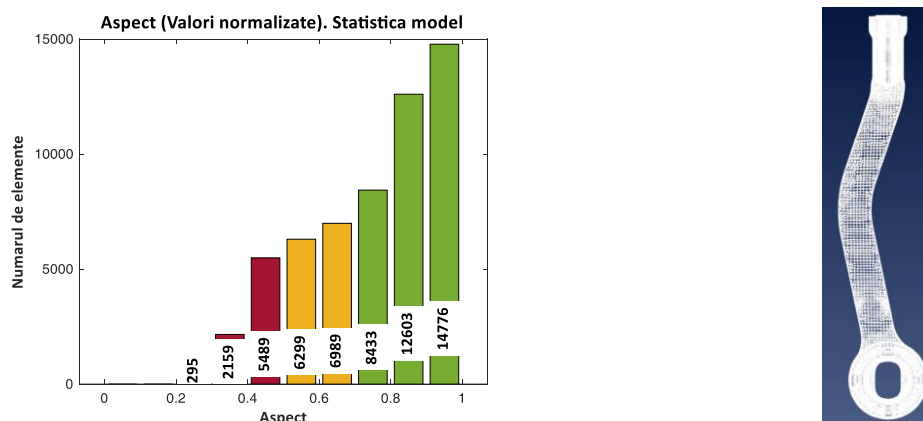


Figura 6.1. Analiză statistică – calitate elemente finite ale modelului numeric

Utilizarea unor elemente finite a căror formă geometrică este considerabil deviată de la forma „ideală” de cub are ca și consecințe necesitatea utilizării unor factori de corecție pentru obținerea convergenței soluției numerice.

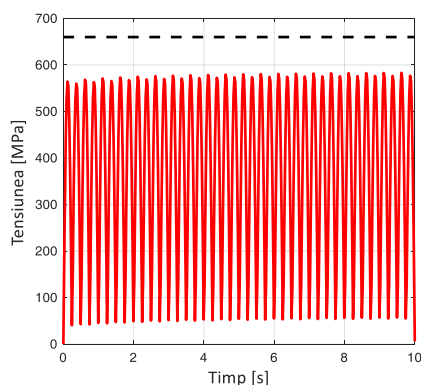
Modelelor numerice investigate în cadrul acestei teze le-a fost asociat modelul de material *MAT_24, *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Tensiunile deviatorice sunt determinate în raport cu starea limită de tensiune definită în material astfel:

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{ij} \cdot \sigma_{ji} - \frac{\sigma_y^3}{3} \leq 0 \quad (6.4)$$

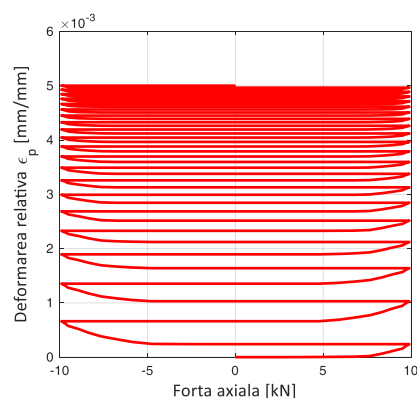
unde:

$$\sigma_y = \beta \cdot (\sigma_0 + f_h(\epsilon_{ef}^p)) \quad (6.5)$$

Modelul numeric a fost rezolvat pentru cazul în care forța aplicată este de 10kN, forță care determină exclusiv deformarea piesei în domeniul elastic. Acest aspect este evidențiat și în Figura 6.4 a, în care este prezentată evoluția tensiunii rezultante în element. Evaluând însă deformațiile relative în domeniul plastic se constată faptul că se înregistrează o valoare minimă dar care are caracter de acumulare (Figura 6.4 b).



a) tensiunea rezultantă



d) deformare relativă vs. forța axială

Figura 6.4. Rezultate obținute în cazul unui element finit deviat de la forma geometrică „ideală”

6.2. Scalarea

O soluție tehnică pentru îmbunătățirea formei geometrice a piesei constă în analiza secțiunilor longitudinale. În acest fel se identifică secțiunile „critice” care necesită atenție din partea proiectantului sau secțiunile care din punct de vedere structural sunt dimensionate în exces.

În cadrul capitolelor anterioare a fost identificată zona critică a piesei, aceasta aflându-se la capătul zonei filetate pentru montarea cu elementele conexe care compun sistemul de direcție al automobilului.

În acest sens a fost realizat un set de plane paralele care au ca referință comună suprafață circulară care definește capătul piesei și care au fost realizate la o distanță între ele de 5mm (Figura 6.5).

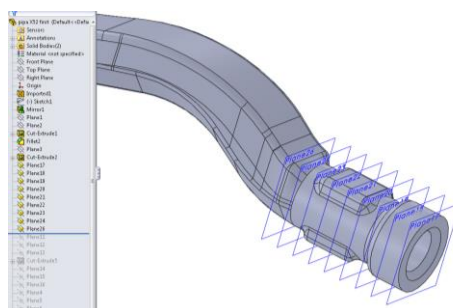


Figura 6.5. Plane secționare zonă critică

În urma rulării programului MATLAB în conformitate cu Aplicația 6.1, s-au obținut rezultatele pentru factorul de scalare al piesei s_f , acestea fiind prezentate în Figura 6.6.



a) $s_f = 0,90$

b) $s_f = 0,70$

Figura 6.6. Model numeric Corp Bieletă de Direcție conform s_f

Conform Figurii 6.7. se observă că distribuția eforturilor nu prezintă variații semnificative, astfel că modificarea corpului nu este de natură să influențeze performanțele structurale ale piesei.

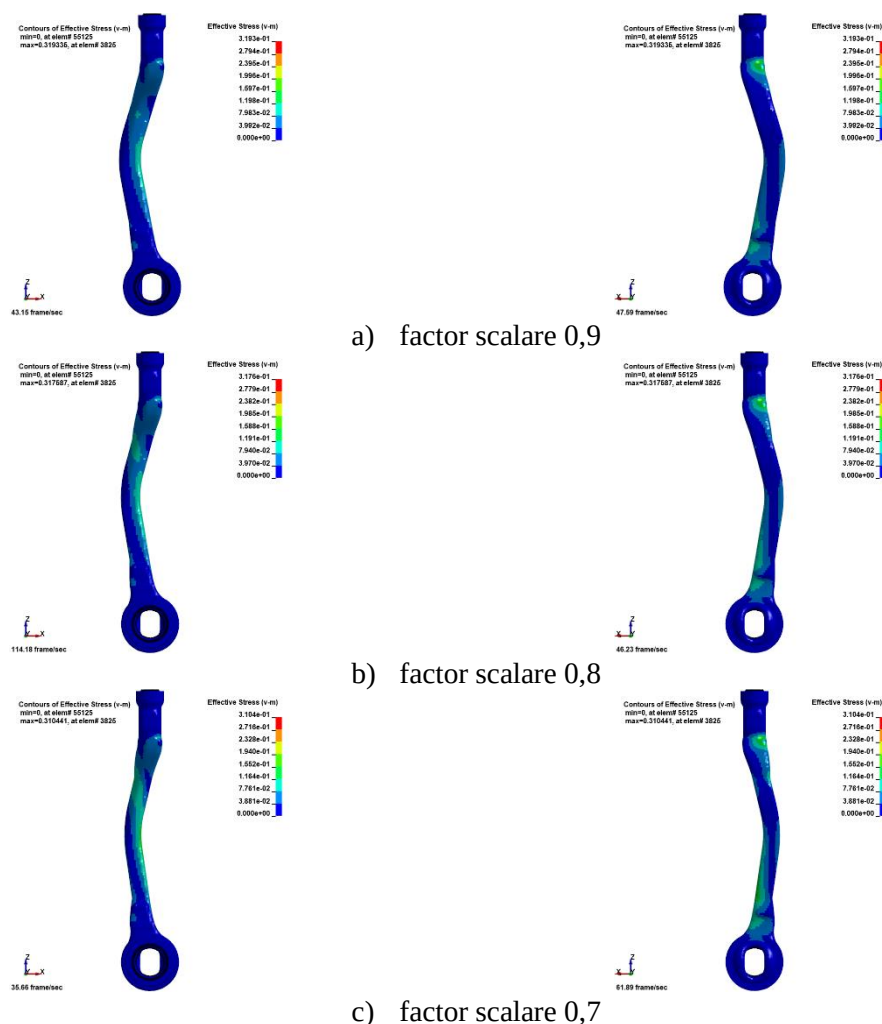


Figura 6.7. Analiza tensiuni Corp Bieletă de Direcție pentru diferite valori ale factorului de scalare

Valoarea tensiunii în zona modificată geometric este de aproximativ 150MPa, valoare relativ mică în comparație cu cea din zona solicitată. De asemenea, nu se constată deplasarea sau alterarea zonei critice în care au fost identificate eforturile maxime.

6.3. Definirea structurii de referință

Se analizează cazul în care piesa nu este definită din punct de vedere geometric fiind cunoscute informațiile referitoare la condițiile de funcționare și volumul alocat în cadrul modelului geometric de ansamblu al sistemului mecanic de proiectat.

6.3.1. Introducere

Definirea formei geometrice a piesei se realizează prin minimizarea sau maximizarea unuia sau mai multor obiective de proiectare, precum:

- volumul/masa întregii structuri;
- tensiunea maximă sau distribuția tensiunilor în structură;
- deformațiile maxime;
- eficacitatea procesului de fabricare;
- costul.

Soluția de definire a formei geometrice a piesei se bazează pe identificarea și analizarea stării de tensiune definită în structura de optimizat, ca urmare a aplicării unui set de încărcări exterioare [116], [120], [121], [122], [123], [124], [125].

6.3.2. Prezentarea soluției tehnice pentru optimizare

Algoritmii pentru identificarea formei geometrice a unei structuri pot avea un nivel de complexitate ridicat [115], [126] în funcție de strategia de calcul aleasă.

Modelul numeric este definit general având în vedere faptul că pentru identificarea soluției tehnice se alege metoda de evaluare a stării de tensiune.

Programul de calcul elaborat permite operarea cu un set de date definit de utilizator. Funcțiile seturilor de date sunt specificate prin proprietățile asociate și prin condițiile de margine stabilite.

Modelul implementat în prezent utilizează un material de tip elastic – plastic *MAT_003 (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) [127].

Pentru un pas de calcul se determină tensiunea medie de referință cu ajutorul relației:

$$\bar{\sigma}_m = \left(\sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{\sigma_{vm,i}}{\sigma_a} \right)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (6.9)$$

unde:

- $\sigma_{vm,i}$ este tensiunea echivalentă determinată pentru un element;
- σ_a este tensiunea maximă admisibilă în structură.

Iterativ, valoarea tensiunii unui element este calculată prin utilizarea unor factori de amplificare cu ajutorul relației:

$$\bar{\sigma}_{e,i} = \xi^\alpha \cdot \left(\frac{\sigma_{vm,i}}{\sigma_y} \right) \quad (6.10)$$

Factorul de amplificare ξ^α este modificat după fiecare iterație conform relației:

$$\xi_i = \xi_i + inc \quad (6.11)$$

În cadrul fiecărei iterații, valoarea $\bar{\sigma}_e$ calculată pentru elementul i se compară cu valoarea $\bar{\sigma}_m$ calculată pentru elemente care aparțin domeniului de actualizat PID 100. În cazul în care $\bar{\sigma}_e$ este mai mare sau cel puțin egală cu valoarea calculată $\bar{\sigma}_m$, elementul i este transferat din domeniul PID 100 în domeniul PID 400 care conține elementele asociate formei finale a piesei.

Aplicând algoritmul pentru identificarea formei geometrice a piesei pentru cazul analizat s-au obținut rezultatele prezentate în Figura 6.14.

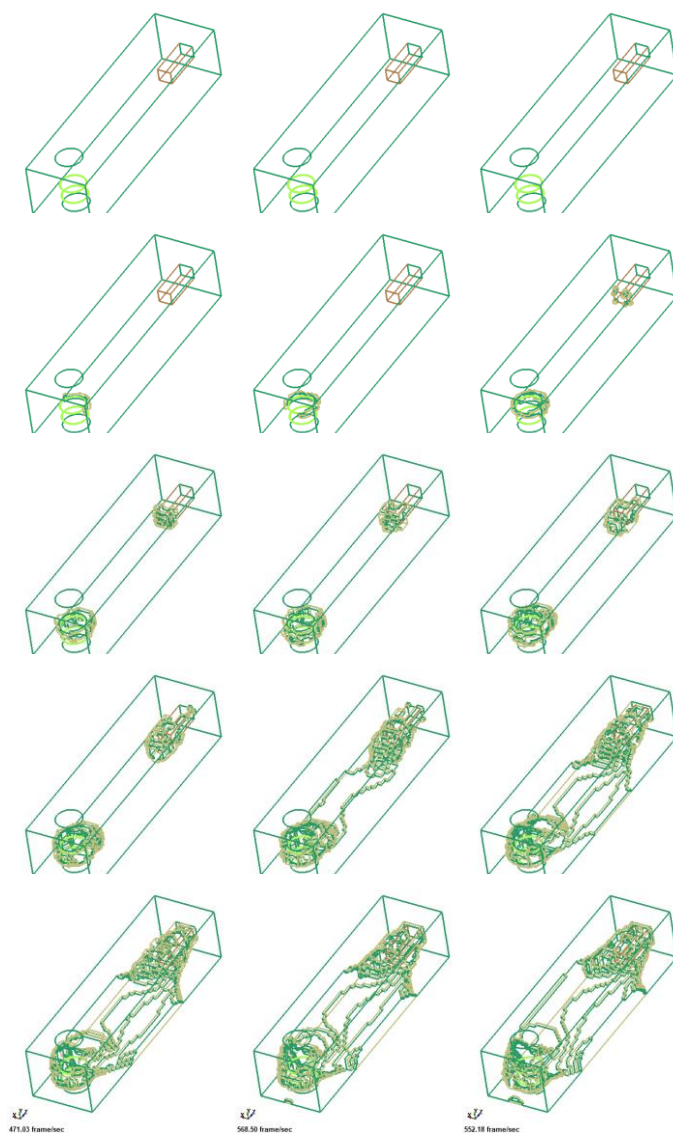


Figura 6.14 Piesa de tip Corp Bieletă

Analizându-se formele intermediare se constată faptul că pot fi identificate elemente similare celor care definesc piesa de tip Corp Bieletă, analizată în cadrul acestei teze.

7. Concluzii finale, contribuții personale și perspective de cercetare

7.1. Concluzii finale

În primul capitol al lucrării s-au prezentat condițiile generale de funcționare și stabilirea regimurilor de calcul pentru piesele și mecanismele automobilelor, principalele concluzii rezultate fiind:

1. valorizarea Programului de Proces al Produsului (V3P) reprezintă logică nouă de dezvoltare a unui nou concept pentru care obiectivele sunt reducerea costurilor de dezvoltare și echilibrarea cheltuielilor generale;
2. funcționarea automobilului depinde de interacțiunea dintre acesta cu mediul exterior sau dintre substructurile acestuia. În timpul proceselor de lucru, aceste substructuri suferă modificări continue sau discrete, trecând astfel prin diverse stări care reprezintă abateri mai mult sau mai puțin importante de la starea inițială;
3. aprecierea unui automobil se face ținând cont de toate cauzele exterioare care determină schimbarea durabilității și fiabilității lui în procesul de exploatare;
4. în procesul de exploatare, asupra automobilului și componentelor acestuia acționează forțe externe (forțe din suprafețele de contact ale organelor de rulare cu solul; rezistența aerului în mișcare relativă față de autovehicul; forțe de impact cu alte corpuri) și forțe și momente interne (forța de inerție; momentul motor transmis de la sursa de energie aflată pe autovehicul la organele de rulare; momentul de frânare dezvoltat de sistemul de frânare asupra celui de rulare), care compuse creează regimurile de funcționare dinamice tranzitorii sau dinamice stabilizate;
5. regimurile dinamice tranzitorii sunt caracterizate prin variații cu viteză mare în timp și în limite largi ale forțelor și momentelor care acționează asupra pieselor;
6. regimurile dinamice stabilizate au drept caracteristică variații în domenii relativ înguste, centrate în jurul valorii medii ale forțelor și momentelor care solicită subansamblurile automobilului;

În capitolul doi s-a redat o sinteză asupra stadiului actual asupra cercetării în domeniul analizei oboselii, iar în urma acestui studiu constatându-se că această analiză face referire la două metodologii (metoda S-N și metoda e-N), putând fi folosită pentru analiză și mecanica ruperii.

Conform capitolului trei al tezei s-au extras următoarele concluzii:

1. sistemul analizat al automobilului a fost sistemul de direcție – sistem de siguranță activă;
2. sistemul de direcție reprezintă cea mai sensibilă interfață dintre conducătorul automobilului și automobil, acesta asigurând virarea roților de direcție la deplasarea automobilului pe traiectorii curbilinii sau ajută la păstrarea poziției acestora la mersul în linie dreaptă, astfel asigurând maniabilitatea automobilului;
3. bieleta de direcție este o unitate funcțională, parte a structurii mecanismului de direcție, cu funcție cinematică de bielă, prin intermediul căreia mișcarea de translație a cremalierei este

transformată în mișcare de virare a roților prin rotirea acestora în jurul pivoților punții. Constructiv aceasta este alcătuită dintr-un corp metalic (corp bieleță), prevăzut la unul din capete cu o cuplă sferică (rotula axială), iar la capătul opus este prevăzută cu posibilitatea de cuplare cu cremaliera printr-o cuplă cilindrică;

4. în urma analizei comportamentului dinamic al unei punți de tip McPherson cu roți de direcție, realizată cu scopul de a determina forțele din Ansamblul Bieleță de Direcție (modelul funcțional de cercetare) s-a concluzionat:

Pe parcursul cercetării au putut fi trasate următoarele concluzii cu privire la caracterizarea materialului prin cercetări experimentale și numerice (capitolul patru):

1. în urma analizei stării plane de tensiuni în jurul unui punct a fost determinată ecuația de definire, reprezentare grafică a unei stări de tensiuni – Cercul lui Mohr, acesta oferind direct informații cu privire la parametrii stării respective, începând cu mărimile valorilor principale ale tensiunilor σ și τ . Tot prin această metodă grafică se poate rezolva și problema inversă în care sunt cunoscute componentele de tensiuni de pe două plane perpendiculare între ele (σ_x , σ_y și τ_{xy}) duse prin punctul analizat, în care trebuie aflate tensiunile principale și direcțiile lor.
2. cu ajutorul coeficientului de triaxialitate a putut fi caracterizată starea de solicitare din material, triaxialitatea având o mare influență asupra deformațiilor plastice pe care materialul le poate prelua până la apariția rupei;
3. în urma analizei stărilor de solicitare s-au definit coeficienții de triaxialitate specifici pentru:
 - solicitarea la întindere (tracțiune): $\eta=0,333$;
 - solicitarea la întindere biaxială: $\eta=0,577$ pentru $k = 1/2$ (valoarea variază în funcție de raportul k dintre σ și τ);
 - solicitarea de forfecare (pură): $\eta=0$;
 - solicitarea combinată de întindere și forfecare: $\eta=0,192$;
 - solicitarea de compresiune: $\eta= - 0,333$.
4. selectarea materialului 30MnVS6 (oțel microaliat), din care a fost obținut corpul analizat al Ansamblului Bieleță de Direcție s-a făcut ținând cont în special de asigurarea condițiilor de prelucrabilitate și a celor de utilizare;
5. modelul numeric de material a fost dezvoltat cu ajutorul analizei numerice;
6. validarea metodelor numerice aplicate modelului de material s-a realizat prin caracterizarea materialului utilizând ca metode experimentale de caracterizare:
 - încercarea la întindere (tracțiune);
 - tehnica corelării de imagini digitale (D.I.C. – Digital Image Correlation);
7. curbele caracteristice ale materialului, exprimarea legăturii grafice dintre: forță-deplasare și tensiune-deformare relativă (curbă măsurată și curbă reală) s-au trasat în urma realizării probelor de tracțiune;

8. dezvoltarea modelului de material capabil de a fi utilizat pentru predicția numerică a duratei de viață a structurilor mecanice s-a realizat prin descrierea modelului numeric în concordanță cu nomenclatorul specific programului Ls-Dyna;
 9. modelul experimental de caracterizare mecanică s-a bazat pe încercarea la tracțiune și studiul triaxialității cu ajutorul epruvetelor specializate, utilizându-se suplimentar metoda D.I.C.;
 10. calibrarea curbei de material s-a făcut utilizând o metodă combinată a modelelor Swift și Voce, parametrii specifici fiind determinați cu ajutorul unui algoritm de calcul în MATLAB;
 11. modelul geometric al epruvetelor testate a fost realizat în programul CATIA V5R19 atât pentru pregătirea desenului de execuție al piesei cât și pentru utilizarea acestuia ca suport pentru realizarea modelului numeric structurat (distribuire regulată a nodurilor);
 12. pentru modelul geometric definit al epruvetelor testate s-a determinat coeficientul modelului combinat Swift-Voce ($\alpha = 0,9$), astfel fiind determinată curba de material fără degradare;
 13. scopul adăugării parametrului EPPF în modelul numeric a fost de a produce ruperea acestuia, determinându-se prin simulări valoarea limitei de rupere ($\varepsilon_r = 0,20 \div 0,25$), aceasta nefiind suficientă pentru caracterizarea materialului;
 14. gătuirea în modelul numeric a apărut doar după introducerea celei de-a treia informații (parametru degradare ΔD – acumularea de ruperi);
 15. mecanismul de degradare a fost introdus în analiză prin adăugarea mecanismului GISSMO, astfel a fost determinat prin simulări modelul numeric potrivit analizei pentru care:
 - limita de rupere $\varepsilon_r = 0,3$;
 - parametrul DMGEXP = 2,0 (coeficientul de degradare) ;
 - parametrul FADEXP = 1,75 (coeficientul de instabilitate);
- făcându-se identificarea și particularizarea stării de tensiune în raport cu triaxialitatea;
16. prin analiza complexă realizată pentru patru tipuri de epruvete cu valori diferite ale parametrului de triaxialitate η (0,0; 0,197; 0,333; 0,395) s-a concluzionat că alungirea la rupere este dependentă de factorul de triaxialitate, obținându-se validarea numerică a factorului de triaxialitate a alungirii la rupere, factor obținut experimental.

În cadrul tezei, în capitolul cinci dedicat analizei experimentale și numerice a Corpului Bieletă de Direcție a fost dezvoltat un concept coerent de validare a unui proces de proiectare cunoscând materialul și performanțele acestuia. Metodele de analiză folosite au fost:

- a) două metode experimentale, nedistructive, pentru determinarea deformațiilor:
 - tensometria optică (metoda D.I.C.);
 - tensometria electrorezistivă (mărci tensometrice);

combinația celor două metode a asigurat corectitudinea rezultatelor și precizia măsurărilor deformației;

- b) o metodă numerică (analiză cu element finit) de validare a unei piese proiectate, din punct de vedere al duratei de viață, analiza cu element finit reprezentând unul din puținele instrumente ce pot oferi informații despre triaxialitate;

c) o metodă experimentală (încercarea la oboseală), realizată cu scopul de a valida piesa.

Astfel că pe parcursul cercetării până în acest punct au putut fi trasate următoarele concluzii:

1. calibrarea modelului numeric s-a realizat prin compararea rezultatelor obținute prin analiză numerică cu rezultatele obținute pe cale experimentală (mărci tensometrice). În cadrul realizării acestei analize a modelului numeric au fost cumulate următoarele date de intrare:

- curba materialului;
- starea de triaxialitate;
- curba de oboseală;

modelul numeric având cumulat: starea de triaxialitate și starea de oboseală;

2. validarea metodei D.I.C. s-a realizează prin utilizarea mărcilor tensometrice (prin similitudinea rezultatelor obținute). În acest studiu, combinația celor două metode experimentale a asigurat exactitatea măsurării deformației, obținându-se prin ambele metode distribuția liniară a deformațiilor;
3. pentru parametrii de intrare setați (forța F , frecvența de lucru, numărul de cicluri și forma semnalului) pentru cele trei piese testate nu s-au înregistrat deteriorări ale Corpului Bieletei de Direcție. Pentru două din cele trei ansambluri testate au cedat pivoții în tipul testului, cel de-al treilea rezistând până la finalizarea acestuia;
4. în urma analizei numerice în cazul deplasării autovehiculului pe un drum cu denivelări în condiții extreme, realizată ținând cont de rezultatele obținute anterior în analiza comportamentului pe un drum cu obstacole, s-a obținut forța maximă prin simulare numerică în cazul deplasării cu viteză ridicată, această forță având valoarea de $\cong 40\text{kN}$, astfel fiind determinată o situație excepțională la care modelul analizat să funcționeze;
5. efectul urmărit prin efectuarea testului de oboseală a fost determinarea condițiilor de rupere la oboseală a modelului funcțional de cercetare, Ansamblu Bieletă de Direcție (corpul) – ruperea la oboseală;
6. în urma analizelor experimentale și numerice realizate pentru Corpul Bieletă de Direcție s-a stabilit o procedură prin testare încrucișată pentru validarea modelelor numerice;
7. validarea rezultatelor experimentale s-a realizat prin analiza cu element finit a corpului analizat;
8. s-a făcut identificarea zonei critice a piesei analizate, această zonă aflându-se la capătul zonei filetate, zona de montare cu elementele conexe care compun sistemul de direcție al automobilului.

În urma activităților desfășurate în cadrul capitolului șase, „Soluții tehnice pentru realizarea modelelor numerice”, cu constrângerea de reprezentare impusă (exclusiv cu elemente finite hexaedrale generate prin mijloace automate) s-au putut trage următoarele concluzii:

1. în urma analizei modelului numeric, pentru forța ce determină exclusiv deformarea piesei exclusiv în domeniul elastic ($F=10\text{kN}$) a fost determinată evoluția tensiunii rezultante în element, constatându-se că valoarea deformării înregistrate este minimă dar cu caracter de acumulare

2. în urma analizei tensiunilor modelului numeric pentru valori diferite ale factorului de scalare s-a constatat că distribuția eforturilor nu prezintă variații semnificative, modificarea corpului neinfluențând performanțele structurale ale piesei. Aceste concluzii oferă informații asupra supradimensionării piesei existente;
3. în zona modificată geometric tensiunile au valoare mică și nu se constată deplasarea sau alterarea zonei critice, zonă în care au fost identificate eforturile maxime;
4. în urma analizei formelor intermediare prin varierea valorii factorului de amplificare (ξ^α) și alegerea formei intermediare pentru analiza particularizată, au fost identificate elemente similare celor care definesc piesa de tip Corp Bieletă de Direcție.

7.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale aduse acestei lucrări sunt concluziile analizelor descrise pe larg în cadrul acesteia, fiind studiați doar anumiți factori de influență, subiectul fiind unul complex.

Astfel, contribuțiile personale ce au fost aduse în domeniul cercetării privind evaluarea duratei de viață a unui produs prin activitatea de cercetare desfășurată pentru elaborarea lucrării, care contribuie și la dezvoltarea ingineriei inverse aplicate în industria auto și nu numai, sunt prezentate în continuare:

1. identificarea și definirea nevoii realizării studiului bazat pe determinarea duratei de viață a unui produs cu aplicație pentru unul din sistemele de siguranță activă ale automobilului – sistemul de direcție;
2. stabilirea obiectivelor principale ale lucrării;
3. dezvoltarea schemei de analiză – structura și organizarea tezei (dezvoltarea schemei de analiză din punct de vedere al duratei de viață a unei structuri mecanice în funcție de tipul materialului, de starea de triaxialitate și de curba de oboseală);
4. stadiul stadiului actual al cercetărilor privind analiza oboselii și mecanica ruperii – analiza și definirea metodelor și a termenilor specifici analizelor;
5. dezvoltarea unui model numeric pornind de la planul funcțional și specificațiile tehnice ale Ansamblului Bieletă de Direcție;
6. construirea modelului numeric al sistemului de direcție pentru analiza comportamentului pe un drum rectiliniu și pe un drum cu denivelări (obstacole), analize necesare pentru determinarea forțelor din Ansamblul Bieletă de Direcție;
7. determinarea coeficientului de triaxialitate pentru diferite solicitări (solicitarea la întindere-tracțiune, solicitarea la întindere biaxială, solicitarea la forfecare, solicitarea combinată de întindere și forfecare și solicitarea de compresiune);
8. selectarea materialului analizat în cadrul tezei: 30MnVS6;
9. dezvoltarea unei metodologii de validare a modelului numeric aplicată unui model de material, realizată prin caracterizarea acestuia, utilizând ca metode:
 - încercarea la tracțiune (întindere);

- metoda D.I.C.;
- 10. descrierea metodologiei și dezvoltarea unui model de material capabil să prezică durata de viață a structurilor mecanice, realizat în concordanță cu nomenclatorul specific programului LS-Dyna;
- 11. dezvoltarea unui model experimental de cercetare mecanică bazat pe încercarea la întindere și studiul triaxialității cu ajutorul epruvetelor specializate, utilizându-se suplimentar metoda D.I.C. (această dezvoltare fiind specifică scopului final al lucrării);
- 12. realizarea epruvetelor specifice testelor pentru caracterizarea materialului, astfel încât rezultatele finale să nu fie influențate;
- 13. dezvoltarea unui algoritm de calcul al parametrilor modelelor Swift și Voce;
- 14. dezvoltarea de aplicații și algoritmi de calcul pentru realizarea modelului geometric al epruvetei, determinarea coordonatelor acesteia și definirea grilelor suport pentru diferite dimensiuni ale elementului finit;
- 15. utilizarea unor cartele specifice LS-Dyna pentru determinarea legii combinate Voce – Swift și a coeficientului α ;
- 16. dezvoltarea unui algoritm de calcul cu mecanismul de degradare GISSMO, având trei variabile:
 - instabilitatea (F);
 - degradarea (D);
 - tensiunea (σ);
- 17. dezvoltarea metodologiei analizei complexe a stării de tensiune în funcție de factorul de triaxialitate, adică de tipul tensiunilor create în corp;
- 18. dezvoltarea unui concept coerent pentru validarea unui proces de proiectare, cunoscând materialul și proprietățile acestuia;
- 19. dezvoltarea și descrierea metodologiei de discretizare a modelelor numerice;
- 20. dezvoltarea și descrierea unui algoritm de generare al modelului 3D al piesei analizate (Corp Bieletă de Direcție);
- 21. dezvoltarea metodologiei de calibrare a modelului numeric prin compararea rezultatelor obținute pe cale experimentală prin tensometria electrodinamică (utilizarea mărcilor tensometrice);
- 22. validarea rezultatelor experimentale ale încercării la oboseală utilizând metoda cu element finit;
- 23. dezvoltarea metodologiei de analiză având ca date de intrare trei variabile:
 - curba specifică a materialului;
 - starea de triaxialitate;
 - curba de oboseală;
- 24. alcătuirea + definirea sistemului de achiziție date din cadrul determinărilor experimentale în tensometria electrodinamică;
- 25. metodologia de validare a metodei D.I.C. prin utilizarea mărcilor tensometrice și prin similitudinea rezultatelor obținute. Combinația acestor două metode experimentale a asigurat exactitatea măsurărilor deformațiilor;

26. descrierea standului de solicitare la oboseală a Ansamblului Bieletă de Direcție și a metodologiei de montaj a piesei pe stand;
27. încercarea la oboseală pe stand a ansamblului analizat;
28. realizarea unui dispozitiv de prindere (montare) pe Mașina Universală de Încercare la Tracțiune din dotarea Universității din Pitești, adaptat pentru testarea Ansamblului Bieletă de Direcție;
29. analiza numerică în cazul deplasării autovehiculului pe un drum cu denivelări în condiții excepționale;
30. analiza cauzelor înlocuirii Ansamblului urilor Bieletă de Direcție în exploatare în perioada 1998÷2006, conform bazei de date deținută de S.C. Componente Auto S.A.;
31. dezvoltarea unor algoritmi de calcul care permit realizarea optimizărilor structurale, ajungându-se la un produs ce respectă tendințele actuale: masă redusă, siguranță în funcționare, caracteristici tehnice etc.
32. analiza statistică a calității elementelor finite ale modelului numeric;
33. realizare analiză secțiuni pentru identificarea valorii minime corespunzătoare zonei critice a piesei pentru identificarea factorului de scalare ce poate fi aplicat secțiunii intermediare a piesei;
34. determinare prin calcul a factorului de scalare ce poate fi aplicat secțiunii intermediare a piesei;
35. efectuarea scalării modelului numeric cu ajutorul unui algoritm MATLAB, pentru determinarea integrității structurale a acestuia sub acțiunea unei forțe;
36. dezvoltarea și aplicarea algoritmului de identificare a formei geometrice a piesei;
37. dezvoltarea modelelor de calcul pentru o piesă de tip cârlig (cu unul și cu două reazeme).

7.3. Perspective de cercetare

Subiectul abordat având o dezvoltare spectaculoasă în ultimii ani, pe parcursul desfășurării activităților specifice lucrării pentru atingerea obiectivelor stabilite inițial s-au identificat o serie de direcții viitoare de cercetare. Principalele oportunități de studiu ce pot fi abordate în viitor pentru lucrări de cercetare sunt:

1. analiza Ansamblului Bieletă de Direcție, ținând cont de tribologie (cuplă sferică);
2. determinarea tensiunilor reziduale de ordinul I în materialele metalice supuse la solicitări externe, prin difracție de radiații X. Analiza tensiunilor reziduale și corelarea rezultatelor cu cele obținute prin metoda GOM;
3. dezvoltarea unor algoritmi de calcul, care permit realizarea optimizărilor structurale.

În contextul ingineriei inverse pot fi exemplificate următoarele subiecte principale de cercetare:

1. dezvoltarea unor aplicații de optimizare (printare 3D) pentru validarea funcționalității;
2. testarea specimenelor obținute prin imprimare 3D și compararea acestora cu cele obținute experimental și prin analiză numerică.

Bibliografie

- [1] RENAULT, "REGISTRATION document - including the annual financial report," 2013.
- [2] D. Valer, *Proiectarea sistemelor mecatronice*, Universitatea Politehnică din Timișoara, 2007.
- [3] M.Untaru ș.a., *Calculul și construcția automobilelor*. Editura Didactică și Pedagogică, 1982.
- [4] ***, *Understanding Fatigue Analysis*. http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/spanish/index.html#page/simulate/simulate/online/fatigue.html. Accesat: 21-Nov-2017.
- [5] A. A. Azeez, *Fatigue failure and testing methods*, University of Applied Sciences HAMK, 2013.
- [6] ***, *Rezistența materialelor II*, Universitatea Tehnică de Construcții București.
- [7] ***, *Basics for Fatigue Analysis of Piping System using Caesar II – What is Piping*. <http://www.whatispiping.com/basics-fatigue-analysis>, Accesat: 21-Dec-2017.
- [8] H. Kuhn, J. A. B. North, J. B. Barsom, P. Blau, ș.a., "Mechanical testing and Evaluation," *ASM Handbook*, ASM International, vol. 8, no. 9. pp. 1689–1699, 2000.
- [9] Y. Liu, L. Kang, H. Ge, "Experimental and numerical study on ductile fracture of structural steels under different stress states," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 158, pp. 381–404, 2019.
- [10] ***, *dexonline - rotație - definiție și paradigmă*. <https://dexonline.ro/definitie/rotație>. Accesat: 08-Nov-2017.
- [11] Chad M. Poepelman, *Axial and torsion fatigue of high hardness steels*, The University of Toledo, 2011.
- [12] ***, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International. 2008.
- [13] K. Dang Van ș.a., "Introduction to Fatigue Analysis in Mechanical Design by the Multiscale Approach," in *High-Cycle Metal Fatigue*, Springer Vienna, 1999.
- [14] R. Patibandla, S. Bhat, "Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review," *Alloy Steel - Prop. Use*, pp. 203–236, 2011.
- [15] D. Dubina, *Introduction to Fatigue*, 2013.
- [16] I. Sandu, S. Tabacu, C. Ducu, "Fatigue Analysis of Rotating Parts. A Case Study for a Belt Driven Pulley," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 252, no. 1.
- [17] P. Tripa, M. Hluș, *Rezistența materialelor*. 2006.
- [18] G. Buzdugan, *Rezistența materialelor*. Editura Tehnică, 1980.
- [19] Rades M., *Rezistența materialelor*. Editura Printech, 2010.
- [20] V. B. Bhandari, *Design of Machine Elements*. 2013.
- [21] C. Osgood, F. Design, *Failure prediction for cyclic and impact loading*, 2004.
- [22] M. Algarni, "Notch factor correction using stress triaxiality of plane-stress state in high-cycle fatigue," *Int. J. Fatigue*, vol. 128, no. July, p. 105204, 2019.
- [23] M. Boghian, *Contribuții privind optimizarea activităților de tratare a epavelor după stingerea vieții autovehiculelor*, Teza de doctorat, Universitatea din Pitești, 2010.
- [24] ***, *Fatigue Stress Action Types*, http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Fatigue/Stress_levels.html. Accesat: 13-Feb-2018.
- [25] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Mc Graw Hill Education.
- [26] H. Călin, U. Marin, I. Soare, G. Druță, *Metode și mijloace de încercare a automobilelor I*. Editura Tehnică București.
- [27] M. A. Luca, T. M. Pisu, *Elemente de tehnologia materialelor*. Editura Luxlibrus, 2014.
- [28] ***, *Lucrări laborator: tehnologia materialelor*, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca,
- [29] ***, *The Materials Information Company*
- [30] D. L. Bagnoli, K. Banerji, B. Boardman, and et. al., "Fractography," *ASM Handbook*, ASM International. p. 857, 1992.
- [31] ***, *Analiza macroscopică a materialelor*, 2006. <https://biblioteca.regielive.ro/laboratoare/stiinta-materialelor/analiza-microscopica-a-metalelor-237061.html>. Accesat: 07-Sep-2018.
- [32] D. R. Mocanu and T. C. s. a. C. Atanasiu, *Încercarea materialelor*. Editura Tehnică, 1982.
- [33] D. Silaghi-Perju, *Rezistența materialelor. Teorie și aplicații*, Universitatea Politehnică din Timișoara, 2013.
- [34] ***, *Tensiuni și deformări specifice. Rezistența materialelor II*. <http://www.mec.tuiasi.ro/RM2/capitole/Cap3.html>. Accesat: 07-Sep-2018.
- [35] ***, *Ecuatiile diferențiale de echilibru ale eforturilor*, Universitatea Tehnică Cluj,
- [36] Y. Lou and H. Huh, "Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress

- triaxiality and the Lode parameter,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 50, no. 2, pp. 447–455, 2013.
- [37] D. Kraehling, D. Anderson, M. Worswick, T. Skrzek, “Effect of stress triaxiality on the constitutive response of super vacuum die cast AM60B magnesium alloy,” Msc Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2014.
- [38] Y. Bai, X. Teng, T. Wierzbicki, “On the application of stress triaxiality formula for plane strain fracture testing,” *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, vol. 131, no. 2, pp. 0210021–02100210, 2009.
- [39] S. Kut, “A simple method to determine ductile fracture strain in a tensile test of plane specimen`s,” *Metalurgija*, vol. 49, no. 4, pp. 295–299, 2010.
- [40] V. Shlyannikov, A. Tumanov, A. Zakharov, A. Gerasimenko, “Surface flaws behavior under tension, bending and biaxial cyclic loading,” *Int. J. Fatigue*, vol. 92, pp. 557–576, 2016.
- [41] A. Neimitz, J. Galkiewicz, I. Dzioba, “Calibration of constitutive equations under conditions of large strains and stress triaxiality,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 1123–1135, 2018.
- [42] L. Kang, H. Ge, X. Fang, “An improved ductile fracture model for structural steels considering effect of high stress triaxiality,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 634–650, 2016.
- [43] L. Driemeier, M. Brünig, G. Micheli, M. Alves, “Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys,” *Mech. Mater.*, vol. 42, no. 2, pp. 207–217, 2010.
- [44] Y. Bao, T. Wierzbicki, “On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 81–98, 2004.
- [45] P. Skubisz, A. Zak, M. Burdek, Ł. Lisiecki, P. Micek, “Design of controlled processing conditions for drop forgings made of microalloy steel grades for mining industry,” *Arch. Metall. Mater.*, vol. 60, pp. 12–14, 2015.
- [46] M.M. Neagu, *Studii și cercetări experimentale privind influența microalierii oțelurilor cu carbon mediu asupra caracteristicilor de deformare la cald prin laminare*, Universitatea Transilvania din Brașov, 2010.
- [47] L. Szabo, *Introducere în modelare și simulare*, Note de curs, pp. 1–6.
- [48] I. Ullah, M. Brandt, S. Feih, “Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures,” *Mater. Des.*, vol. 92, pp. 937–948, 2016.
- [49] B. C. Cerik, K. Lee, S. J. Park, J. Choung, “Simulation of ship collision and grounding damage using Hosford-Coulomb fracture model for shell elements,” *Ocean Eng.*, vol. 173, no. December 2018, pp. 415–432, 2019.
- [50] A. M. Beese, M. Luo, Y. Li, Y. Bai, T. Wierzbicki, “Partially coupled anisotropic fracture model for aluminum sheets,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 77, no. 7, pp. 1128–1152, 2010.
- [51] F. Mocanu, *Elemente De Plasticitate*, Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" din Iasi, note de curs.
- [52] ***, *Încercarea la tracțiune. Curba caracteristică. Definirea caracteristicilor mecanice de rezistență*. <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/tehnica-mecanica/INCERCAREA-LA-TRACTIUNE22.php>. Accesat: 26-Jan-2017.
- [53] P. Nilsson, “Measuring material properties of thin films with DIC and tearing test of laminate,” Blekinge Institute of Technology, 2017.
- [54] N. McCormick, J. Lord, “Digital Image Correlation,” *Mater. Today*, vol. 13, no. 12, pp. 52–54, Dec. 2010.
- [55] ***, *Weblet Importer*. <http://www.mec.tuiasi.ro/rm/incercari/2.htm>. Accesat: 20-Jan-2019.
- [56] ***, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM, no. C, pp. 1–27, 2009.
- [57] ***, *DIN EN 10267*, 1998. .
- [58] ***, *Special Steels (Catalogue GERDAU)*. <https://www.scribd.com/document/259138564/Catalogo-GSE-Ingles-Jul12-2013-10-01-11-21-11>., Accesat: 20-Jan-2019.
- [59] ***, *Broșură Centrul Regional de Cercetare-Dezvoltare pentru materiale, roduse și procese inovatoare destinate industriei de automobile (CRC&D-AUTO)*., Universitatea din Pitești.
- [60] ***, *Modeling, Testing and Calibration of Ductile Fracture*. (École Polytechnique Université Paris-Saclay),
- [61] A. Reyes, O. S. Hopperstad, O. G. Lademo, M. Langseth, “Modeling of textured aluminum alloys used in a bumper system: Material tests and characterization,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 3, pp. 246–268, 2006.
- [62] ***, *MATLAB în inginerie - tutorial (Curs Analiza Numerică a Proeselor Termo-mecanice)*, Universitatea Dunărea de jos din Galați
- [63] N. Breaz, M. Crăciun, P. Gașpar, M. Miroiu, P.-M. Munteanu, *MATLAB in inginerie inversă*. 2011.

- [64] J. Kiusalaas, *Numerical Methods in Engineering with MATLAB*. Cambridge University Press, 2005.
- [65] ***, *Keyword user's manual*, vol. I. Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [66] ***, *Measurement Principles of (DIC)*. <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>. Accesat: 20-Jan-2019
- [67] Y. Xiao, Y. Hu, "An extended iterative identification method for the GISSMO model," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 5, 2019.
- [68] Q. Wang, S. Bruschi, A. Ghiotti, Y. Mu, "Modelling of fracture occurrence in Ti6Al4V sheets at elevated temperature accounting for anisotropic behaviour," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 150, no. July 2018, pp. 471–483, 2019.
- [69] F. Yu, P. Y. B. Jar, M. T. Hendry, "Constitutive analysis of pressure-insensitive metals under axisymmetric tensile loading: A stress triaxiality-dependent plasticity damage model," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 142–143, no. March, pp. 21–32, 2018.
- [70] Q. Yin *et al.*, "An experimental and numerical investigation of different shear test configurations for sheet metal characterization," *Int. J. Solids Struct.*, 2014.
- [71] Q. Yin, C. Soyarslan, K. Isik, A. E. Tekkaya, "A grooved in-plane torsion test for the investigation of shear fracture in sheet materials," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 66, no. November 2013, pp. 121–132, 2015.
- [72] ***, *ASTM B 831-05.*, pp. 5–8, 2009.
- [73] N. E. Laurențiu ș.a., *Procese de fabricație specifice industriei de automobile*. Editura Universității din Pitești, 2013.
- [74] ***, *GOM*. <https://www.gom.com>. Accesat: 20-Jan-2019
- [75] ***, *GOM Training Webinar - 2D Digital Image Correlation with GOM Correlate*. <https://www.youtube.com/watch?v=pGXuXg7dRlo&t=46s>, Accesat: 13-Jul-2019.
- [76] S. Yan X. Zhao, "A fracture criterion for fracture simulation of ductile metals based on micro-mechanisms," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 95, no. August 2017, pp. 127–142, 2018.
- [77] S. I.A. Sandu, S. Tabacu, C. Onescu and C. Ducu, "Complex characterization of the material," in *The 30th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering*, Springer, 2019.
- [78] F. Yu, P. Y. B. Jar, M. Hendry, "Fracture behaviour at the sharp notch tip of high strength rail steels – Influence of stress triaxiality," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 178, pp. 184–200, 2017.
- [79] A. S. Sener, "Steering Wheel Tie Rod Fatigue Life Determination According to Turkish Mission Profiles," *Int. J. Eng. Technol. IJET*, vol. 2, no. 2, pp. 56–63, 2016.
- [80] O. Ikechukwu, I. Aniekan, P. O. Ebunilo, E. Ikpe, "Investigation of a Vehicle Tie Rod Failure In Relation To the Forces Acting On the Suspension System," *Am .J. Eng. Res*, no. 6, pp. 208–217, 2016.
- [81] M. Winklberger, P. Heftberger, M. Sattlecker, M. Schagerl, "Fatigue strength and weight optimization of threaded connections in tie-rods for aircraft structures," *Procedia Eng.*, vol. 213, pp. 374–382, 2018.
- [82] P. Tripa, *Metode experimentale pentru determinarea deformațiilor și tensiunilor mecanice*. 2010.
- [83] F.M. Tufescu, *Traductoare pentru mărimi geometrice.*, Universitatea Alexandru Ioan Cuza, note de curs
- [84] A.M. Boeriu, *Studiu comparativ al principalelor metode de evaluare a tensiunilor remanente* Universitatea Lucian Blaga din Sibiu, 2011.
- [85] A. Bruker, *Analiza materialelor prin difractometrie de radiații X - Curs 1*, pp. 27–28, 2008.
- [86] D. A. Pop, G. Arghir, *Caracterizarea prin difracție cu raze X a unor pulberi Cr-Fe-Al și Cr-Fe-Co aliate mecanic*, 2012.
- [87] Manuela Kadar, *DRX-Domeniu Arheologic*, 1982.
- [88] ***, *Creșterea atractivității și performanței programelor de formare doctorală și postdoctorală pentru cercetători în științe ingineresti - ATTRACTING*.
- [89] J. Elena, M. D. Lucia, "Application of X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) Methods to the Portland Cement Hydration Processes," *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 2(15), pp. 35–42, 2012.
- [90] ***, *Achiziție Difractometru de raze X de înaltă rezoluție pentru măsurarea pulberilor și a filmelor subțiri*, Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru tehnologii izotopice și Moleculare), no. 3072. pp. 1–6, 2014.

- [91] I. Sajó, "Mire jó a röntgendifrakció?," pp. 93–95, 2008.
- [92] P. W. M. Douglas J. Hornbach, Paul S. Prevéy, L. Research, "X-Ray diffraction characterization of the residual stress and hardness distributions in induction hardened gears," *First Int. Conf. Induction Hardened Gears Crit. Components*, no. 513, pp. 69–76, 1995.
- [93] R Riley, "Bragg 's Law," *Phys. Educ.*, vol. 5, no. 6, pp. 371–372, 1970.
- [94] M. Nakashiro, Y. Takaku, Y. Mitani, A. Kohri, 'The Relationship between X-Ray Stress Measured Value and Applied Stress in Elastic/Plastic Deformation Region in Tensile Testing', *Materials Research Proceedings*, Vol. 2, pp 216-222, 2017.
- [95] ***, *Metode de difracție*. Universitatea din București, note de curs.
- [96] ***, *Analiza compușilor prin metode nedistructive. Analiza privind fluorescența și difracția de raze X*. <https://www.slideserve.com/yasuo/analiza-compu-ilor-prin-metode-nedistructive-analiza-prin-fluorescen-i-difrac-ie-de-raze-x>. Accesat: 13-Jul-2019.
- [97] ***, *Sir Charles Wheatstone*. <https://www.britannica.com/biography/Charles-Wheatstone>. Accesat: 11-Jul-2019.
- [98] ***, *Punte Wheatstone*.
- [99] ***, *ARAMIS | GOM*. <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>. Accesat: 11-Jul-2019.
- [100] ***, *ARAMIS 3D Camera | GOM*. <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-3d-camera.html>. Accesat: 13-Jul-2019.
- [101] ***, *Improved Determination of Yield Stress for Sheet Metal Materials* https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/yield_stress_EN.pdf. Accesat: 13-Jul-2019
- [102] ***, *GOM Correlate Features*. <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate/gom-correlate-features.html#c36823>. Accesat: 13-Jul-2019.
- [103] ***, *HBM strain gauges HBM Test and Measurement Strain Gauges Absolute precision from HBM*. <http://spectromas.ro/wp-content/uploads/2018/02/catalog-marci.pdf>. Accesat: 13-Jul-2019].
- [104] I.A. Sandu, Ș. Tabacu, C. Ducu, C. Onescu (2020) "Strain Analysis of a Steering Tie Rod". In: Dumitru I., Covaciu D., Racila L., Rosca A. (eds) *The 30th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering. SMAT 2019*. Springer, Cham.
- [105] S. Tabacu, *Studiul sistemelor mecanice cu ajutorul metodelor numerice. optimizare prin simulare*. Universitatea din Pitești, Note de curs.
- [106] *Introducere în Metoda Elementelor Finite, cu aplicații în mecanica construcțiilor*, Facultatea de Căi Ferate, Drumuri și Poduri, 2012.
- [107] ***, *Introduction to Finite Element Analysis (FEA) or Finite Element Method (FEM)*. University of Victoria, Accesat 10-Jul-2019
- [108] ***, *Introduction to FE Based Fatigue Analysis Using MSC . Fatigue*. Available: https://www.mscsoftware.com/assets/3150_MSC.FatigueTut1_v1.3.pdf.
- [109] ***, *NI 9237 datasheet*. <http://www.ni.com/en-us/support/model.ni-9237.html>. Accesat: 13-Jul-2019.
- [110] ***, *NI 9207 datasheet* http://www.ni.com/pdf/manuals/375206b_02.pdf. Accesat: 13-Jul-2019.
- [111] S. Tabacu, *Report PULLEY-ExtraLoads*. 2013.
- [112] J. Bannantine, J. Comer, and J. Handrock, *Fundamentals of metal fatigue analysis*. New Jersey, 1990.
- [113] G. Glinka, "The Local Stress-Strain Fatigue Method," 2010. https://www.efatigue.com/training/Strain_Life_Method.pdf. Accesat: 08-Jul-2019.
- [114] S. Saberifar, A. R. Mashreghi, M. Mosalaeepur, S. S. Ghasemi, "The interaction between non-metallic inclusions and surface roughness in fatigue failure and their influence on fatigue strength," *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 720–724, 2012.
- [115] J. Robbins, S. J. Owen, B. W. Clark, T. E. Voth., "An efficient and scalable approach for generating topologically optimized cellular structures for additive manufacturing," *Addit. Manuf.* vol. 23 pp 294-304, 2016.
- [116] B. Zhu "Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization : A review," *Mech. Mach. Theory*, vol. 143, p. 103622, 2020.
- [117] F. G. Flores, "A simple reduced integration hexahedral solid-shell element for large strains," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 303, pp. 260–287, 2016.
- [118] N. Famaey, "Structural and mechanical characterisation of bridging veins: A review," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 41, pp. 222–240, 2015.

- [119] T. S. Cao, M. Mazière, K. Danas, J. Besson, “A model for ductile damage prediction at low stress triaxialities incorporating void shape change and void rotation,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 63, pp. 240–263, 2015.
- [120] A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, I. Ashcroft, “Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 81–94, 2018.
- [121] C. Le, J. Norato, T. Bruns, C. Ha, D. Tortorelli, “Stress-based topology optimization for continua,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 4, pp. 605–620, 2010.
- [122] S. H. Jeong, S. H. Park, D. H. Choi, G. H. Yoon, “Toward a stress-based topology optimization procedure with indirect calculation of internal finite element information,” *Comput. Math. with Appl.*, vol. 66, no. 6, pp. 1065–1081, 2013.
- [123] M. Langelaar, “Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing,” *Addit Manuf*, vol 12, pp. 60-70, 2016.
- [124] W. Chen, L. Tong, S. Liu, “Concurrent topology design of structure and material using a two-scale topology optimization,” *Comput. Struct.*, vol. 178, pp. 119–128, 2017.
- [125] M. Brünig, S. Gerke, M. Schmidt, “Damage and failure at negative stress triaxialities: Experiments, modeling and numerical simulations,” *Int. J. Plast.*, vol. 102, no. October 2017, pp. 70–82, 2018.
- [126] Li, Hao, Zhen Luo, Liang Gao Q. Qin, “Topology optimization for concurrent design of structures with multi-patch microstructures by level sets,” *Comput. Meth. App. Mech. and Eng.*, vol. 331, pp. 536-561, 2018.
- [127] J. Hallquist, *LS-DYNA Keyword User’s Manual. Version 970*. Livermore Software and Technology Corporation, Livermore CA., 2003.
- [128] A. M. Mirzendehtdel, K. Suresh, “Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 81, pp. 1–13, 2016.