

# **Evaluarea integrității și durabilității materialelor plastice din industria automotive**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul Inginerie Mecanică  
de către

**Ing. Tamas KRAUSZ**

Președintele comisiei:	prof.univ.dr.ing. Dorin LELEA
Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Liviu MARȘAVINA
Referenți științifici:	prof.univ.dr.ing. Anton HADĂR
	prof.univ.dr.ing. Călin ROȘCA
	prof.univ.dr.ing. Ion Dragoș UȚU

Ziua susținerii tezei: 17.11.2023

# CUPRINS

Lista principalelor notații și abrevieri .....	4
Lista figurilor .....	5
Lista tabelelor .....	9
Introducere .....	11
Capitolul 1 - Materiale polimerice utilizate în industria automotive.....	15
1.1    Introducere .....	15
1.2    Injecția maselor plastice .....	21
1.2.1    Principii fundamentale .....	21
1.2.2    Influența procesului de injecție asupra performanței produsului finit	24
1.3    Policarbonat .....	28
1.3.1    Noțiuni generale .....	28
1.3.2    Aplicații în industria automotive.....	30
1.3.3    Familia de policarbonat Makrolon.....	33
1.4    Concluzii privind stadiul actual al folosirii materialelor polimerice în industria automotive.....	35
Capitolul 2 - Stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate	38
2.1    Introducere .....	38
2.2    Metode experimentale de analiză a policarbonatului și a compozitelor derivate .....	40
2.3    Metode numerice de analiză a policarbonatului și a compozitelor derivate ...	43
2.4    Concluzii privind stadiul actual al cercetării policarbonatelor și a compozitelor derivate.....	43
Capitolul 3 - Caracterizarea mecanică prin încercări statice a materialelor pe bază de policarbonat .....	45
3.1    Introducere .....	45
3.2    Încercări la tracțiune .....	45
3.2.1    Evaluarea influenței vitezei de încărcare .....	46
3.2.2    Evaluarea influenței temperaturii .....	49
3.2.3    Evaluarea influenței îmbătrânirii materialului.....	55
3.3    Încercări de tenacitate la rupere prin încovoiere în trei puncte .....	63
3.4    Concluzii privind comportamentul materialelor pe bază de policarbonat la încercările statice .....	67

Capitolul 4 - Caracterizarea mecanică prin încercări dinamice a materialelor pe bază de polycarbonat.....	68
4.1 Încercări de încovoiere prin șoc a materialelor pe bază de polycarbonat cu ciocanul instrumentat Charpy.....	68
4.1.1 Introducere .....	68
4.1.2 Măsurători experimentale pentru epruvete necrestate .....	71
4.1.3 Măsurători experimentale pentru epruvete crestate .....	73
4.2 Încercări de oboseală prin tracțiune a materialelor pe bază de polycarbonat .	78
4.2.1 Introducere .....	78
4.2.2 Măsurători experimentale .....	82
4.2.3 Elaborarea curbelor de oboseală de tip Wöhler .....	84
4.3 Concluzii privind comportamentul materialelor pe bază de polycarbonat la încercările dinamice .....	89
Capitolul 5 - Modele de material pentru analize utilizând metoda elementelor finite	91
5.1 Introducere .....	91
5.2 Modele de material neliniare elasto-plastice.....	92
5.2.1 Simularea testelor statice .....	93
5.2.2 Simularea testelor dinamice.....	101
5.3 Elaborarea unei analize numerice pentru un produs de tip Head-Up Display .	107
5.3.1 Descriere produs .....	107
5.3.2 Metode de simulare .....	108
5.3.3 Validarea rezultatelor obținute prin încercări experimentale .....	111
5.3.4 Analiza de oboseală .....	113
5.4 Concluzii privind modelarea numerică a materialelor polimerice pe bază de polycarbonat în urma caracterizărilor mecanice .....	116
Capitolul 6 - Concluzii finale .....	121
6.1 Concluzii generale .....	121
6.2 Contribuții originale .....	124
6.3 Direcții viitoare de cercetare .....	125
Cuvânt de încheiere .....	126
Bibliografie.....	127

## Lista principalelor notații și abrevieri

PET	Polietilena tereftalată
ABS	Acrilonitril butadienă stiren
PVC	Policlorura de vinil
PBT	Polibutilen teraftalat
LDPE	Polietilena de joasă densitate
PP	Polipropilena
PS	Polistiren
PC	Policarbonat
PUR	Poliuretan
PC/ABS	Policarbonat/acrilonitril butadienă stiren
PC/PBT	Policarbonat - Polibutilen teraftalat
PC/PET	Policarbonat – Polietilena tereftalată
BPA	Bisfenol A
ADN	Acidul dezoxiribonucleic
CO <sub>2</sub>	Dioxid de carbon
Na	Sodiu
K	Potasiu
UV	Raze ultraviolete
MP	Mase plastice
pVT	Presiune, volum, temperatura
km	Kilometri
kg	Kilograme
N	Newton
Hz	Hertz
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
ISO	International Organization for Standardization
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
HAD	Hollow-cathode Activated Deposition
SENB	Single-Edge-Notch Bending
CMA-ES	Covariance Matrix Adaption Evolution Strategy
NEWUOA	New Unconstrained Optimization with quadratic Approximation
TNM	Three-Network Model

# Lista figurilor

## CAPITOLUL 1

Fig. 1.1. Modelul Chevrolet Corvette C1 având caroseria dintr-un material compozit.

Fig. 1.2. Exemple de componente plastice din componența unui autovehicul.

Fig. 1.3. Structura chimică a policarbonatului.

Fig. 1.4. Exemple de utilizare ale policarbonatului: (a) Faruri auto, (b) Parbrize de motociclete și (c) Căști de protecție.

Fig. 1.5. Policarbonatul în produsele de habitacul: (a) Head-Up Display și (b) Navigații multimedia.

## CAPITOLUL 3

Fig. 3.1. (a) ISO 527-1 – Viteze de încărcare recomandate; (b) Schema de testare cu extensometrul atașat de epruvetă.

Fig. 3.2. Curbe caracteristice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 2405.

Fig. 3.3. Curbe caracteristice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 9415.

Fig. 3.4. Curbe caracteristice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 8035.

Fig. 3.5. Profilul termic standardizat utilizat pentru îmbătrânirea probelor.

Fig. 3.6. Îmbătrânirea probelor: a) graficul înregistrat în urma testării, b) graficul înregistrat detaliat.

Fig. 3.7. Curbe tensiune – deformație specifică în funcție de temperatură pentru cele trei clase de policarbonat: (a) MK2405, (b) MK9415 și (c) MK8035.

Fig. 3.8. Curbele de tensiune – deformație specifică aparținând probelor îmbătrânite și neîmbătrânite pentru cele trei tipuri de policarbonat: (a) MK2405, (b) MK9415 și (c) MK8035.

Fig. 3.9. (a) Sistemul de corelare digitală de tip Dantec Dynamics Q-400 din dotarea laboratorului de Rezistența Materialelor; (b) Probele îmbătrânite, special vopsite și testate în cadrul încercărilor la tracțiune.

## 6 | Lista figurilor

---

Fig. 3.10. Reprezentarea variației coeficientului lui Poisson în funcție de deformația specifică longitudinală pentru cele trei clase de material testate: a) MK2405, b) MK9415 și c) MK8035.

Fig. 3.11. Modulul de elasticitate în funcție de viteza de încărcare pentru materialele investigate.

Fig. 3.12. Rezistența maximă în funcție de viteza de încărcare pentru materialele investigate.

Fig. 3.13. Rezistența maximă în funcție de temperatură pentru materialele investigate.

Fig. 3.14. Modulul de elasticitate în funcție de temperatură pentru materialele investigate.

Fig. 3.15. Coeficientul lui Poisson în funcție de temperatură pentru materialele investigate

Fig. 3.16. Probele pregătite pentru investigațiile statice ale tenacității la rupere.

Fig. 3.17. Imaginile microscopice ale epruvetelor supuse încărcărilor statice de încovoiere în trei puncte: a) MK2405, b) MK9415 și c) MK8035

Fig. 3.18. Curbe forță-deplasare pentru cele trei clase de material testate: a) MK2405, b) MK9415 și c) MK8035.

## CAPITOLUL 4

Fig. 4.1. (a) Probe de tracțiune conform ISO 527-2; (b) Probe de impact crestate și necrestate de tip Charpy conform ISO 179-1.

Fig. 4.2. (a) Instron CEAST 9050 echipament instrumentat de testare la impact; (b) Poziționarea probei în vederea testării.

Fig. 4.3. Probe necrestate în urma impactului: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 4.4. Curbe forță-deplasare, respectiv energie-deplasare pentru probele necrestate: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 4.5. Probe rupte în urma încercărilor dinamice de impact tip Charpy, folosind un ciocan de 5 [J]: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 4.6. Probe rupte în urma încercărilor dinamice de impact tip Charpy, folosind un ciocan de 5 [J]: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 4.7. Curbe forță-deplasare, respectiv energie-deplasare pentru probele crestate: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 4.8. Valorile rezistenței maxime la impact pentru toate cele trei materiale calculate din datele înregistrate.

Fig. 4.9. Instron Electropuls E300 folosit în cadrul încercărilor la oboseală

Fig. 4.10. Măsurarea temperaturii probei în timpul încercărilor la oboseală: a) termocuplul folosit; b) temperatura înregistrată.

Fig. 4.11. Curbele de oboseală și expresiile dreptelor obținute prin regresie liniară: a) Makrolon 2405; b) Makrolon 9415; c) Makrolon 8035.

Fig. 4.12. Curbele teoretice de oboseală obținute la 40°C și la 80°C prin metoda lui Bourgoigne et al.: a) Makrolon 2405; b) Makrolon 9415; c) Makrolon 8035.

## CAPITOLUL 5

Fig. 5.1. Curbe tensiune reală – deformație specifică de plasticitate reprezentând modelul multilinear isotropic hardening pentru: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 5.2. Discretizarea modelului geometric (a) și condițiile la limită definite (b).

Fig. 5.3. Curbe suprapuse de tensiune – deformație specifică reprezentând măsurătorile experimentale și rezultatele numerice pentru: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Fig. 5.4. Comparație între datele experimentale și predicțiile modelului de material ANSYS TNM pentru: a) Makrolon 2405, b) Makrolon 9415 și c) Makrolon 8035.

Fig. 5.5. Predicțiile modelului de material ANSYS TNM pentru Makrolon 2405: (a) gătuirea materialului; (b) zona de rupere a materialului.

Fig. 5.6. Comparație între datele experimentale și rezultatele analizei numerice folosind modelul de material ANSYS TNM pentru Makrolon 2405.

Fig. 5.7. Model de elemente finite utilizat pentru simulări – mesh solid folosind elemente hexaedrice.

Fig. 5.8. Epruvetă necrestată de Makrolon 2405: (a) diagramă forță – timp; (b) Rezultate de deformație din analiza numerică.

Fig. 5.9. Epruvetă necrestată de Makrolon 9415: (a) diagramă forță – timp; (b) Rezultate de deformație din analiza numerică.

Fig. 5.10. Epruvetă necrestată de Makrolon 8035: (a) diagramă forță – timp; (b) Rezultate de deformație din analiza numerică.

Fig. 5.11. Model de elemente finite utilizat în LS-DYNA

## 8 | Lista figurilor

---

Fig. 5.12. Reprezentările grafice ale curbelor viteză – timp de la încercările de impact, respectiv din analizele numerice pentru: (a) MK2405; (b) MK8035.

Fig. 5.13. Sistem de tip Head-Up Display.

Fig. 5.14. Proprietățile de material folosite pentru analiza numerică considerând policarbonatul ranforsat ca material omogen.

Fig. 5.15. Orientarea fibrelor de sticlă în funcție de parametri de injecție conform analizei reologice.

Fig. 5.16. Maparea orientării fibrelor de sticlă pe modelul discretizat al analizei structurale

Fig. 5.17. Model de material liniar anizotropic pentru materialul PC-GF30 obținut în CONVERSE.

Fig. 5.18. Comparația între analizele modale efectuate folosind material izotrop și anizotropic: (a) diferențele privind frecvențele de rezonanță; (b) diferențele privind modurile proprii de vibrație.

Fig. 5.19. Setările de laborator folosite pentru măsurarea frecvențelor de rezonanță și al accelerațiilor pe carcasa de Head-Up Display.

Fig. 5.20. Comparația normalizată între valoarea primei frecvențe de rezonanță obținută în teste de laborator, respectiv în analizele numerice folosind modele de materiale anizotropice și izotropice.

Fig. 5.21. Curba de oboseală definită în cadrul analizei numerice bazată pe măsurătorile experimentale.

Fig. 5.22. Condițiile de contur folosite în cadrul analizei de oboseală: a) fixarea carcasei; b) forța aplicată.

Fig. 5.23. Rezultatele analizei cvasistatice: a) deformația totală; b) tensiunea echivalentă.

Fig. 5.24. Durabilitatea calculată pentru materialul carcasei Head-Up Displayului.



# Lista tabelelor

## CAPITOLUL 2

Tabel 1. Variația densității și a unor proprietăți mecanice de bază în funcție de procentajul fibrelor de sticlă.

## CAPITOLUL 3

Tabel 3.1. Variația modului de elasticitate și a rezistenței la rupere în funcție de regimul de încărcare pentru MK2405.

Tabel 3.2. Variația modului de elasticitate și a rezistenței la rupere în funcție de regimul de încărcare pentru MK9415.

Tabel 3.3. Variația modului de elasticitate și a rezistenței la rupere în funcție de regimul de încărcare pentru MK8035.

Tabel 3.4. Variația rezistenței maxime în funcție de temperatură pentru Makrolon 2405.

Tabel 3.5. Variația rezistenței maxime în funcție de temperatură pentru Makrolon 9415.

Tabel 3.6. Variația rezistenței maxime în funcție de temperatură pentru Makrolon 8035.

Tabel 3.7. Valorile medii și cele de deviație standard ale modului de elasticitate în funcție de temperatură.

Tabel 3.8. Valorile medii și cele de deviație standard ale coeficientului lui Poisson în funcție de temperatură.

Tabel 3.9. Variația modului de elasticitate și a rezistenței maxime datorită îmbătrânirii epruvetelor.

Tabel 3.10. Variația coeficientului de contracție transversală datorită îmbătrânirii epruvetelor.

Tabel 3.11. Valorile medii și deviațiile standard ale tenacității la rupere pentru cele trei tipuri de Makrolon.

## **CAPITOLUL 4**

Tabel 4.1. Rezistența maximă la impact pentru clasele de polycarbonat testate în condiții ne`crestate și crestate

Tabel 4.2. Proprietățile cvasistatice ale materialelor supuse încercărilor la oboseală

Tabel 4.3. Numărul de cicluri în funcție de tensiunile aplicate pentru materialele supuse încercărilor la oboseală

# Introducere

## Obiectul cercetării doctorale

Răspândirea materialelor polimerice în industria automotive a înregistrat un ritm foarte mare. Folosirea materialelor plastice din greutatea medie totală a unui autovehicul a ajuns la un procentaj de aproximativ 10-13%. Plasticele sunt utilizate într-o varietate mare de aplicații precum piese aparținând produselor de habitacul, în produse de caroserie sau chiar și în piese din componența grupului motor sau în piese alcătuiind șasiul.

Printre principalele avantaje aduse de folosirea materialelor plastice în industria automotive se menționează reducerea greutății unor subansamble, îmbunătățirea condițiilor de siguranță sau costuri de fabricație mai scăzute. Pe lângă acestea un alt beneficiu important reprezintă îmbunătățirea aspectelor unor piese, care prin metode convenționale de prelucrare și folosind materiale metalice, nu s-ar fi putut realiza prin limitările de costuri impuse, oferind însă astfel o libertate mai mare creativității inginerilor proiectanți.

Policarbonatele sunt cunoscute ca materiale termoplastice natural transparente, care se caracterizează prin rigiditate mare, prin rezistență bună la variații de temperatură sau prin vâscozitate scăzută în timpul procesării materialului. Acesta reprezintă unul dintre cele mai folosite materiale termoplastice dintr-un spectru larg de industrii, datorită avantajelor pe care le oferă, precum: rezistența excelentă la impact, stabilitatea dimensională, stabilitatea termică, densitatea mică sau izolarea electrică.

Ca și orice alt material și policarbonatul vine cu o serie de dezavantaje, printre care se amintesc: rezistența scăzută față de chimicale, sensibilitatea la zgărieturi sau sensibilitatea la lumina UV. În ciuda acestor dezavantaje policarbonatul a devenit materialul ideal într-o serie mare de aplicații din diferite industrii, printre care se numără produsele de securitate și de protecție, parbrize pentru motociclete, sau diferite carcase pentru produse electronice și electrocasnice.

Datorită tehnologiilor de ultimă generație referitoare la injecția maselor plastice, calități superioare ale suprafețelor pieselor fabricate din policarbonat au fost obținute, oferind astfel acestora valori estetice adăugate. În acest fel policarbonatele și-au găsit repede locul în industria automotive, într-o varietate mare de produse, mai ales în rândul produselor de habitacul, precum ceasurile de bord, Head-Up Display-urile sau navigațiile multimedia.

Cu scopul diminuării neajunsurilor materialelor polimerice de bază în vederea extinderii domeniului acestora de aplicare, compozitele polimerice au fost dezvoltate prin adăugarea fibrelor de armare la matricea plastică. Înțelegerea comportamentului mecanic al materialului compozit selectat este însă esențială în domeniul proiectării pieselor mecanice, care sunt solicitate la multiple încărcări mecanice și termice de-a lungul ciclului de viață.

## 12 | Introducere

---

Policarbonatul ranforsat cu fibră de sticlă, în diferite procentaje, s-a răspândit într-o mare varietate de industrii, cu prilejul înlocuirii materialelor metalice din mai multe considerente.

Numeroși autori au studiat comportamentul policarbonatului, din mai multe perspective, precum pentru aplicații mecanice, pentru aplicații optice sau pentru aplicații care necesită o rezistență și o durabilitate crescută a policarbonatului selectat ca material de bază.

În ceea ce privește subiectul tezei de doctorat, cele mai importante investigații care s-au făcut și care au reprezentat punctul de plecare pentru studiile experimentale și pentru cele numerice, sunt legate de comportamentul static, de comportamentul dinamic, respectiv de mecanismele de rupere ale policarbonatului sau ale derivatelor ranforsate.

Conform literaturii consultate, toate cercetările efectuate au demonstrat că rezistența maximă și modulul de elasticitate al materialului cresc odată cu creșterea cantității volumice a fibrelor, fără ca greutatea produselor finite să fie impactată. Efectul vitezelor de încărcare și al temperaturii asupra proprietăților mecanice au fost, de asemenea, subliniate de numeroși autori.

Puține investigații au fost identificate însă care să se concentreze asupra unor comparații mai detaliate între comportamentul static și dinamic al materialului neranforsat față de una sau mai multe clase ranforsate ale acestuia. Și mai puține studii și-au propus investigația încercărilor dinamice de impact a unor probe crestate din gama policarbonatelor nearmate și armate cu fibră de sticlă. Într-un mod similar se poate spune și despre încercările dinamice de oboseală pentru diferite clase de policarbonat, despre care puține informații se găsesc în literatura de specialitate.

### **Actualitatea și importanța cercetării doctorale**

Cercetarea doctorală reprezintă mare actualitate și relevanță științifică deoarece propune o metodologie completă de evaluare a proprietăților mecanice pentru o clasă de materiale polimerice frecvent folosite în industria automotive.

Prin rezultatele obținute în cadrul încercărilor experimentale, efectuate pe mașini de încercat dedicate, respectând o serie de standarde internaționale, și prin elaborarea unor modele de material validate cu scopul evaluării integrității componentelor din materiale polimerice, teza de doctorat prezintă un potențial ridicat în domeniul proiectării mecanice din industria automotive.

## Scopul și obiectivele cercetării doctorale

Obiectivul principal al tezei de doctorat îl constituie studiul influenței armării cu fibre de sticlă a policarbonatului, asupra proprietăților mecanice statice și dinamice.

Investigațiile definite în cadrul tezei de doctorat pornesc de la stadiul actual în caracterizarea materialelor polimerice și își propun completările investigațiilor deja existente, dar restrânse, respectiv punerea unor baze pentru ariile legate de mecanica și rezistența materialelor unde disponibilitatea datelor este limitată.

Pentru atingerea scopului enunțat se propune, pe de o parte, un program experimental extins, iar pe de altă parte, elaborarea unor modele de material pentru evaluarea numerică a comportamentului policarbonatelor în condiții diferite de încărcări mecanice.

Programul experimental constă din:

1. Caracterizare statică
  - 1.1. Încercări de tracțiune cu scopul evaluării influenței vitezei de încărcare
  - 1.2. Încercări de tracțiune cu scopul evaluării influenței temperaturii
  - 1.3. Încercări de tracțiune cu scopul evaluării influenței îmbătrânirii materialului
  - 1.4. Încercări de tenacitate la rupere
2. Caracterizare dinamică
  - 1.1. Încercări dinamice de impact de tip Charpy pentru probe necrestate și crestate
  - 1.2. Încercări dinamice de oboseală prin tracțiune în domeniul durabilităților mari

Elaborarea modelelor de material pentru analizele numerice constă din:

1. Modele de material pentru încărcările quasistatice
2. Modele de material pentru încărcările dinamice de vibrații
3. Modele de material pentru încărcările dinamice de impact

## Organizarea tezei de doctorat

Teza de doctorat este structurată pe șase capitole, prezentând metodele de determinare experimentale și numerice clar și concis.

În *Capitolul 1* sunt prezentate, în general, materialele polimerice, dezvoltarea acestora, avantajele, dezavantajele, și răspândirea lor în diferite

domeniului ingineresc, cu accent pe industria automotive. De asemenea, este prezentată procesul injecției maselor plastice, plecând de la aspecte teoretice și atingând aspecte precum influența procesului asupra calității produsului finit. Tot în cadrul acestui capitol sunt prezentate noțiunile generale privind policarbonatul, aplicațiile acestuia în industria automotive, respectiv familia de policarbonate Makrolon, selectată pentru investigațiile propuse în cadrul tezei de doctorat.

*Capitolul 2* prezintă stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate, concentrându-se atât pe studii experimentale, cât și pe studii numerice din literatura de specialitate. Acestea relatează investigațiile unor cercetători cu privire la comportamentul cvasistatic, dinamic și asupra mecanismelor de rupere ale materialelor ranforsate și neranforsate pe bază de policarbonat. Capitolul se încheie cu concluziile generale ale studiilor bibliografice asupra unor aspecte precum influența vitezei de încărcare, influența temperaturii sau a armării cu fibre de sticlă a policarbonatului.

În *Capitolul 3* sunt descrise încercările statice efectuate pentru determinarea influenței unor parametri asupra răspunsului cvasistatic al celor trei clase de Makrolon supuse investigațiilor. Sunt scoase în evidență aspecte precum necesitatea determinării rezistenței maxime în funcție de temperatură în cazul în care piesa fabricată dintr-o clasă de policarbonat va funcționa în diverse condiții climatice sau aspecte legate de tenacitatea materialelor, unde materialele au arătat o invers proporționalitate a procentajului de fibră față de ruperea cauzată de încărcarea de încovoiere.

În *Capitolul 4* se prezintă încercările dinamice de impact de tip Charpy, atât pentru probe crestate cât și pentru cele necrestate, subliniind diferențe semnificative în termen de energie absorbită înaintea cedării materialului pentru clasele de material studiate. A doua parte a capitolului prezintă încercările de oboseală efectuate pentru cele trei materiale, setările de test folosite și construirea curbelor de tip Wöhler cu scopul folosirii acestora în evaluarea durabilității pieselor mecanice folosite în industria automotive.

*Capitolul 5* relatează elaborarea modelelor de material pentru analizele utilizând metoda elementelor finite pe baza datelor de material obținute, atât în cazul testelor statice, cât și în cel al testelor dinamice. Printre modelele elaborate se numără modelul de ecruisare izotropică multiliniară, modelul ANSYS TNM sau modelul \*MAT\_089, corespunzător analizelor explicite, menite să reproducă răspunsul dat de materiale în cadrul încărcărilor dinamice de impact. În continuarea capitolului se mai prezintă elaborarea unei analize numerice pentru carcasa unui Head-Up Display, validarea experimentală a rezultatelor, respectiv o analiză de oboseală efectuată pentru determinarea durabilității carcasei analizate.

*Capitolul 6* prezintă concluziile generale ale investigațiilor efectuate, contribuțiile personale ale autorului și direcțiile viitoare de cercetare.

# Capitolul 1 - Materiale polimerice utilizate în industria automotive

## 1.1 Introducere

Istoria materialelor polimerice a luat naștere odată cu inventarea celuloizului în anul 1869, de către John Wasley Hayatt, un renumit chimist din Statele Unite ale Americii. Odată cu invenția celuloizului ia naștere și primul plastic sintetic fabricat din celuloză. Acesta era un polimer care se găsea în mod natural în plante. Termenul de bază a fost adoptat în 1833 de către Jöns Jakob Berzelius, deși definiția polimerului dată de el era destul de diferită față de cea din zilele de astăzi. Evoluția acestui material a început odată cu demararea vulcanizării din primul deceniu al secolului al XIX-lea, care a îmbunătățit duritatea latexului sintetic, semnificând popularizarea polimerului semi-sintetic.

În anul 1907 cunoscutul Leo Baekeland, denumit ca „părintele industriei plasticului”, a fost cel care a creat primul polimer complet sintetic, folosind denumirea bachelită care deriva din numele său. Acest material a fost făcut public în anul 1909. Printre primele produse care au fost fabricate din acest material se numărau: bilele de biliard, prize și aparate de tip radio.

În afara progreselor semnificative în sintetizarea și caracterizarea polimerilor, o înțelegere corectă a acestora nu s-a ivit decât în anul 1920. Înainte de-al doilea deceniu al secolului al XIX-lea, oamenii de știință au avut impresia că polimerii erau grupuri de mici molecule, numite coloide, fără mărimi moleculare bine stabilite, ținute în strânsă legătură de o forță necunoscută, un concept numit „teoria asociației”. În 1922, Herman Staudinger a propus teoria lanțurilor atomice de polimeri ținuți alături de legături covalente, din păcate această concepție nu a fost acceptată mai bine de un întreg deceniu. Totuși după acceptare, Staudinger a și primit Premiul Nobel.

Lucrările lui Wallace Carothers [1] au confirmat că polimerii pot fi sintetizați rațional din monomerii care îi constituie. O importantă contribuție în știința polimerilor sintetici a fost adusă de chimistul italian Giulio Natta și de chimistul german Karl Ziegler, care au câștigat Premiul Nobel în chimie, în anul 1963, pentru „catalizatorul Ziegler-Natta”. În ceea ce privește reacția de adiție, un aport important îl are Paul Flory, în anul 1974. Lucrarea sa extinsă în domeniul polimerilor include cinetica polimerizării pas cu pas și a adiției polimerizării, transferul lanțului atomic, volumul inclus, „Convenția Flory” și „Teorema Flory-Huggins”, pentru care i s-a acordat Premiul Nobel în chimie în 1974. Materiale sintetice, precum nailonul, teflonul sau siliconul au format baza pentru industria polimerilor. De asemenea, în acești ani s-a acordat o deosebită importanță sintetizării raționale a polimerilor.

Cei mai importanți polimeri produși astăzi de pe piață sunt sintetici și produși în volume mari. Polimerii sintetici își găsesc astăzi loc în aproape fiecare

industrie sau segment de viață. Sunt adesea folosiți ca adezivi sau lubrifiante, dar la fel de bine sunt utilizați pentru diverse produse, de la jucării până la avioane.

În prezent polimerul este definit ca fiind o substanță compusă din molecule cu masă moleculară mare, formate dintr-un număr mare de molecule mici identice, numite monomeri, legate prin legături covalente. Cuvântul provine din limba greacă, πολυ (polu), „mult” și μέρος (meros), „parte”. Exemple cunoscute de polimeri sunt plasticul, ADN-ul și proteinele. Polimerii se obțin în urma reacției de polimerizare.

Din marea varietate a polimerilor, sau simplu numind a plasticelor, se pot enumera șase clase, care dețin ponderile majore ale ramurilor de industrie în care acestea se folosesc.

Aceste șase clase de polimeri sunt următoarele:

- *Polietilena tereftalată (PET)* - este un material cunoscut din familia poliesterilor. Acesta are o formă semicristalină când este stabil. Este un material care se poate recicla, este rezistent la impact, alcoolii, umiditate, se topește la 260°C și are o densitate de 1,38 [g/cm<sup>3</sup>]. Un material foarte comun pe care des îl întâlnim în viața de zi cu zi.
- *Clorura de polivinil (PVC sau vinil)* - este definit ca fiind al treilea cel mai cunoscut polimer din întreaga lume. Acesta este compus prin fabricație din petrol și sare. Este un material extrem de durabil în timp și accesibil ca și preț. Un material versatil care nu are nevoie de îngrijiri extra cum sunt alte materiale ce trebuie tratate. Ca și caracteristici putem spune că acesta este un material termoplastice cu o înaltă rezistență. Se regăsește în țevi, izolarea firelor de electricitate, dispozitive medicale, industria automotive etc.
- *Polietilena de joasă densitate (LPDE)* - este acel tip de polietilenă care are o densitate 917-930 [kg/m<sup>3</sup>]. Are o rezistență bună la impact și la reacțiile chimice, este un material cu o flexibilitate crescută care face ca acesta să fie ușor de procesat.
- *Polipropilena (PP)* - este un polimer de adiție, adică termoplastice realizat din combinația de monomeri de propilenă. Acesta este folosit într-o gamă largă de aplicații. Din păcate este un material care este afectat de razele UV astfel este nepotrivit să fie utilizat la altitudini înalte sau în locuri unde razele UV sunt prezente.
- *Polistirenul (PS)* - este derivat prin două forme cunoscute în industria construcțiilor: polistirenul de tip expandat și cel plastic care are o structură rigidă. Cele două nu au aceleași proprietăți fizice și sunt aplicate diferit.
- *Policarbonatul (PC)* - este o rășină sintetică foarte rezistentă, de culoare transparentă, descoperit prin anii 1900 de către chimistul german renumit Alfred Einhorn. Acesta și-a dedicat trei decenii din viață pentru a găsi o aplicație comercială pentru el, însă nu a reușit. Mai târziu, prin anul 1953, Bayer și General Electric au schimbat acest lucru și au început să producă policarbonatul. Ei au fost cei care au schimbat clasică sticlă cu policarbonatul. Dar asta doar în aplicații limitate, deoarece policarbonatul la acea vreme avea o culoare maro care nu inspira încredere pe piață. Abia în anul 1970 a apărut policarbonatul transparent. Acest material a fost folosit



în ochelari de protecție, componente pentru mașini, precum apărătoarele, sau la avioanele de luptă cu reacție. Pe piața actuală putem găsi policarbonat în trei variante: translucid, colorat sau transparent.

Materialele polimerice au o densitate considerată destul de scăzută, obținând astfel piese ușoare, datorită capacităților bune de izolare ele pot fi utilizate în domeniul electric și au și o conductivitate termică scăzută. Însă ele vin și cu niște dezavantaje precum: se umflă la contactul îndelungat cu apă, au temperaturi scăzute de topire și sunt sensibile la lumina UV.

Familia plasticelor poate fi împărțită în trei categorii majore, care pot fi diferențiate prin caracteristici fizice diferite, prin diferite comportamente, respectiv prin utilizarea acestora în diferite domenii ale industriei.

Prima categorie este cea a termoplasticelor, prin care se înțeleg polimerii care se înmoaie în urma încălzirii și, în consecință, devin maleabili până când se răcesc, astfel solidificându-se. Aceste materiale pot fi încălzite, turnate și solidificate de mai multe ori, spre deosebire de plasticele termorigide, care odată turnate și solidificate nu mai pot fi topite și a doua oară.

Pe lângă aceste două grupuri mari de materiale polimerice este și categoria elastomerilor, sau altfel spus a cauciucurilor, caracterizate prin elasticitatea și abilitatea lor de a se deforma și de a se reveni la forma lor inițială în urma deformațiilor.

Un alt avantaj al acestor materiale este că, spre deosebire de metale și ceramice, polimerii nu necesită finisaje pentru a arăta bine și pentru o perioadă lungă de timp. Polimerii, cum ar fi plasticul, pot fi formați cu ușurință pentru a face aproape orice formă imaginabilă și care, în mod normal, sunt durabile. Cu toate acestea dezavantajul acestora este că mulți polimeri nu pot fi expuși la temperaturi extreme și nu își mențin întotdeauna forma originală (turnată) în apă.

Materialele polimerice ocupă o poziție vitală în nivelul global al economiei. Începând cu anul 1950 utilizarea acestui tip de material s-a extins de douăzeci de ori, datorită costului redus, proprietăților chimice și diversitatea în aplicarea acestora în domeniile din industriile componente ale economiei. Totuși un alt factor care a adus la consumul acestuia este și nivelul crescut al populației și al veniturilor acestora. Datorită acestor factori de creștere în ultimii 20 ani producția la nivel global s-a dublat.

Principalul consumator de materiale polimerice din secolul actual este chiar industria de ambalare. Conform unor statistici se estimează că rata de dezvoltare a materialelor polimerice va fi în continuare în medie de 10 procente anual în toată lumea. Chiar dacă această industrie este în continuă dezvoltare, una dintre preocupările actuale ale furnizorilor de ambalaje din plastic este producerea de "ambalaje verzi", reciclabile și cu o rată de poluare cât mai scăzută.

Materialele plastice au pătruns adânc în domeniile de utilizare ale sticlei, tablelor și foliilor metalice, extinderea și perfecționarea sistemelor de ambalaje.

O altă industrie în care materialele polimerice își vor continua ascensiunea este domeniul materialelor de construcții, pe plan mondial atingându-se ritmuri de creștere atât în producție cât și în consumul materialelor polimerice de 10-15%. Câteva produse exemple sunt profilele din materiale plastice care au ca scop înlocuirea tablelor clasice, panouri stratificate cu izolație termică și fonică din spume poliuretanică, produsele folosite în instalații sanitare și electrice.

Cei mai tradiționali beneficiari ai acestor materiale polimerice sunt industria de electrotehnică și electronică. Aceștia au cunoscut o pătrundere relativ importantă a maselor plastice, în special polimerii tradiționali precum policlorura de vinil, polietilena, polistirenul dar și unele mase plastice speciale cum sunt policarbonații, poliacetali, polifenilen oxidul etc.

O altă industrie în continuă dezvoltare și cercetare este industria aerospațială. Aici sunt impuse câteva condiții principale pentru materialele plastice utilizate în acest domeniu cum ar fi: rezistență la temperaturi atât foarte ridicate cât și extrem de scăzute. În cazul în care acestea ard ele nu trebuie să scoată fum. Astfel hublourile avioanelor se confecționează din policarbonat rezistent la foc care are și o excepțională rezistență la șoc. Pentru cabinele de pasageri se folosesc laminate din rășină epoxidică sau în unele cazuri și/sau fenolică ranforsate cu fibre de sticlă și acoperite cu un strat metalic subțire pentru rezistența cât mai mare la temperaturi ridicate și la foc. Pentru construcția navelor spațiale se utilizează plăci cu structură sandwich de grafit - rășină epoxidică - bor - aluminiu, care rezistă la temperaturi extrem de ridicate.

Materialele plastice oferă un potențial nelimitat pentru inginerie. Sunt atât de speciale pentru că contribuie semnificativ la calitatea vieții consumatorului oriunde sunt folosite. Acest lucru este valabil mai ales pentru plasticul din autovehicule: cu proprietățile lor versatile și numeroasele posibilități de aplicare, ele fac mobilitatea de astăzi mai eficientă și mai sigură, mai confortabilă și mai frumoasă. Industria automotive a înregistrat cel mai alert ritm de asimilare a materialelor polimerice. O medie pe plan mondial, arată faptul că ocupă o rată de 44% a folosirii acestor tipuri de materiale. Utilizarea maselor plastice în industria automotive a început pe la sfârșitul deceniului IV al secolului XX. Primele componente ale unor vehicule au fost butoanele colorate din material de bachelită pentru comenzile la instrumentul de bord. Vehiculul Chevrolet Corvette a fost prima mașină realizată în întregime (caroseria) din poliester armat cu fibră de sticlă (Fig. 1.1). În această perioadă au început să utilizeze și mase plastice transparente pentru realizarea farurilor.



Fig. 1.1. Modelul Chevrolet Corvette C1 având caroseria dintr-un material compozit.

Evoluția folosirii maselor plastice în industria automotive, în volum, a văzut o creștere de la 2%, în anul 1962, la aproximativ 6% în anul 1980, și o creștere rapidă la 8% peste 5 ani. Actualmente, conform statisticilor, se află la o medie de 50%.

În medie, un autovehicul folosește aproximativ 150 [kg] de materiale plastice și materiale compozite, față de 1163 [kg], considerată ca fiind greutatea medie a unei mașini.

Există trei domenii care necesită cea mai mare prioritate de cercetare și dezvoltare pentru materialele plastice. Acestea sunt:

- interiorul sau habitaculul
- caroseria sau exteriorul
- grupul motor/propulsor și șasiul

Printre beneficiile aduse de introducerea materialelor plastice în industria producătoare de autovehicule rutiere se pot enumera:

- a) Materialele plastice reduc greutatea mașinii

Polimerii de înaltă calitate reduc semnificativ greutatea unei mașini. Acest lucru este crucial, deoarece face vehiculul mai eficient din punct de vedere al consumului de combustibil și reduce astfel eliberarea de gaze cu efect de seră, făcând autovehiculele mai ecologice și prietenoase cu mediul înconjurător.

De exemplu, greutatea unei mașini moderne poate fi redusă cu aproximativ 100 kg, ceea ce duce la o scădere a consumului de combustibil cu aproximativ 0,4 litri la 100 [km] (o estimare generală). Acest lucru mărește, de asemenea, distanța de călătorie, fiind în același timp eficient din punct de vedere al costurilor. De asemenea, reduce emisiile de CO<sub>2</sub>, cu aproximativ 10 [g/km], reducând amprenta de carbon a vehiculului.

### b) Materialele plastice îmbunătățesc siguranța mașinii

Anumite materiale plastice sunt considerate mult mai durabile și mai puternice decât materialele metalice. Din acest motiv, spre exemplu, barele de protecție sunt din material de tip polimer, pentru ca acestea pot absorbi bine impactul. Aceste bare de protecție au fibre de sticlă încorporate cu polimeri, cum ar fi policarbonat (PC), polipropilenă (PP), acrilonitril butadien stiren (ABS), poliuretan (PUR) și poliamidă (PA). Ele cântăresc cu 50% mai puțin decât materialele alternative și pot absorbi de patru până la cinci ori mai bine impactul decât materialele metalice utilizate în aceste scopuri.

În plus, centurile de siguranță, airbagurile, scaunul pentru copii și chiar geamurile sunt fabricate din polimeri și materiale plastice de înaltă calitate, care fac mașina mai sigură pentru șofer și pasageri.

### c) Materialele plastice au redus costurile de fabricație ale mașinilor

Timpul fabricației autovehiculelor și costurile de asamblare ale acestora s-au redus semnificativ de-a lungul anilor datorită introducerii componentelor unice și a altor convenții și inovații de proiectare. Aceste piese din plastic sunt, de asemenea, rezistente la coroziune și este mai puțin probabil să se defecteze datorită designului lor special care nu are sudură, și a rezistenței acestora la temperaturile foarte ridicate sau foarte scăzute.

### d) Materialele plastice îmbunătățesc designul auto

Datorită inovațiilor făcute în domeniul materialelor plastice în industria automotive, acum designerilor și inginerilor le este permis să facă inovații care nu erau posibile cu câteva decenii în urmă. Acest lucru se datorează versatilității și flexibilității materialelor plastice. Un design excelent vine și cu o îmbunătățire a funcționalității. Un alt beneficiu adus pe lângă versabilitate și flexibilitate este că sunt mai ușor de înlocuit și reparat decât piesele metalice.

### e) Materialele plastice fac mașinile mai confortabile

În afară de actualizarea designului exterior al unui automobil, designul interior și calitatea produselor de habitacul au cunoscut, de asemenea, multe îmbunătățiri datorită materialelor plastice. Aceste îmbunătățiri includ scaune mai ergonomice și mai confortabile, care se potrivesc formei corpului, având greutatea mai redusă în același timp, sau filtrarea razelor infraroșii prin diferite folii polarizate și de protecție aplicate geamurilor, pentru a menține mașina mai răcoroasă în zilele caniculare.

Masele plastice folosite în industria automotive sunt materiale obținute pe bază de compuși macromoleculari. Prin această tehnică s-au obținut următoarele componente: rezervoare de combustibil, materiale pentru izolarea cablurilor, fibre de tapițerie, scaune, roți și anvelope, bușe de suspensie, tablouri de bord, capacele roților, carcase pentru diferite componente electronice, ecrane tactile, lentilele farurilor, apărătoare de noroi, piese interioare de transmisie, bare de protecție și multe alte componente de mici dimensiuni. În figura 1.2 sunt prezentate câteva dintre componentele fabricate din materiale plastice din componența unui autovehicul.

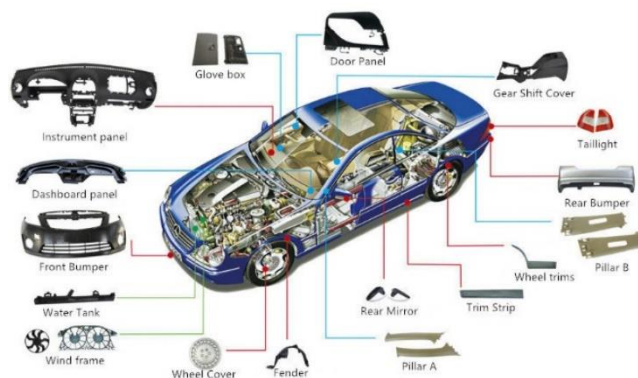


Fig. 1.2. Exemple de componente plastice din componența unui autovehicul.

Protecția mediului este una dintre principalele probleme de luat în considerare pentru noile dezvoltări industriale. Pentru producătorii de automobile, de exemplu, unul dintre obiectivele principale ale strategiei de reducere a CO<sub>2</sub> este reducerea greutății vehiculelor, în special prin înlocuirea pieselor metalice cu materiale termoplastice. Utilizarea termoplasticelelor armate cu fibre scurte este astfel crescută pe scară largă, chiar și pentru aplicațiile din compartimentul motor. Aceasta reprezintă provocări tehnice, deoarece piesele pot fi supuse la temperaturi de până la 130°C sau pot fi complet scufundate în lichide de răcire. Înțelegerea comportamentului mecanic, prin urmare, este esențială pentru a proiecta piese mecanice rezistente. În plus, inginerii proiectanți trebuie să asigure performanța materialului împotriva oboselii în vederea creării unor piese structurale care își îndeplinesc funcția pe toată durata de viață a unui autovehicul.

## 1.2 Injecția maselor plastice

### 1.2.1 Principii fundamentale

Turnarea prin injecție este cel mai important proces utilizat pentru fabricarea produselor plastice. Astăzi majoritatea materialelor termoplastice sunt realizate prin injecție și mai mult de jumătate din totalul echipamentelor de procesare a polimerilor sunt pentru fabricarea prin injecție. Procesul injecției maselor plastice a început încă din 1872, când frații Hyatt și-au patentat mașina de umplut pentru a injecta celuloză în matrițe introduse. Mașinile de turnat prin injecție sunt compuse din unitatea de plastificare, unitatea de strângere și matrița propriu-zisă. Cu toate acestea, mașina de turnat prin injecție de astăzi este în principal legată de mașina de turnat prin injecție cu șurub alternativ, brevetată în 1956.

Turnarea prin injecție este considerată ca un proces de producție complex, deoarece pentru procesare este nevoie de folosirea unei mașini hidraulice sau electrice specializată. Procesul presupune topirea, injectarea și fixarea plasticului în forma unei matrițe metalice care este montată în mașină.

Turnarea prin injecție a maselor plastice este cel mai utilizat proces de fabricare a componentelor din mai multe motive:

- **Flexibilitate:** producătorii pot alege tipul de termoplastice utilizat pentru fiecare componentă și designul acestuia. Asta înseamnă că procesul de turnare prin injecție poate produce o varietate largă de componente, inclusiv piese care sunt complexe și foarte detaliate pentru fiecare client în parte.
- **Eficiență:** odată ce este ales materialul și designul după o testare, mașinile de turnat prin injecție pot produce mii de articole pe oră.
- **Consecvență:** dacă parametrii procesului sunt strict controlați, procesul de turnare prin injecție poate produce rapid mii de componente la o calitate constantă de la prima piesă până la ultima.
- **Eficiența costurilor:** odată ce matrița a fost construită și testată, costul de producție per componentă este relativ scăzut, mai ales dacă este creat într-un număr de ordine a sutelor. Cea mai scumpă dintre toate este matrița după care se toarnă restul.
- **Calitate:** procesul de turnare prin injecție este capabil să producă la o calitate înaltă, în mod repetat, chiar dacă producătorii vor componente rezistente la tracțiune sau vor ca produsele lor să fie foarte detaliate.
- **Rentabilitate:** eficiența și calitatea componentelor sunt doar câteva dintre motivele pentru care multe industrii aleg să folosească piese turnate prin injecție pentru produsele lor finite.

Deși la prima vedere, procesul de turnare prin injecție poate părea chiar simplu, există mulți parametri care trebuie cunoscuți și controlați strâns pentru a asigura calitatea generală bună a componentelor din plastic produse. Pentru acesta este nevoie de-a înțelege procesul și a cunoaște parametrii într-o oarecare profunzime. Acest lucru vine în ajutorul producătorilor iar în acest scop există 5 pași care trebuie urmați.

Pasul 1 presupune selectarea termoplasticului și a matriței potrivite. Înainte de-a începe procesul propriu-zis de turnare prin injecție, este esențial să fie selectate sau chiar create materialele termoplastice cu care se va lucra și matrițele potrivite, deoarece acestea sunt elementele cheie care creează și formează produsul final cerut de către client. Însă este foarte important și procesul de alegere a materialului și a matriței pentru că unele nu interacționează bine și pot duce la eșec deoarece anumite tipuri de materiale plastice s-ar putea să nu fie potrivite pentru anumite modele de matriță.

Un instrument de matriță este alcătuit din două părți: cavitatea și miezul. Miezul este partea mobilă care se potrivește în cavitate, iar cavitatea este partea fixă în care plasticul este injectat. Presiunile și temperaturile ridicate repetate la care sunt supuse uneltele de matriță înseamnă că acestea sunt de obicei fabricate din oțel sau aluminiu.

Testarea sculei cu materialul termoplastic potrivit este cheia pentru a asigura o componentă finală care are proprietățile potrivite. Fiecare termoplastic oferă diferite caracteristici, rezistențe la temperaturi și presiune datorită structurii lor moleculare. Selecția finală a termoplastului va depinde de caracteristicile de care producătorii au nevoie de la componenta lor finală și de designul sculei de matriță. Odată ce termoplastul și matrița potrivită au fost testate și selectate, procesul de turnare prin injecție poate începe.

Pasul doi este definit prin alimentarea și topirea termoplastului. Mașinile de turnat prin injecție pot fi alimentate fie hidraulic, fie electric. Pentru a începe procesul, peleți bruți din termoplastul ales sunt introduși în buncărul din partea superioară a mașinii. Pe măsură ce șurubul se rotește, acești peleți sunt introduși treptat în cilindrul mașinii. Rotirea șurubului și căldura din butoi vor încălzi treptat și vor topii termoplastul până ajunge în formă lichidă.

Pasul 3 constă din injectarea plasticului în matriță. Odată ce plasticul topit ajunge la capătul butoiului, poarta (care controlează injectarea plasticului) se închide și șurubul se deplasează înapoi. Acesta trage o cantitate stabilă de plastic și crește presiunea în șurubul gata pentru injecție. În același timp, cele două părți ale sculei de matriță se apropie și sunt ținute la presiune înaltă, cunoscută sub numele de presiune de strângere.

Presiunea de injecție și presiunea clemei trebuie echilibrate pentru a se asigura că piesa se formează corect și că niciun plastic nu iese din instrument în timpul injecției. Odată ce presiunea potrivită în instrument și șurub este atinsă, poarta se deschide, șurubul se deplasează înainte, iar plasticul topit este injectat în matriță.

Pasul 4 corespunde timpului de menținere și de răcire. Odată ce cea mai mare parte din plastic este injectată în matriță, acesta este menținut sub presiune pentru o perioadă stabilă. Acesta este cunoscut sub numele de „timp de menținere” și poate varia de la milisecunde la minute, în funcție de tipul de termoplastic și de complexitatea piesei. Acest timp de reținere este esențial pentru a ne asigura că plasticul împachetează instrumentul și este format corect.

După faza de menținere, șurubul se retrage, eliberând presiunea și lăsând piesa să se răcească în matriță. Acesta este cunoscut sub denumirea de „timp de răcire”, variind și de la câteva secunde la câteva minute și asigură că componenta să se stabilească corect înainte de a fi evacuată și terminată pe linia de producție.

Pasul 5 sau procesele de evacuare și finisare, presupune că după ce timpii de menținere și răcire au trecut și piesa este în mare parte formată, știfturile sau plăcile ejectează piesele din unealtă. Acestea cad într-un compartiment sau pe o bandă transportoare din partea de jos a mașinii. În unele cazuri, pot fi necesare procese de finisare, cum ar fi lustruirea, vopsirea sau îndepărtarea excesului de plastic (cunoscut sub numele de pinteni), care pot fi finalizate de alte utilaje sau operatori. Odată ce aceste procese sunt finalizate, componentele vor fi gata pentru a fi împachetate și distribuite producătorilor.

Un inginer experimentat de prelucrare a polimerilor poate determina de obicei care mașină de turnat prin injecție este adecvată pentru o aplicație specifică. Pentru inginerii cu mai puțină experiență găsirea presiunii de menținere adecvate și forța de închidere a matriței corespunzătoare poate fi dificilă.

Necesitând un anumit nivel de dificultate, însă se poate controla și prezice forma componentelor și tensiunea reziduală a acestora la temperatura camerei. De exemplu urmele de surpare (sink mark) în produsul final sunt cauzate de strângerea materialului în timpul răcirii.

Turnarea prin injecție vine cu multe avantaje, cum ar fi un ciclu scurt de producție, producerea unei suprafețe excelente și formarea ușoară a formelor foarte complicate. Recent această tehnologie de fabricație a devenit foarte mult folosită într-o scală largă de industrii. Deși este cea mai importantă metodă în fabricarea materialelor plastice, caracteristicile produsului sunt ușor afectate de modul de curgere al topiturii și de efectele transferului de căldură. Astfel, diferitele condiții de turnare prin injecție vor induce orientări diferite ale fibrelor [2], [3], [4], [5]. În trecut, orientarea fibrelor a fost neglijată și au fost aplicate caracteristici mecanice izotrope. Cu toate acestea, cu o mai bună înțelegere a efectului de răcire în jurul fluxului de topire al plasticului, designul produsului a cunoscut o schimbare majoră. Controlând mișcarea fluxului de topire și răcirea matriței, putem avea mai mult control asupra orientării fibrelor. Produsul va avea o rezistență mai mare într-o anumită direcție, astfel încât să poată atinge scopul proiectării ingineresti al acestuia.

Siegmann et al. [6] și So et al. [7] au subliniat că schimbarea condițiilor de turnare prin injecție ar modifica și orientarea fibrelor și împrăștierea tensiunii reziduale, deci ar modifica caracteristicile mecanice ale produselor ce urmează a fi obținute. Alți cercetători [8], [9], [10] au descoperit că gradul de distribuție a fibrei poate îmbunătăți rigiditatea și rezistența compozitului și, în foarte multe cazuri, tenacitatea poate la fel să crească. Produse precise sunt acum necesare în industria materialelor plastice care au stres rezidual redus, astfel încât condițiile de turnare prin injecție ar trebui să fie alese cu grijă pentru a evita produsele neuniforme și pentru a oferi caracteristici mecanice excelente.

### 1.2.2 Influența procesului de injecție asupra performanței produsului finit

#### 1.2.2.1 Aspecte teoretice

Proprietățile mecanice și stabilitatea dimensională a unei piese polimerice turnate depind în mare măsură de anizotropia piesei finite. Structura piesei finite este influențată, la rândul ei, de designul cavității matriței, mai exact de tipul și poziția punctelor de injecție, respectiv de numeroasele condiții de procesare, precum viteza injectării, temperaturile topiturii sau a amestecului de material, vitezele de răcire și de încălzire a matriței etc. De asemenea, cantitatea și tipul de material de umplutură sau de armare, are și ea o mare influență asupra calității piesei finite.



După injecția și formarea produsului, acesta trebuie să se întărească, fie prin răcire, fie prin reacții chimice. După cum se știe, un polimer termoplastice se întărește pe măsură ce temperatura materialului scade sub temperatura de topire, în cazul unui polimer semicristalin, sau sub temperatura de tranziție a sticlei (glass transition) pentru un termoplastice amorf.

Un termoplastice are capacitatea de a se înmuia din nou pe măsură ce temperatura materialului este ridicată peste temperatura de solidificare. Pe de altă parte, solidificarea duce la legarea încrucișată a moleculelor. Efectul încrucișării moleculelor sunt ireversibile și duc la o rețea care împiedică mișcarea liberă a lanțurilor de polimeri independent de temperatura materialului. Procesul de solidificare va duce la tensiuni reziduale și, în consecință, la deformații (warping) în urma răcirii materialului, reprezentând una dintre cele mai mari probleme ale inginerului proiectant.

#### 1.2.2.2 Omogenitatea materialului injectat

În timpul prelucrării, moleculele, matricea polimerică și fibrele sunt orientate în direcția curgerii și afectează foarte mult proprietățile piesei finite. Atunci când componentele termoplastice sunt fabricate, moleculele de polimer devin orientate. Orientarea moleculară este indusă de deformarea topiturii polimerului în timpul procesului. Lanțurile moleculare flexibile se lungesc și, din cauza încrucișărilor, ele nu se pot relaxa suficient de repede înainte de răcirea și solidificarea piesei. La temperaturi mai scăzute de procesare, acest fenomen este multiplicat, ducând la grade și mai mari de orientare moleculară. Această orientare este resimțită în proprietățile de rigiditate și rezistență ale piesei polimerice. Orientarea dă naștere și birefrinței, sau refracției duble, care constă dintr-o serie de linii colorate numite izocromatice, vizibile, apărute pe măsură ce lumina polarizată străbate o piesă. Izocromaticele sunt linii de orientare moleculară egală și numerotate de la zero, în regiunea fără orientare, la numere mai mari cu creșterea gradului de orientare. O orientare de zero grade de obicei corespunde locului din matrice care se umplă ultimul, iar gradul de orientare crește spre punctele de injecție. Diferite studii au arătat că o distribuție a orientării moleculare există prin grosimea pieselor subțiri obținute prin injecție.

Gradul de orientare crește și scade în funcție de diferitele condiții de prelucrare și materiale. Pentru majoritatea materialelor, gradul de orientare crește odată cu scăderea grosimii peretelui. O explicație pentru aceasta este că gradientii de viteză cresc atunci când grosimea pereților se scade, iar viteza de răcire crește lăsând mai puțin timp pentru relaxarea moleculară. Orientarea este legată și de procesul utilizat pentru fabricarea piesei.

Se poate spune că orientarea moleculară sau cea a umpluturilor în cazul pieselor injectate poate fi împărțită în șapte straturi:

- Două straturi exterioare subțiri cu o orientare biaxială, aleatoriu în plan

- Două straturi groase vecine cu straturile exterioare cu o orientare principală în direcția curgerii
- Două straturi subțiri de tranziție orientate aleatoriu lângă miezul central
- Un strat central gros cu o orientare principală în direcția circumferențială

Există trei mecanisme care conduc la un grad ridicat de orientare în piesele turnate prin injecție: efectul curgerii în cascada, curgerea radială și curgerea indusă de presiunea de menținere.

Efectul de curgere în cascada este cauzat de condiția anti-alunecare a pereților matriței, care forțează materialul din centrul piesei să curgă în afară spre pereții matriței. Topitura care curge în interiorul cavității îngheață când ajunge în contact cu pereții răciți ai matriței. Topitura care intră în cavitate curge între straturile înghețate, forțând suprafața frontală a topiturii să se întindă și să se desfășoare pe peretele rece, unde îngheață instantaneu.

Curgerea radială este al doilea mecanism care duce adesea la orientare perpendiculară pe direcția curgerii în stratul central al unei piese turnate prin injecție. Materialul care intră prin punctul de injecție este întins transversal în timpul expandării radiale în timp ce se îndepărtează de la punctul de injecție. Această curgere este foarte bine reprezentată în programele speciale de analiză a injecției maselor plastice.

#### 1.2.2.3 Defecte aferente procesului

Din natura procesului de injecție a maselor plastice, dar și legat de natura materialelor, respectiv de formele și dimensiunile geometrice, în piesele finite pot exista o serie de defecte. Acestea pot influența doar aspectul pieselor, dar în unele cazuri și rezistența mecanică a acestora.

Cele mai uzuale defecte specifice procesului de injecție sunt:

##### a) Deteriorarea fibrelor

Un aspect important al prelucrării polimerilor ranforșați cu fibră de sticlă este deteriorarea sau uzura fibrelor. Acest lucru este valabil în special în timpul turnării prin injecție, caracterizată prin tensiuni mari de forfecare. Deoarece polimerul este topit și pompat în interiorul secțiunii șurubului mașinii de injecție și cum acesta este forțat să treacă prin punctul îngust de injecție, majoritatea fibrelor se vor scurta în lungime, reducând proprietățile produsului final. Solicitarea de întindere nu este suficient de mare astfel încât să cauzeze deteriorarea fibrelor, însă solicitarea de compresiune duce la flambarea și ruperea acestora.

## b) Contractăia, tensiunile reziduale și deformația

Unele probleme majore întâmpinate la turnarea pieselor polimerice sunt controlul și predicția formei componentelor la temperatura camerei. De exemplu, urmele de surpare (sink mark) rezultate în produsul final sunt cauzate de contractăia materialului în timpul răcirii sau tratării. Deformarea produsului final este adesea cauzată de condiții de procesare care provoacă distribuții nesimetrice ale tensiunilor reziduale prin grosimea piesei. Piese termoplastice cele mai afectate de tensiunile reziduale sunt cele care sunt fabricate prin procesul de turnare prin injecție.

Diagrama  $pVT$  a unui polimer poate fi utilizată pentru a urmări procesul și a prezice micșorarea topiturii. Deoarece comportamentul  $pVT$  al plasticului face legătura între grosimea piesei finale cu grosimea cavității matriței, diagrama poate fi utilizată pentru a estima efectul modificărilor asupra condițiilor de proces în timpul proiectării sau optimizării pieselor și proceselor.

## c) Urmele de scufundare (sink marks)

O geometrie comună care duce de obicei la o urmă de scufundare sau de adâncitură este o structură cu nervuri. Dimensiunea urmei de adâncitură, care este adesea doar o problemă cosmetică, nu are legătură doar cu materialul și condițiile de prelucrare, ci și cu geometria piesei. O nervură care este groasă în raport cu grosimea flanșei va duce la o scufundare semnificativă pe partea plată a piesei. Ultima zonă de solidificare într-o structură cu nervuri de rigidizare este centrul intersecției dintre nervură și flanșa. Cum topitura de material se contractă generează presiuni hidrostatice negative, ducând la colapsul spre interior al suprafeței flanșei. Pentru minimizarea riscului apariției acestor urme se recomandă adăugarea mai multor nervuri subțiri care să echivaleze gradul de ranforsare dat de o nervură mai groasă.

## d) Tensiuni reziduale

Formarea tensiunii reziduale în piesele turnate prin injecție este atribuită de doi factori majori cuplați: răcirea și tensiunile de curgere. Primul și cel mai important factor este tensiunea reziduală care este formată din cauză răcirii bruște a piesei în interiorul cavității matriței. Acest factor dominant este motivul pentru care majoritatea pieselor termoplastice au tensiuni reziduale care sunt de tracțiune în miezul central al piesei și de compresiune la suprafață. Tensiunile reziduale ale pieselor turnate prin injecție sunt, de asemenea, formate de tensiunile de forfecare și de cele normale care există în timpul curgerii topiturii polimerului în interiorul cavității matriței. Aceste tensiuni induse de curgere sunt considerate minimale pe lângă cele care iau naștere în timpul răcirii.

Contractăia și deformarea rezultă din neomogenitățile materialelor și din anizotropia cauzate de umplerea matriței, orientarea moleculară sau a fibrelor, comportamentul de întărire sau de solidificare sau de condițiile de procesare necorespunzătoare.

e) Deformare cauzată de dezechilibrul termic al matriței

În timpul turnării, temperaturile suprafeței peretelui matriței pot varia din cauza poziției termice necorespunzătoare a matriței, cu variații tipice de ordinul a 10°C. În plus, temperaturile de pe suprafața matriței pot varia în funcție de locul în care sunt poziționate liniile de încălzire sau răcire. Cu toate acestea, deseori se neglijează acest efect.

f) Modificarea curburii indusă de anizotropie

La fabricarea structurilor laminate mari și subțiri sau a pieselor compozite armate cu fibre, cu un raport mare dintre lungimea fibrei și grosimea piesei, piesa finală prezintă un coeficient de dilatare termică mai mare în direcția grosimii decât în direcția suprafeței. Dacă piesa este curbată, aceasta va suferi o distorsiune unghiulară.

## 1.3 Policarbonat

### 1.3.1 Noțiuni generale

Policarbonatele sunt cunoscute ca și materiale termoplastice natural transparente, având o structură amorfă, obținută printr-un proces de polimerizare prin condensare prin care trei molecule de oxigen devin legate de un atom de carbon [Fig. 1.3].

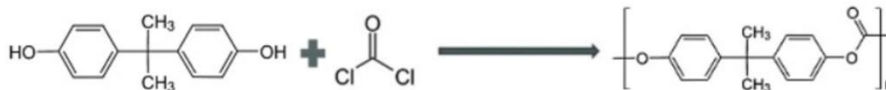


Fig. 1.3. Structura chimică a policarbonatului.

Structura moleculară astfel rezultată a policarbonatului va oferi multe beneficii asupra comportamentului său fizic, precum rigiditate mare, rezistență bună la variații de temperatură sau vâscozitate scăzută în timpul procesării materialului.

Policarbonatul este unul dintre cele mai utilizate termoplastice de către ingineri, mulțumită proprietăților sale cum ar fi: rezistență excelentă la impact [11], stabilitate termică, stabilitate dimensională, greutate redusă, izolare electrică sau culoarea transparentă [12].

Policarbonatul rămâne unul dintre materialele plastice din inginerie cu cea mai rapidă creștere pe măsură ce sunt definite noi aplicații. Bineînțeles, toate acestea nu ar fi fost posibile dacă nu s-ar fi făcut descoperirea policarbonatului pe la sfârșitul anului 1890, atunci când chimistul german Einhorn a

observat formarea unui solid insolubil, infuzibil, în timp ce încerca să pregătească carbonați ciclici prin reacția hidrochinonei cu fosgen. Apoi în 1902, Bischoff și Hedenström au obținut un policarbonat similar reticulat, dar cu o greutate moleculară mult mai mare. A urmat descoperirea lui Dr W.H. Carothers care și-a extins activitatea asupra produsului și în ciuda eforturilor depuse, abia în 1953, laboratoarele Bayer au produs un policarbonat termoplastice liniar cu greutate moleculară mare. În 1957, Bayer și General Electric au anunțat dezvoltarea independentă a policarbonatului.

După ore lungi de studiu și de probe în vara anului 1960 ambele companii au început producția comercială a policarbonatului pentru piese de mici dimensiuni, în prima fază, mai apoi au urmat caroseriile de mașini și alte produse cu volum mai mare.

Policarbonatul și rășina policarbonată sunt folosite în multe produse de larg consum, mai ales pentru a oferi aspectul și senzația sticlei fără fragilitatea și greutatea acesteia.

În funcție de metoda de procesare aleasă și de aplicația acesteia, pe piața actuală policarbonatul este disponibil în diferite clase de rezistență cum ar fi: film, ignifug, armat și rezistent la fisurare. De asemenea, sunt disponibile amestecuri de policarbonat cu acrilonitril butadien stiren (ABS) sau poliesteri. Aceste amestecuri deseori sunt utilizate pe o scară largă în industria automotive.

Prelucrarea mecanică a policarbonatului este considerată relativ simplă și constă, în general, fie din turnare prin injecție, fie din extrudare.

În procesul turnării prin injecție policarbonatul este topit și forțat într-o matrită cu presiune mare pentru a-i da forma dorită. Pentru a obține rezultatele dorite se recomandă uscarea materialului înainte de procesare, adică 2-4 ore la 120°C. Conținutul țintă de umiditate ar trebui să fie de maximum 0,02%. Materialul are o rată de contracție cuprinsă între 0,7-1,0%.

Datorită rezistenței și durabilității sale, policarbonatul are aplicații evidente pentru transmiterea luminii unde riscul de impact este mare. Aditivii sunt utilizați pentru a-i îmbunătăți rezistența la lumina UV, care poate provoca decolorarea materialului, precum mătuirea care apare la farurile autovehiculelor.

În mod similar cu alte materiale din categoria lui, policarbonatul vine și cu o serie de dezavantaje. Printre altele putem aminti rezistența lor scăzută față de chimicale [13], sensibilitatea la zgărieturi - se aplică straturi de protecție pentru îmbunătățirea rezistenței [14], [15] -, dar cu toate aceste minusuri a devenit materialul ideal într-o serie mare de aplicații comerciale și industriale (Fig. 1.4).



Fig. 1.4. Exemple de utilizare ale policarbonatului: (a) Faruri auto, (b) Parbrize de motociclete și (c) Căști de protecție.

Exemple de aplicații ale policarbonatului pot include lentilele de ochelari, faruri de autovehicule, ferestre de securitate, parbrize de motociclete, scuturi folosite de jandarmi sau alte tipuri de produse de protecție [16], [17], carcase pentru electrocasnice, pentru dispozitive electronice și multe altele.

### 1.3.2 Aplicații în industria automotive

Policarbonatul duce industria automotive către noi succese, cel puțin asta arată statisticile actuale.

Nu este o noutate faptul că, consumul de combustibil este legat în proporție de 75% de greutatea vehiculului. Astfel este evident faptul că cei din industria automotive studiază din greu modalitățile prin care își pot îmbunătăți produsele și reducerea greutății acestora. De aceea, din ce în ce mai mulți ingineri și constructori de autovehicule apelează la policarbonat ca alternativă pentru folosirea materialelor de sticlă și de metal.

O mașină modernă obișnuită are aproximativ 20% din piesele sale componente din mase plastice, atât în interior, cât și în exterior, ceea ce din nou arată importanța materialelor plastice pentru vehiculele în zilele noastre.

Putem spune că pe lângă faptul că policarbonatul este mult mai ușor, dar poate fi la fel de puternic, ca unele piese metalice, și prin acest lucru ajută la conducerea autovehiculelor în mai mare siguranță, reducând impactul la coliziuni, acest plastic joacă și un rol de bază în creșterea economiei.

Astfel policarbonatul este poziționat în forță de creștere în industria automotive datorită îmbunătățirilor aduse de către piesele fabricate din materiale plastice pe bază de policarbonat.

În ultimii 30 de ani, utilizarea policarbonatului în aplicațiile automotive a crescut semnificativ și doar industria tablelor extrudate are o rată de consum mai mare. Un vehicul tipic încorporează 10 kilograme de policarbonat în diferite forme.

Datorită tehnologiilor de ultima generație din injecția maselor plastice, calitatea suprafețelor obținute din policarbonat oferă o valoare estetică adăugată produselor finite. Acest aspect a deschis policarbonatelor oportunitatea de a se răspândi și mai mult în industria automotive, într-o varietate mare de produse, dar mai ales în produsele de habitacul. Exemplele includ ceasuri de bord, Head-Up Display-uri, navigații multimedia etc.



Fig. 1.5. Policarbonatul în produsele de habitacul: (a) Head-Up Display și (b) Navigații multimedia.

Policarbonatul, într-un amestec de PC/ABS, oferă avantaje în ceea ce privește stabilitatea dimensională, rezistența la zgârieturi și, în general, estetică. Este ales de asemenea și pentru multe trape și geamuri mici, fiind prezent și în parbrize, ca și material de protecție care să rețină cioburile de sticlă în cazul unui impact.

Piesele exterioare, precum elemente de caroserie, fabricate din aliaje PC/PBT sau din aliaje PC/PET nu numai că au rezistența ridicată la căldură și rezistența ridicată la impact, față de cele ale policarbonatului de bază, dar au și rezistență chimică, rezistență la abraziune și formabilitatea compușilor PBT și PET, deci sunt materiale ideale pentru fabricarea acestor piese exterioare.

Bara de protecție fabricată din PC/PBT poate rezista la impact, la temperaturi scăzute sub  $-30^{\circ}\text{C}$ . Aliajul PC/PBT întărit cu elastomer și aliajul PC/PET sunt mai potrivite pentru fabricarea panourilor de caroserie de automobile, apărătoare laterale de automobile, aripi, tocuri de uși de automobile etc.

Piesele exterioare fabricate prin injecție, din PC/PBT, caracterizate prin rezistență ridicată la căldură, pot fi folosite fără vopsire. Aliajul PC/PET poate fi folosit pentru a face galerii de admisie ale automobilelor și suporturi pentru plăcuțele de înmatriculare.

Aliajul PC/ABS poate fi, de asemenea, utilizat pentru a face piese exterioare ale autovehiculelor, cum ar fi capacele de roți ale automobilelor, carcasele oglinzilor, faruri și stopuri etc. Având o capacitate de formabilitate crescută poate fi prelucrat și pentru piese cu dimensiuni gabaritice mai mari, cum ar fi aripile auto.

Producătorii de top de materiale de tip policarbonat au investit foarte mult în dezvoltarea acestui material. În ultimul deceniu pentru a scoate tot ce este mai bun din policarbonat și pentru a-l putea folosi în cât mai multe componente, sunt folosite acoperiri speciale pentru a obține și o longevitate ridicată la zgârieturi, asociată în mod normal cu sticla.

Este de așteptat ca în viitorul apropiat industria automotive să ajungă la încheierea testărilor ample pentru acest tip de material. Chiar și fără să devină materialul de bază pentru geamurile vehiculelor, perspectivele pentru policarbonat sunt uriașe. Se așteaptă la o creștere a folosirii policarbonatului de până la 5% pe an doar datorită vânzărilor crescute de autovehicule.

Calitățile suprafețelor și proprietățile favorabile de impact însă nu sunt suficiente pentru alegerea unui grad specific de policarbonat ca și material de bază pentru diverse produse din industria automotive. Producătorii de autovehicule solicită o mare varietate de validări experimentale, la care diversele piese sau produse finale trebuie să fie supuse, și bineînțeles trecute cu succes, derivate din experiențe de condus diferite, precum pe porțiuni de drumuri macadam sau peste gropi și calmatoare de viteză – încărcări mecanice (vibrații) – combinate în unele cazuri cu încărcări sau cicluri termice.

Ca și răspuns la cererile foarte mult crescute pentru aplicațiile automotive, policarbonatele sunt adesea ranforsate cu fibre scurte de sticlă, îmbunătățind astfel rezistența, rigiditatea și tenacitatea acestor materiale.

Compozitele termoplastice derivate din policarbonat de bisfenol-A (BPA) sunt utilizate într-o varietate de aplicații care au ca scop valorificarea ductilității inerente, a clarității, a rezistenței termice și chimice, respectiv a stabilității dimensionale a rășinelor de policarbonat. Fibra de sticlă mărunțită este adesea adăugată la formulările de policarbonat, la procentaje cuprinse între 5-50%, pentru a crește rigiditatea și a îmbunătăți anumite proprietăți mecanice.

S-a demonstrat faptul că adăugarea de fibre scurte de sticlă la materialele din policarbonat are ca rezultat o creștere a modulului, o stabilitate dimensională îmbunătățită și o rezistență sporită la ardere. Cu toate acestea, există și câteva dezavantaje atunci când se adaugă fibră de sticlă la materialele din policarbonat, în special pierderea transparenței, scăderea ductilității și tenacității și creșterea vâscozității topiturii. Numeroase studii s-au concentrat pe investigarea efectului învelișurilor din fibre de sticlă, al raportului de aspect al fibrei și al orientării fibrelor asupra proprietăților mecanice ale compozițiilor termoplastice [18], [19].



La fel ca și în cazul materialului de bază, și compozitele obținute prin ranforsarea policarbonatului cu fibre de sticlă vin cu o serie de avantaje și dezavantaje. Acestea privesc procesul de prelucrare al materialului, îmbunătățirea sau scăderea unor proprietăți mecanice, respectiv tipurile de rupere date de orientarea și conținutul fibrelor.

În termeni de proces de prelucrare policarbonatul armat cu fibră de sticlă se dovedește benefic în turnarea pieselor cu pereți subțiri. Carcasele pentru calculatoarele tip notebook, utilajele folosite în producție, componentele camerelor video și alte articole sunt adesea realizate din policarbonate armate cu fibră de sticlă. Materialul combină rigiditatea, cu rezistența la fluaj și rezistența de până la 130°C, împreună cu capacități bune la încărcările de impact și la păstrarea dimensiunilor în urma procesului de injecție, fără o contracție semnificativă. Cu toate acestea, policarbonatul armat a reprezentat multe provocări de procesare în trecut.

Datorită faptului că materialul are o vâscozitate mai mare, care se opune curgerii, a fost dificil să se producă piese complexe, în special cu secțiunile transversale mai subțiri. În aplicații specifice, policarbonatul armat cu sticlă nu a umplut complet matricea de injecție. Pentru mitigarea acestui risc, trebuiau folosite presiuni mai mari de injecție, care însă au condus la alte defecte precum parametri de procesare inacceptabili și finisarea slabă a suprafețelor obținute. Astfel a fost nevoie de regândirea materialului în așa fel încât cele menționate mai sus să nu fie prezente în procesul de producție.

După mai multe cercetări și combinații de materiale răspunsul s-a dovedit a fi un compozit de policarbonat care conține o serie de aditivi mențiți să îmbunătățească curgerea și penetrarea fără a compromite alte proprietăți.

Tot legat de fabricația pieselor prin procesul de injecție a fost observat că policarbonatul tinde să aibă o oarecare contracție pe măsură ce este îndepărtat din matricea. Această contracție poate varia dintr-o varietate largă de motive, oferind variații dimensionale minore. Adăugând cantitatea de 10% de fibră de sticlă, produsul își va păstra mult mai bine dimensiunile atunci când este scos din matricea, reducând astfel semnificativ orice provocare legată de producția în masă.

### 1.3.3 Familia de policarbonat Makrolon

Clasa de materiale considerată în teza de doctorat constă din trei tipuri de materiale termoplastice din familia policarbonatelor cunoscute sub numele de Makrolon. Makrolon oferă o varietate mare de rășini pe bază de policarbonat, răspunzând nevoilor diferitelor industrii, precum cele destinate folosinței generale, industriei alimentare, medicinei sau industriei automotivă.

Policarbonatul Makrolon este cunoscut ca fiind unul foarte robust, ușor, având o transparență similară cu sticla și o rezistență înaltă la impact, chiar și la temperaturi joase. Are, de asemenea, o bună stabilitate dimensională și poate fi

## 34 | Cap. 1 - Materiale polimerice utilizate în industria automotive

---

injectat cu ușurință, în ciuda faptului că are o rezistență excelentă la căldură, cu o temperatură de tranziție sticloasă de 148C°. Fiind mai rezistent și mai ușor ca sticla, policarbonatul Makrolon oferă reduceri de energie și de emisii de CO<sub>2</sub>.

Fiind un termoplastice care se regăsește în aplicații foarte diverse, Makrolon este utilizat în dispozitive medicale, faruri de automobile, echipamente sportive, electronice, ochelari de vedere, lămpi de iluminat și multe alte produse. Portofoliul larg de rășini de policarbonat din familia Makrolon, aparținând companiei Covestro, include clase de scop general, din domeniul iluminării, din domeniul medical și alimentar, clase ignifuge, cu proprietăți modificate la impact, respectiv clase ranforsate cu fibră de sticlă.

Makrolonul ranforsat cu fibră de sticlă se caracterizează prin rigiditate mare și stabilitate dimensională deosebită. Acesta poate fi procesat prin injecție, extrudare sau prin procesul de suflare (blow molding).

### 1.3.3.1 Makrolon 2405

Este un policarbonat de uz general, rezistent la impact și cu o vâscozitate redusă. Acesta prezintă o rezistență crescută la temperatură, tenacitate excepțională, stabilitate dimensională relativ bună, un modul de fluaj (creep modulus) mare și proprietăți bune de izolare electrică. Produsele fabricate din acest material oferă durabilitate, reutilizare eficientă și reduceri de energie, respectiv de emisii de CO<sub>2</sub>. Această clasă de material este disponibil în formă transparentă, translucidă și în culori opace.

Datorită disponibilității în mai multe culori sau forme care să permită trecerea luminii acest material se regăsește într-o varietate de aplicații din mai multe domenii.

### 1.3.3.2 Makrolon 9415

Este o clasă de policarbonat ignifug, cu mare vâscozitate, având un procentaj de ranforsare de 10% cu fibre de sticlă. Acesta, ca și clasa 2405, prezintă o rezistență mare la căldură, tenacitate și stabilitate dimensională bună, modul de fluaj mare și proprietăți excelente de izolare electrică. Acesta se procesează fie prin turnare prin injecție, fie prin extrudare.

Makrolon 9415 se folosește în aplicații electrice și electronice și se poate găsi numai în culori opace.

### 1.3.3.3 Makrolon 8035

Este o clasă de policarbonat cu mare vâscozitate, având un procentaj de ranforsare de 30% cu fibre de sticlă măcinate. În mod asemănător cu clasele 2405 și 9415 și acest material se caracterizează prin rezistență sa la căldură, prin

tenacitate relativ ridicată, sau stabilitate dimensională în urma procesării și capacități de izolare electrică. Acesta se pretează procesării fie prin turnare prin injecție, fie prin extrudare.

Makrolon 8035 se recomandă pentru folosirea în piese de precizie din domeniul aplicațiilor electrice și electronice, fiind disponibil doar în culori opace.

#### 1.4 Concluzii privind stadiul actual al folosirii materialelor polimerice în industria automotive

În industria automotive asimilarea materialelor polimerice a înregistrat un ritm foarte mare. Evoluția folosirii materialelor plastice, în volum, în această industrie a trecut printr-o creștere de la 2%, în anul 1962, la o medie de 50%, în zilele de astăzi. Procentajul materialelor plastice din greutatea medie totală a unui autovehicul ajungând astfel la aproximativ 10-13%, acest procentaj fiind compus atât din piese aparținând produselor de habitacul, cât și din produse de caroserie sau chiar și unele folosite la grupul motor sau la șasiu.

Principalele beneficii aduse de folosirea materialelor plastice în industria automotive includ reducerea greutății unor subansamble, îmbunătățirea condițiilor de siguranță - având ca exemplu anumite bare de protecție făcute din polimeri cu capacitate mare de absorbție a impactelor, sau centurile de siguranță -, reducerea costurilor de fabricație - prin folosirea materialelor injectate în serie, sau prin rezistența acestora la coroziune -, respectiv, ca un alt beneficiu important, îmbunătățirea aspectelor unor piese, care prin metode convenționale de prelucrare și folosind materiale metalice, ar fi fost aproape imposibile de realizat, astfel oferă însă o libertate mai mare creativității inginerilor proiectanți.

Dintre beneficiile menționate cea mai mare pondere o are greutatea redusă a pieselor fabricate din plastic, deoarece constructorii de automobile se confruntă cu legislațiile din ce în ce mai stricte privind problemele de mediu, mai exact reducerea gazelor cu efect de seră, care printre altele, poate fi obținută prin reducerea greutății vehiculelor. Se spune că printr-o reducere de 10% a greutății autovehiculului rezultă o îmbunătățire de 6-8% a consumului de carburant.

Comportamentul mecanic al materialului este însă influențat și de procesul de fabricație al piesei finale, pe lângă tipul sau combinația de materiale selectate.

Cea mai comună metodă de fabricație în cazul materialelor plastice este turnarea prin injecție, care poate să pară simplă la prima vedere, însă vine cu o serie de parametri care trebuie cunoscuți și controlați pentru a asigura calitatea dorită a pieselor produse. Modul de curgere al topiturii sau efectele transferului de căldură, pot avea o influență majoră asupra omogenității materialului sau asupra orientării fibrelor, dacă procesul nu este controlat într-un mod corespunzător.

Parametri optimi de injecție pot fi determinați prin analize numerice specifice de curgere al materialului topit în interiorul matriței, însă mitigarea riscurilor în cazul unor piese injectate poate fi atinsă și prin urmărirea unor reguli de proiectare, specifice materialelor și formelor geometrice necesare. Toate aceste acțiuni la comun pot minimiza apariția unor defecte, care la rândul lor pot fi doar vizuale sau de aspect – de exemplu urmele de surpare -, dar la fel de bine pot fi și defecte care vor influența rezistența materialului – precum liniile de sudură sau tensiunile reziduale.

În cazul în care condițiile de proiectare și cele de fabricație sunt satisfăcute, piesele fabricate din materiale compozite vor excela prin rezistență specifică și prin modulul specific ridicat, prin greutatea specifică scăzută și prin rezistență foarte bună la coroziune.

Policarbonatele sunt materiale termoplastice natural transparente, fiind caracterizate printr-o rigiditate mare, rezistență relativ bună la variații de temperatură sau vâscozitate scăzută în timpul procesării materialului.

Acesta reprezintă unul dintre cele mai folosite materiale termoplastice din domeniile ingineriei, datorită avantajelor pe care le oferă cum ar fi: rezistența excelentă la impact, stabilitatea dimensională, stabilitatea termică, greutatea redusă, izolarea electrică etc.

Policarbonatul este folosit într-o varietate de produse de larg consum, mai ales datorită faptului că oferă aspectul și senzația sticlei, dar fără fragilitatea și greutatea mai mare a acesteia, fiind astfel soluția ideală în aplicațiile proiectate pentru transmiterea luminii, acolo unde riscul unui impact este mare.

Precum alte termoplastice din categoria lui, policarbonatul vine și cu o serie de dezavantaje. Cele mai importante minusuri ale materialului ar fi: rezistența scăzută față de chimicale, sensibilitatea la zgărieturi sau la lumina UV. Pentru diminuarea efectelor negative ale acestor dezavantaje, deseori se folosesc diferite amestecuri de policarbonat cu diverși aditivi.

În ciuda dezavantajelor policarbonatul a devenit materialul perfect într-o serie mare de aplicații din diferite industrii, pentru produse de securitate și de protecție, precum scuturi, parbrize sau carcase pentru produse electronice și electrocasnice etc.

Tehnologiile de ultima generație din injecția maselor plastice au condus la calități superioare ale suprafețelor obținute din policarbonat, oferind astfel valori estetice adăugate produselor fabricate. Această calitate a permis policarbonatelor răspândirea la scară largă în industria automotive, într-o varietate mare de produse, cu accent pe produsele de habitacul, precum ceasuri de bord, Head-Up Display-uri, navigații multimedia etc.

Clasele de material considerate în teza de doctorat sunt trei tipuri de policarbonat din familia produselor Makrolon, aparținând Covestro AG. Makrolon oferă o mare varietate de rășini de policarbonat, răspunzând la nevoile diferitelor industrii, prin clase de materiale generale, clase conforme cu industria alimentară, de tip medical, respectiv clase pentru automotive. Clasele de Makrolon obținute prin

#### **1.4 – Concluzii privind stadiul actual al folosirii materialelor polimerice | 37**

---

ranforsări cu fibre de sticlă posedă caracteristici speciale cum ar fi rezistență la flacără, rezistență ridicată la impact, rigiditate mare sau stabilitate dimensională.

Materialele pentru investigații au fost selectate în funcție de utilizarea lor în diferite aplicații de habitacul, și sunt următoarele: Makrolon 2405 – PC neranforsat, Makrolon 9415 – PC armat cu 10% fibră de sticlă, respectiv Makrolon 8035 – PC ranforsat cu 30% fibră de sticlă.

## Capitolul 2 - Stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate

### 2.1 Introducere

Odată cu dezvoltarea tehnologică prezentă, industria caută materiale cu greutate mai ușoară, cu rezistență mai mare, mai sigure și care să permită o productivitate mai rapidă, pentru a satisface cerințele de proiectare structurală și beneficiile economice. Cu toate acestea, din cauza rezistenței și rigidității lor mai scăzute, materialele plastice pot să nu fie potrivite pentru piesele structurale. Pentru a extinde domeniul de aplicare al materialelor plastice, compozitele plastice sunt dezvoltate prin adăugarea de materiale de armare la matricea plastică. Acest aspect presupune însă înțelegerea comportamentului mecanic al materialului compozit, lucru esențial în proiectarea pieselor mecanice care se doresc a fi rezistente la diferite tipuri de încărcări.

Armătura folosită cel mai des este fibra de sticlă. Datorită rezistenței fibrelor, rezistența scăzută a plasticului de bază este compensată. Compozitele polimerice excelează prin faptul că au o rezistență specifică ridicată, un modul specific ridicat, o greutate specifică scăzută și o rezistență bună la coroziune. Prin urmare, materialul compozit pe bază de plastice a devenit unul dintre noile materiale competitive în inginerie [20], [21], [22].

Materialele termoplastice compozite sunt compuse dintr-o masă de polimer și armătura înglobată în ea, astfel ele sunt materiale bifazice. Acesta conferă materialului o rezistență la compresiune, în timp ce armătura ajută la îmbunătățirea rezistenței la tracțiune [23], [24]. Acest lucru permite ca designul componentelor dintr-un autovehicul să fie din ce în ce mai diferit, rezistent și estetic mai plăcut.

Pentru obținerea unor bune caracteristici mecanice, este nevoie de o omogenitate a materialului și a coeziunii sale. Astfel dispoziția armăturii influențează semnificativ caracteristica de rezistență la tracțiune [9], [2], [5]. Totodată, elasticitatea polimerului poate ameliora rezistența la compresiune sau la încovoiere a materialului cu care se armează polimerul.

Funcția de bază a polimerului este înainte de toate una mecanică și constă în asigurarea legăturii cu fibrele de armătură. Acesta este cel care transmite eforturile între fibrele de sticlă, care sunt armătura polimerului. Este esențială asigurarea unui minim de aderență între aceste două faze. Aderența nu poate fi realizată prin mijloace mecanice, fiind necesară și realizarea unei legături chimice pentru învelirea armăturii cu polimerul de bază. Acestea sunt proprii fiecărui material termoplastic datorită particularităților fiecărui material. Polimerul de bază joacă rolul de liant între fibrele de sticlă ale armăturii. Dacă liantul este ușor deformabil, fibrele armăturii se mai pot deplasa, astfel încât doar un număr redus dintre acestea suportă încărcarea. Polimerul trebuie să permită o repartiție

echilibrată a eforturilor între fibrele de armare, dar în același timp trebuie să limiteze deplasarea acestora pentru a preveni o deformare exagerată a produsului. De asemenea, polimerul de bază asigură etanșeitatea față de umezeală, deoarece cele mai multe fibre de armare au o mare afinitate pentru apă, astfel duc spre pierderea unora din proprietăți [23].

Natura sticlei are o importanță mare asupra constanței în timp asupra proprietăților acesteia mecanice, electrice și chimice ale materialului termoplastic armat. Pentru a obține produse stabile se utilizează sticla fără alcali, asta deoarece toate fibrele cu conținut ridicat de Na sau K au caracteristici care, din păcate, scad rapid în timp, urmare a hidrolizei lor superficiale sub acțiunea gradului de umiditate. Ca scop pentru a îmbunătăți caracteristicile mecanice, în particular a modulului de elasticitate, se utilizează sticle conținând și oxizi metalici, în anumite proporții.

În industriile actuale cel mai des utilizat tip de fibră de sticlă este cel din sticla E care este compusă din aluminiu și borosilicate de calciu. Acest tip de sticlă are proprietăți chimice, mecanice și electrice foarte bune și are și prețul foarte convenabil, chiar considerat destul de scăzut [25], [26].

Fibrele de sticlă utilizate la armarea materialelor termoplastice, când acestea sunt fără defecte, au rezistența la tracțiune între 25 - 78 [MPa]. Modulul de elasticitate poate atinge 72 - 84,7 [GPa]. Fibrele au alungiri de aproximativ 2 - 3%, alungire totală elastică. Dar nu apar deformații permanente înainte de rupere și nici histerezis la temperatura normală. De asemenea, prezența fibrelor de sticlă conduce la reducerea factorului timp în procesul de fluaj.

Modificările dimensionale datorită absorbției de apă rămân însă o problemă existentă de higroscopie, inerentă a polimerilor. Prin încorporarea fibrelor de sticlă în materialele termoplastice sunt conservate proprietățile mecanice ale acestora, într-un domeniu larg de temperaturi. Materialele termoplastice cu fibre de sticlă prezintă structural o asociație mecanică de fibre de sticlă și polimer. Compușii termoplastici sunt caracterizați prin plasticitate mare în anumite condiții de temperatură și prin revenirea lor la stadiul inițial prin răcire. În stadiul plastic ei pot fi prelucrați în produse finite.

Policarbonatul ranforsat cu fibră de sticlă se regăsește într-o multitudine de industrii de pe piață, unde, de regulă, se folosesc materiale metalice, mai ales aluminiu turnat sub presiune sau zincul.

Adăugarea de fibre de sticlă la policarbonat în diferite cantități (10%, 20%, 30% și 40%) crește rezistența la tracțiune, rigiditatea, rezistența la compresiune și scade coeficientul de dilatare termică. Cu cât este mai mare cantitatea de fibră de sticlă adăugată la policarbonat, cu atât va fi mai mare efectul asupra fiecăreia dintre proprietăți.

Tabelul 1 sintetizează variația densității și a unor proprietăți mecanice de bază în funcție de conținutul, în procente, de fibre de sticlă din materialul compozit.

## 40 | Cap. 2 – Stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate

Tabel 1. Variația densității și a unor proprietăți mecanice de bază în funcție de procentajul fibrelor de sticlă.

Proprietăți	Unitate de măsură	Metodă de testare	PC-GF10	PC-GF20	PC-GF30	PC+GF40-FR(40)
Densitate	g/cm <sup>3</sup>	ISO1183(JISK7112)	1,27	1,33	1,42	1,52
Limita de curgere	MPa	ISO 527-1,2 (JISK7161,7162)	80	110	130	136
Deformația specifică la rupere	%		5	4	4	1,4
Rezistența încovoiere	la MPa	ISO 178 (JIS K7171)	120	160	180	200
Modulul elasticitate încovoiere	de la GPa		3,5	5,9	7,9	12,4

În ceea ce privește comportamentul mecanic al materialului armat, mai exact variația unor proprietăți precum rezistența la rupere sau rezistența la impact, se pot diferenția anumite relații și proporționalități între conținutul de fibră și comportamentul aferent al materialului la diverse tipuri de încărcări.

Rezistența admisibilă și modulul de elasticitate al materialului cresc cu creșterea cantității fibrelor, dar fără să impactiveze semnificativ greutatea produselor finite (creștere ușoară a densității).

Fibra de sticlă este mai puternică decât policarbonatul dar din natura fibrelor de sticlă aceasta se sparge la impact. Pe de altă parte policarbonatul este mult mai rezistent la impact. Adăugând un procentaj relativ mic de doar 10% de fibră de sticlă, materialul capătă o rezistență semnificativă, rămânând totuși mai rezistent la rupere și la impact decât majoritatea celorlalte materiale plastice sau aluminiul turnat sub presiune.

### 2.2 Metode experimentale de analiză a policarbonatului și a compozitelor derivate

Diferitele aplicații utilizează policarbonatul, sau compozite de policarbonat, ca și material de bază, în funcție de avantajele oferite de acestea. Prin urmare, multe aplicații se concentrează asupra materialului neranforsat, și mai ales asupra transparenței acestuia, având în vedere capacitățile excelente de transmitere a luminii și a rezistenței policarbonatului față de numeroși factori externi, cum ar fi variațiile de temperatură, contacte cu substanțe chimice sau rezistență mare la impact. Știind însă și dezavantajele materialului necesitatea unor studii amănunțite devine justificată.



Autori precum De Brouwer et al. [27] au studiat stabilitatea culorii policarbonatului, în contextul în care aplicațiile optice, precum farurile autovehiculelor, trec printr-o serie de inovații tehnologice care necesită o durată de viață mai lungă a tuturor pieselor componente, astfel și a carcasei lămpii, care pe lângă rolul de protecție are și o importanță deosebită în transmiterea controlată a razelor de lumină dinspre sursa acestora.

O altă arie de cercetare, pentru care s-au realizat numeroase investigații și s-au adus multiple soluții de îmbunătățire, privește micșorarea efectelor negative rezultate din neajunsurile policarbonatului, și anume ale faptului că acesta prezintă o rezistență scăzută la zgârieturi, respectiv efectele îndelungate ale razelor ultraviolete și ale condițiilor meteo asupra materialului.

De Vietro et al., respectiv Schmauder et al. [28], [29] au investigat un tratament cu plasmă de presiune scăzută, aplicată în doi pași, cu scopul îmbunătățirii proprietăților de antirefecție ale policarbonatului dar, în același timp, și pentru a mări rezistența suprafețelor împotriva zgârierurilor, printr-un proces denumit *plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD)*.

Katsamberis et al. [30] au mers mai departe cu tratamentul de plasmă, și au propus un alt proces, având denumirea de *hollow-cathode activated deposition (HAD)*, care promite performanțe similare la o rată mult mai mare de depozitare.

Cele mai importante studii însă, realizate în strânsă legătură cu tema tezei de doctorat, privesc comportamentul static, comportamentul dinamic și mecanismele de rupere ale policarbonatului de bază sau ale claselor ranforsate de policarbonat.

Efectele vitezei de încărcare și ale temperaturii asupra răspunsului tensiune – deformație specifică al policarbonatului nearmat au fost investigate experimental peste o plajă mare de viteze de încărcare și temperaturi, de mai mulți autori [31], [32], [33], [34].

Cao et al. și Fu et al. [35], [36] au propus folosirea unei bare de tracțiune de tip split Hopkinson pentru efectuarea testelor de tracțiune la viteze mari de încărcare (de ordinul  $1000 - 1700 \text{ s}^{-1}$ ). Necesitatea unor astfel de încercări este justificată prin încărcările de impact la care produsele fabricate din policarbonat pot fi expuse de-a lungul duratei lor de viață. Această necesitate este subliniată și de contribuțiile unor numeroși autori din domeniu care au studiat în detaliu comportamentul la impact al policarbonatului și al compozitelor de policarbonat [37], [16], [38], [39], [40], [41], [17].

Încărcările de impact de multe ori sunt însă însoțite și de încărcări termice, fapt care dovedește necesitatea cunoașterii comportamentului materialului în mai multe ipostaze posibile.

Alte studii s-au concentrat asupra răspunsului elasto-plastic al materialului în cadrul încercărilor la compresiune [42] sau în cadrul unor încercări de tip analiză mecanică dinamică (DMA) [43].

## **42 | Cap. 2 – Stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate**

Din rezultatele experimentale ale tuturor autorilor care au studiat comportamentul acestui material, se observă că răspunsurile tensiune – deformație specifică ale policarbonatului la viteze mari încă arată caracteristici neliniare, incluzând curgerea materialului și fenomenul de înmuiere (strain softening). Comportamentul la tracțiune este strâns legat de viteza de încărcare și de temperatură. Valorile limitei de curgere și a deformației specifice de curgere prezintă o creștere semnificativă la viteze mari de încărcare și o scădere cu creșterea temperaturii.

Din punct de vedere al claselor ranforsate, pe lângă procentajul de fibră din volumul de material, a fost dovedit că clasamentul rezistenței finale este în strânsă legătură și cu grosimea stratului în care fibrele de sticlă se aliniază cu direcția de tracțiune. Cu cât conținutul de fibre este mai mare, cu atât rezistența la tracțiune o să fie și ea mai mare.

Droz dov et al. [44] a studiat comportamentul policarbonatului ranforsat cu cantități variate de fibră de sticlă la încercări de tracțiune cu o viteză de încărcare constantă, respectiv la încercări oscilatorii de torsiune, ambele la temperatura camerei.

Ecuatii constitutive au fost derivate pentru răspunsul vâscoelastic și vâscoplastic al compozitelor polimerice. Microstructura complicată a unui compozit este tratată ca o rețea echivalentă eterogenă de lanțuri legate între ele prin joncțiuni. Rețeaua este considerată ca un ansamblu de mezoregiuni cu forme și dimensiuni arbitrare. Făcând referire la teoria relaxării cooperative, răspunsul vâscoelastic este atribuit la rearanjarea mezodomeniilor care au loc la timpi arbitrari, atunci când regiunile sunt activate termic. Comportamentul vâscoplastic este asociat cu deplasările mezoregiunilor unul față de celălalt și cu ruperile acestora, rata alunecării mezodomeniilor fiind proporțională cu rata deformațiilor macro.

Ecuatii constitutive pentru deformațiile izoterme ale unui compozit polimeric au fost derivate utilizând legile termodinamice.

În ceea ce privește comportamentul materialului la rupere, prin investigațiile efectuate s-a determinat ca mecanismele de striație, clivaj și rupere domină în policarbonatul nearmat atunci când forța de tracțiune este paralelă cu direcția de curgere, în timp ce despicături și fisuri secundare sunt specifice atunci când direcția de tracțiune este perpendiculară cu direcția de curgere. Pe de altă parte, extragerea fibrei, ruperea fibrei și striațiile sunt mecanismele majore de rupere în policarbonatele armate cu fibră de sticlă scurtă [45].

### 2.3 Metode numerice de analiză a policarbonatului și a compozitelor derivate

Cele mai comune modele numerice bazate pe investigațiile experimentale uniaxiale sunt modelele elastoplastice constitutive și tridimensionale pentru deformațiile finite ale polimerilor amorfii, propuse de mai mulți autori, precum de Cao et al. [35], Mulliken et al. [43], Richeton et al. [46] sau Yu et al. [47], pentru a replica comportamentul materialului dinainte și după curgere în funcție de viteza de încărcare și de temperatură când acesta se supune încărcării de tracțiune.

Într-o descriere reologică modelul constitutiv conține un arc liniar elastic și un amortizor vâscoplastic în serie, legate în paralel de un arc neliniar de tip Langevin pentru a reprezenta rezistența intermoleculară la rotațiile segmentelor de lanț, respectiv rezistența entropică la alinierea lanțului.

Rezultatele obținute de toți autorii sunt apropiate de datele experimentale în intervalul studiat al vitezelor de încărcare și al temperaturilor.

Pe de altă parte, pentru studiul numeric al încărcărilor dinamice de impact, numeroase lucrări științifice abordează modele materiale, cum ar fi modelul MAT\_024 sau MAT\_081, modele de plasticitate, din programul de analize cu elemente finite ANSYS LS-DYNA, însoțite de diferiți parametri de cedare, cum ar fi deformația specifică admisibilă sau parametri rezultați din curbe de triaxialitate.

Exemple de lucrări includ cercăturile lui Mullaoglu et al. [40] sau studiile realizate de Yau et al. [39].

### 2.4 Concluzii privind stadiul actual al cercetării policarbonatelor și a compozitelor derivate

Cu scopul extinderii domeniului de aplicare al materialelor plastice, compozitele polimerice au fost dezvoltate, adăugând fibre de armare la matricea plastică.

Înțelegerea comportamentului mecanic al materialului compozit este însă esențială pentru selecția materialului potrivit pieselor mecanice, care trebuie să fie rezistente la multiple încărcări mecanice și termice.

Policarbonatul ranforsat cu fibră de sticlă și-a găsit aplicabilitatea într-o mare varietate de industrii, cu prilejul înlocuirii materialelor metalice din diverse considerente.

Mulți autori au studiat comportamentul policarbonatului, în contextul mai multor domenii de utilizare, precum aplicații mecanice (ex. carcase pentru diferite produse), aplicații optice (ex. faruri ale autovehiculelor), aplicații care necesită o rezistență și o durabilitate crescută a policarbonatului ales ca material de bază.

#### **44 | Cap. 2 – Stadiul actual al cercetării privind polycarbonatul și compozitele derivate**

Stabilitatea culorii, rezistență scăzută la zgârieturi, respectiv efectele negative îndelungate ale razelor ultraviolete și cele ale condițiilor meteo asupra polycarbonatului au reprezentat subiectul pentru mulți cercetători.

În ceea ce privește tema tezei de doctorat, cele mai importante studii care s-au făcut și care au reprezentat punctul de plecare al investigațiilor experimentale și numerice sunt legate de comportamentul static, de comportamentul dinamic și de mecanismele de rupere ale polycarbonatului sau ale derivatelor ranforsate.

Toate cercetările efectuate au demonstrat că rezistența admisibilă și modulul de elasticitate al materialului cresc odată cu creșterea cantității fibrelor, fără să impactiveze însă greutatea produselor finite. Efectul vitezelor de încărcare și al temperaturii au fost, de asemenea, subliniate de numeroși autori.

Puține studii s-au concentrat însă asupra unor comparații de-o mai mare anvergură între comportamentul static și dinamic al materialului nearmat față de una sau mai multe clase armate ale acestuia, cu diferite procentaje de fibră de sticlă. Mai puține studii și-au propus investigația la încărcarea de impact a unor probe crestate din gama polycarbonatelor armate și nearmate cu fibră de sticlă. La fel se poate spune și despre oboseala polycarbonatelor, despre care puține informații sunt disponibile în literatura de specialitate.

Cercetările propuse în cadrul tezei de doctorat și-au propus completările investigațiilor deja existente, dar restrânse, respectiv punerea unor baze pentru ariile legate de mecanica și rezistența materialelor unde datele disponibile erau foarte limitate.

## **Capitolul 3 - Caracterizarea mecanică prin încercări statice a materialelor pe bază de policarbonat**

### **3.1 Introducere**

Studiile prezentate în acest capitol propun caracterizarea mecanică a două grade diferite de policarbonat ranforsat, în comparație cu comportamentul materialului de bază. Caracterizarea se realizează prin încercarea la tracțiune a materialelor selectate la viteze de încărcare și condiții termice diferite, în mod similar cu studiile conduse de K. Cao și alții [31] și W. Zhang și alții [34], având ca obiectiv alcătuirea unei baze de date menite să ofere o imagine de ansamblu asupra comportamentelor mecanice ale celor mai frecvent folosite materiale termoplastice.

Așa cum a fost menționat în primele capitolele 1 și 2 ale tezei, produsele din industria automotive trebuie să reziste la diferite tipuri de încărcări mecanice și termice de-a lungul duratei lor de viață.

Încărcările mecanice, în general, se referă la forțe dinamice și multiaxiale, conducând la stări de tensiuni dinamice în materialul pieselor care constituie produsul finit.

Pentru a pregăti un produs specific la utilizarea sa finală, diferite scenarii de validări au fost stabilite din situațiile de zi cu zi, menite să recreeze sau să simuleze încărcările la care produsele finale vor fi supuse.

Aceste condiții de validare sunt rezumate în forma unor specificații de teste, incluzând solicitări mecanice precum: vibrații armonice și aleatoare, șocuri mecanice (jumătate de sinus) – încărcări având amplitudini joase sau înalte care implică viteze reduse (regimuri quasistatice) și ridicate (regimuri dinamice). Prin urmare, pentru caracterizarea materialelor atât viteze mici de încărcări, cât și viteze mari, trebuie să fie luate în calcul, în vederea determinării comportamentelor quasistatice și dinamice ale materialelor testate.

### **3.2 Încercări la tracțiune**

Pentru testele de tracțiune au fost folosite epruvete realizate, în conformitate cu standardul de testare la tracțiune ISO 527-1 [48], având o lungime totală de 150 [mm], o lungime în porțiunea calibrată de 60 [mm], o lățime de 10 [mm] și o grosime de 4 [mm]. Epruvetele au fost fabricate prin injecție, în așa fel încât forma epruvetei a fost direct obținută, fără a mai fi necesară vreo prelucrare

mecanică prin aşchiere ulterioară. Materialul a fost injectat folosind un singur punct de injecție, plasat într-un capăt al matriței, exclusând astfel formarea unor defecte precum linia de sudură în porțiunea calibrată a epruvetei.

### 3.2.1 Evaluarea influenței vitezei de încărcare

Pentru caracterizarea claselor de policarbonat selectate, încercări quasistatice la tracțiune au fost realizate, cu scopul evaluării comportamentului la tracțiune a acestor materiale la viteze diferite de încărcare.

Vitezele de încărcare au fost alese urmând recomandările date de ISO 527-1: 2 mm/min, 20 mm/min, 40 mm/min, 200 mm/min și 400 mm/min (corespunzând cu 0,00028 s<sup>-1</sup>, 0,0028 s<sup>-1</sup>, 0,0056 s<sup>-1</sup>, 0,028 s<sup>-1</sup> și 0,056 s<sup>-1</sup>), Fig. 3.1.a.

Viteza de încărcare <i>v</i> mm/min	Toleranță %
0.125	±20
0.25	
0.5	
1	
2	
5	
10	±10
20	
50	
100	
200	
300	
500	




Fig. 3.1. (a) ISO 527-1 – Viteze de încărcare recomandate; (b) Schema de testare cu extensometrul atașat de epruvetă.

Testele de tracțiune au fost executate pe o mașină electromecanică de tip Zwick-Roell Z005, echipată cu o celulă de forță de 5 kN, în combinație cu un extensometru de tip clip-on pentru înregistrarea deformațiilor specifice (Fig. 3.1.b). Modulul de elasticitate a fost calculat pe baza metodei secantei din ISO 527-1. Rezistența la rupere a fost direct obținută din curbele forță – deplasare înregistrate de mașină.

Figurile 3.2, 3.3 și 3.4 prezintă curbe specifice ingineresti tensiune - deformație specifică, obținute la încercările de tracțiune efectuate pentru cele trei tipuri de materiale investigate.

Valorile medii ale modulului de elasticitate și ale rezistențelor la rupere, împreună cu deviațiile standard sunt sintetizate pentru fiecare material în parte în tabelele 3.1, 3.2 și 3.3.

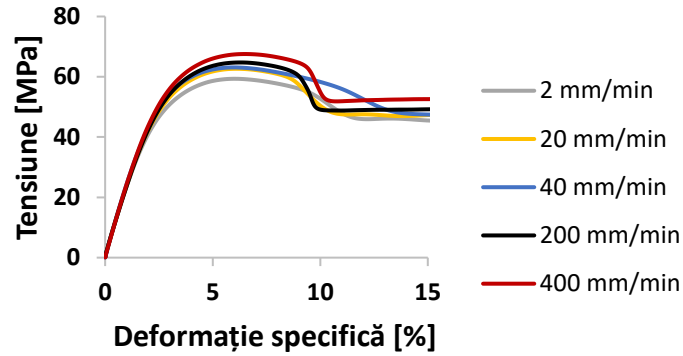


Fig. 3.2. Curbe caracterice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 2405.

Tabel 3.1. Variația modului de elasticitate și a rezistenței la rupere în funcție de regimul de încărcare pentru MK2405.

Makrolon 2405	2 mm/min		20 mm/min		40 mm/min		200 mm/min		400 mm/min	
	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]
Modul de elasticitate [MPa]	2457.84	1.16	2477.04	0.38	2547.83	3.54	2463.5	1.9	2551.33	0.6
Rezistența la rupere [MPa]	59.33	0.23	62.18	0.66	60.37	1.34	64.74	0.15	67.44	0.26

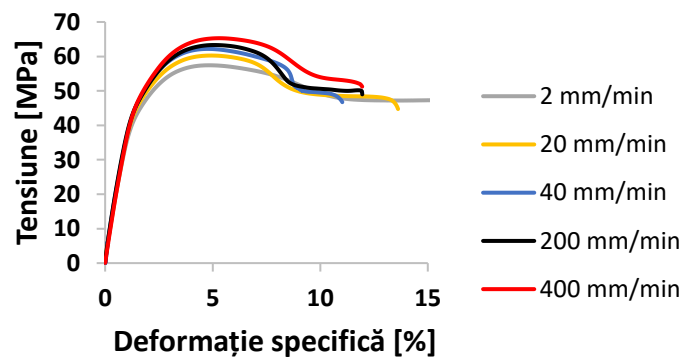


Fig. 3.3. Curbe caracterice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 9415.

**48 | Cap. 3 – Caract. mecanică prin încercări statice a mat. pe bază de policarbonat**

Tabel 3.2. Variația modului de elasticitate și a rezistenței la rupere în funcție de regimul de încărcare pentru MK9415.

Makrolon 9415	2 mm/min		20 mm/min		40 mm/min		200 mm/min		400 mm/min	
	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]
Modul de elasticitate [MPa]	4042.02	0.89	4015.18	1.8	4443.5	4.81	4152.32	3.37	4053.17	1.39
Rezistența la rupere [MPa]	57.35	0.28	60.42	0.27	63.24	0.66	63.16	0.77	64.24	2.54

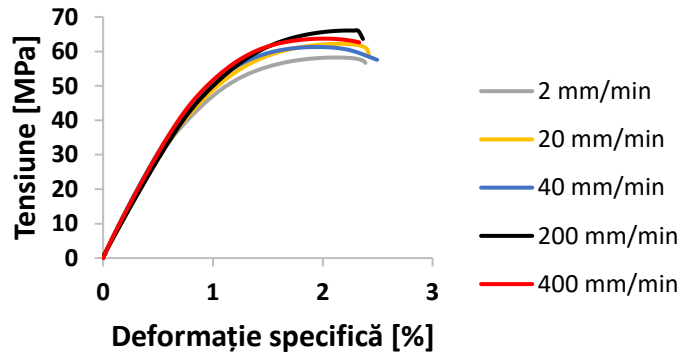


Fig. 3.4. Curbe caracteristice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 8035.

Tabel 3.3. Variația modului de elasticitate și a rezistenței la rupere în funcție de regimul de încărcare pentru MK8035.

Makrolon 8035	2 mm/min		20 mm/min		40 mm/min		200 mm/min		400 mm/min	
	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]	Medie	Dev. stand. [%]
Modul de elasticitate [MPa]	5960.54	0.71	5994.52	2.35	6324.67	1.4	6029.38	6.93	6172.5	3.36
Rezistența la rupere [MPa]	58.83	0.93	62.46	0.39	62.35	0.94	66.35	0.58	63.46	0.55

Se poate identifica un comportament elasto-plastic al materialelor Makrolon 2405 și Makrolon 9415, constând dintr-o porțiune liniar elastică, o regiune de curgere culminând cu forța maximă, urmate de o regiune cu tensiune descrescătoare și de un palier. Regiunea de palier ajunge până la 15% deformație specifică pentru Makrolon 2405 (Fig. 3.2), și se situează între 10 și 13,5% pentru Makrolon 9415, pentru viteze de încărcare mai mari decât 20 mm/min (Fig. 3.3).



Crescând conținutul de fibră pentru Makrolon 8035, comportamentul devine mai fragil, ruperea apărând exact după atingerea valorii maxime a forței aplicate, Fig. 3.4.

Din figurile 3.2 – 3.4 se poate observa că viteza de încărcare are o influență scăzută asupra modului de elasticitate, porțiunea liniară a curbelor caracteristice fiind aproape identică pentru toate vitezele de încărcare. Trebuie menționată însă o rezistență la rupere crescută a tuturor materialelor cu creșterea vitezei de încărcare.

Analizând deviațiile standard maxime ale modulelor de elasticitate obținute la diferite viteze de încărcare, la temperatura ambiantă, următoarele concluzii pot fi trase: cu creșterea raportului de fibră de sticlă, valoarea deviației standard devine și ea mai mare. Deviația standard maximă calculată pentru materialul de bază (Makrolon 2405) este doar de 3,54%, pentru Makrolon 9415 (polycarbonat cu 10% fibră de sticlă) valoarea deviației standard urcă până la 4,81%, iar pentru Makrolon 8035, având un raport al fibrei de sticlă de 30% față de rășina de bază, deviația standard atinge maximul de 6,93%. Acest comportament al deviației standard în funcție de procentajul fibrei de sticlă poate fi considerat ca o consecință a anizotropiei induse de creșterea cantității de fibre.

### 3.2.2 Evaluarea influenței temperaturii

Deoarece autovehiculele pot fi deseori expuse unor condiții extreme de mediu (temperatură, umiditate) toate piesele care intră în componența acestora trebuie să fie proiectate și fabricate în așa fel încât să reziste și acestor condiții neprielnice. Pentru obținerea unei calități care să garanteze funcționalitatea acestora în condițiile menționate, comportamentul materialelor selectate pentru diferitele piese componente trebuie să fie atent analizat la diferite regimuri de încărcare și la diferite temperaturi.

Obiectivul studiului constă în investigarea variației proprietăților mecanice ale celor trei tipuri de Makrolon, în termeni de modul de elasticitate, rezistența la rupere, respectiv coeficientul de contracție transversală (coeficientul lui Poisson), supunând epruvete solicitate la tracțiune combinate cu diferite temperaturi. În plus, efectul de lungă durată al ciclurilor termice a fost de asemenea analizat, efectuând un test de îmbătrânire al materialelor selectate.

Încercările au fost făcute folosind două sisteme. Cele analizând influența directă a temperaturii asupra comportamentului materialelor la tracțiune au fost efectuate pe un sistem multiaxial de tip Instron 8874, echipat cu o incintă termică și cu un video extensometru pentru capturarea deformațiilor specifice longitudinale și ale celor transversale. Testele s-au efectuat cu o viteză constantă de 50 mm/min, iar temperatura probelor în interiorul incintei a fost monitorizată cu o termocuplă pentru a asigura distribuția uniformă a temperaturii înaintea încercărilor la tracțiune. Pe de altă parte, pentru determinarea influenței îmbătrânirii materialelor asupra proprietăților elastice s-a folosit o mașină de încercat la tracțiune universală de tip

Zwick-Roell Z005, în combinație cu un clip-on extensometru, respectiv cu un sistem de corelare digitală de tip Dantec Dynamics.

Probele folosite pentru a doua investigație au fost îmbătrânite într-un sistem de testare la șoc termic de tip Vötsch VT<sup>3</sup> 7030 S2. Acest sistem este o cameră climatică specială folosită în domeniul ingineriei pentru a testa rezistența echipamentelor sau a produselor electronice la schimbările rapide ale temperaturii ambientale. Acesta este alcătuit din două încălzi: o încălzi de temperatură joasă, respectiv una de temperatură înaltă, permițând astfel schimbări foarte rapide de temperatură în intervalul -80°C și +220°C.

Componentele testate se așează pe rafturile unui subsistem care efectuează o mișcare translatorie verticală între cele două încălzi termice în timpul aplicării ciclurilor termice.

Timpii de expunere se aleg în funcție de natura probei. Probele testate trebuie întâi expuse la temperatura rece ( $T_A$ ), la care se mențin pentru perioada specificată  $t_1$ . Acest timp include și un timp inițial, mai mic sau egal cu  $0,1 \times t_1$ , necesar pentru stabilizarea temperaturii aerului din cameră, care se măsoară din momentul introducerii probei în cameră. În a doua fază, probele se expun la temperatura caldă ( $T_B$ ), într-un interval  $t_2$ , care nu trebuie să depășească 3 min. La rândul lui  $t_2$  trebuie să includă timpul necesar pentru scoaterea dintr-o cameră și transferul în a doua cameră, precum și orice timp necesar de păstrare la temperatura ambiantă a laboratorului.

Analog cu temperatura joasă, la temperatura  $T_B$  probele se mențin tot pentru perioada specificată ( $t_1$ ), incluzând timpul inițial pentru stabilizarea temperaturii aerului din cameră.

După menținerea la temperatura  $T_B$  probele se expun din nou la temperatura rece ( $T_A$ ) într-un timp de transfer  $t_2$  - nedepășind 3 minute -, pentru următorul ciclu al procesului.

În acest fel, un ciclu complet cuprinde cei doi timpi de expunere,  $t_1$ , și cei doi timpi de transfer,  $t_2$ , conform figurii 3.5.

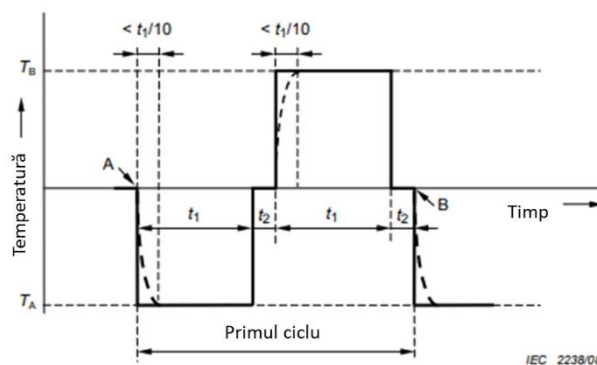


Fig. 3.5. Profilul termic standardizat utilizat pentru îmbătrânirea probelor.

Tipul și numărul ciclurilor au fost selectate în conformitate cu standardul internațional IEC 60068-2-14 [49], aplicabil testărilor de mediu (environmental testing). Profilul complet selectat este prezentat în Fig. 3.6.

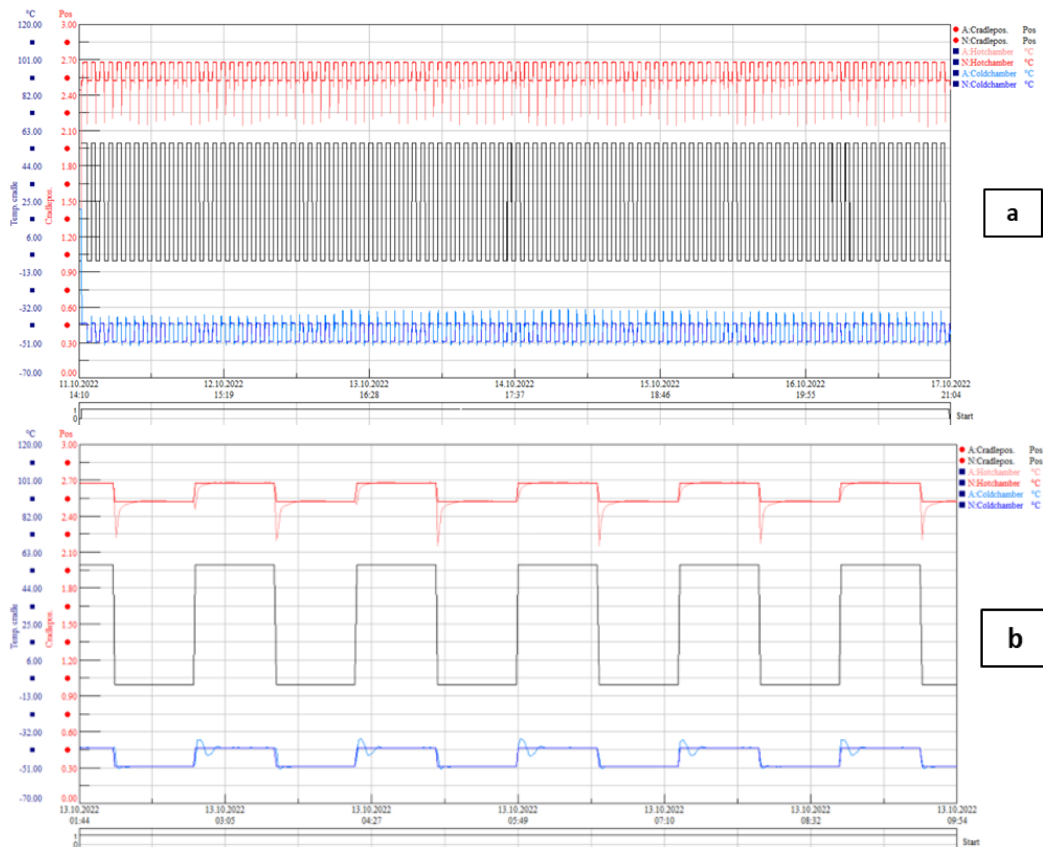


Fig. 3.6. Îmbătrânirea probelor: a) graficul înregistrat în urma testării, b) graficul înregistrat detaliat.

Pentru probele supuse investigațiilor, s-a folosit o temperatură maximă ( $T_B$ ) de  $90^\circ\text{C}$ ,  $t_1$  de 45 minute, cu un timp de stabilizare de 10% din  $t_1$ , adică 4 minute și 30 de secunde. Temperatura minimă aleasă a fost  $-40^\circ\text{C}$ , cu un același  $t_1$  și astfel cu un același timp de stabilizare. Probele au fost supuse la 100 de cicluri.

Ventilatoarele montate în ambele incinte au asigurat debitul mare și distribuția uniformă a aerului și prin acestea omogenizarea temperaturii în spațiul de testare.

### 52 | Cap. 3 – Caract. mecanică prin încercări statice a mat. pe bază de policarbonat

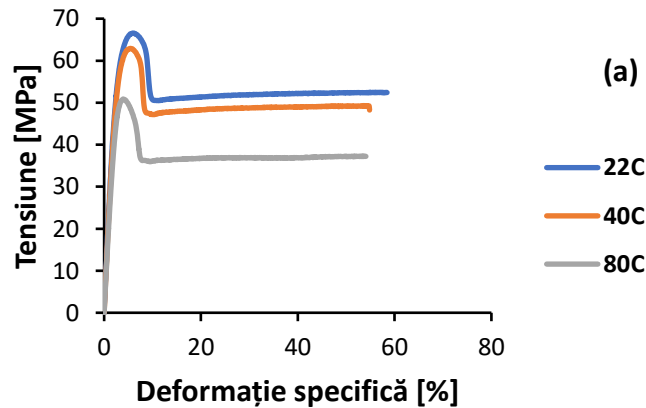
Este general cunoscut ca răspunsul la tracțiune a policarbonatului, ca și pentru majoritatea materialelor polimerice, este strict dependent de viteza de încărcare și de temperatură, afirmație confirmată de mai multe studii de specialitate [31],[50].

Figura 3.7 prezintă răspunsul tensiune - deformație specifică (ingineresc/engineering) la tracțiunea monotonică în cazul materialului de bază, dar și pentru clasele ranforsate, în funcție de trei temperaturi diferite (22°C, 40°C, 80°C).

Curbele pentru materialele individuale arată aceeași tendință, diferențiate doar de deplasările cauzate de condițiile de temperatură. Acestea reflectă un comportament elasto-plastic, care constă dintr-o regiune vâscoelastică, urmată de limita de curgere (considerată ca fiind punctul maxim local de pe curbă), apoi de regiunea plastică sau cea de curgere, încheiând cu punctul final, corespunzând locului de cedare al materialului. Tendințe similare de deformații neliniare ale materialelor în condiții de tracțiune monotonică și cvasistatică sunt descrise de numeroase studii în literatura de specialitate [33], [51].

În cazul materialului MK8035, însă, curbele sunt caracterizate doar de elasticitate neliniară, deoarece datorită fragilității materialului acesta va ceda fără ca materialul să se gătuiască după ce atinge tensiunea maximă la care acesta încă poate să reziste, independent de variația temperaturilor.

O observație comună pentru toate clasele de material studiate este dependența strictă a rezistenței maxime de temperatură.



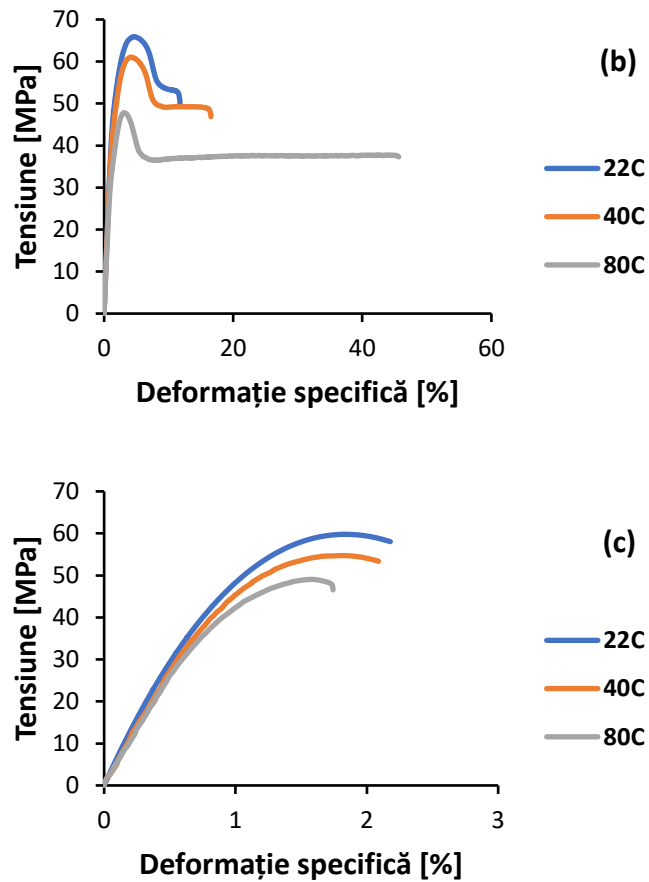


Fig. 3.7. Curbe tensiune – deformație specifică în funcție de temperatură pentru cele trei clase de policarbonat: (a) MK2405, (b) MK9415 și (c) MK8035.

În tabelele 3.4, 3.5 și 3.6 se regăsesc valorile medii ale rezistențelor maxime la diferite temperaturi și deviațiile standard corespunzătoare. La toate materialele investigate o scădere a rezistenței mecanice poate fi observată cu creșterea temperaturii de la 22°C până la 80°C, cu 43,61% pentru Makrolon 2405, 51,45% pentru Makrolon 9415 și 36,20% pentru Makrolon 8035.

## 54 | Cap. 3 – Caract. mecanică prin încercări statice a mat. pe bază de policarbonat

Tabel 3.4. Variația rezistenței maxime în funcție de temperatură pentru Makrolon 2405.

Makrolon 2405	22°C		40°C		80°C	
	Medie	Deviația standard [%]	Medie	Deviația standard [%]	Medie	Deviația standard [%]
Rezistența maximă [MPa]	60.37	1.34	44.69	5.01	34.04	6.02

Tabel 3.5. Variația rezistenței maxime în funcție de temperatură pentru Makrolon 9415.

Makrolon 9415	22°C		40°C		80°C	
	Medie	Deviația standard [%]	Medie	Deviația standard [%]	Medie	Deviația standard [%]
Rezistența maximă [MPa]	63.24	0.66	44.14	3.69	30.7	5.33

Tabel 3.6. Variația rezistenței maxime în funcție de temperatură pentru Makrolon 8035.

Makrolon 8035	22°C		40°C		80°C	
	Medie	Deviația standard [%]	Medie	Deviația standard [%]	Medie	Deviația standard [%]
Rezistența maximă [MPa]	62.35	0.94	52.88	3.34	37.67	11.65

În tabelul 3.7 sunt rezumate valorile medii și cele de deviație standard pentru modulul de elasticitate al materialelor în funcție de cele trei temperaturi care au fost selectate pentru investigații. Precum rezistența la rupere, modulul de elasticitate este de asemenea mult influențat de temperatură. Acesta suferă o descreștere de până la 13% pentru MK2405 și pentru MK9415, respectiv o scădere puțin mai mică de 7,5% pentru MK8035.

Tabel 3.7. Valorile medii și cele de deviație standard ale modulului de elasticitate în funcție de temperatură.

	Makrolon 2405		Makrolon 9415		Makrolon 8035	
	Medie [MPa]	Dev. standard [%]	Medie [MPa]	Dev. standard [%]	Medie [MPa]	Dev. standard [%]
22°C	2600	305.16	4104	131	5723	469.88
40°C	2480	98.11	3930	275.45	5680	200.44
80°C	2260	184.73	3571	177.93	5295	118.32

Referitor la coeficientul de contracție transversală, sau coeficientul lui Poisson, se poate observa că toate cele trei materiale arată stabilitate în ciuda creșterii temperaturii (tabel 3.8). Există o variație de aproximativ 3% pentru fiecare clasă, însă nu este nicio indicație clară asupra impactului negativ al temperaturii.

Tabel 3.8. Valorile medii și cele de deviație standard ale coeficientului lui Poisson în funcție de temperatură.

	Makrolon 2405		Makrolon 9415		Makrolon 8035	
	Medie [-]	Dev.standard [%]	Medie [-]	Dev.standard [%]	Medie [-]	Dev.standard [%]
22°C	0.418	0.067	0.414	0.014	0.343	0.083
40°C	0.43	0.041	0.421	0.03	0.336	0.086
80°C	0.431	0.02	0.403	0.041	0.332	0.06

### 3.2.3 Evaluarea influenței îmbătrânirii materialului

Figura 3.8 prezintă curbele ingineresti tensiune – deformație specifică (ingineresc/engineering) pentru încercarea la tracțiune monotonică a probelor de polycarbonat atât în condiții îmbătrânite, cât și neîmbătrânite, din toate cele trei materiale considerate. Curbele aparținând probelor îmbătrânite respectă aceeași tendință ca și cele pentru probele neîmbătrânite, însă un grad ridicat de similitudine poate fi observată doar până la limita de curgere (regiunea elastică). Dincolo de acest punct epruvetele îmbătrânite prezintă o scădere bruscă, referitoare la tensiuni, în contrast cu materialele neîmbătrânite unde înmuierea (softening) materialului se întâmplă mult mai încet. O curgere a materialului poate fi apoi observată pentru ambele tipuri de epruvete până ce deformațiile ating valorile lor maxime înaintea producerii ruperii materialului.

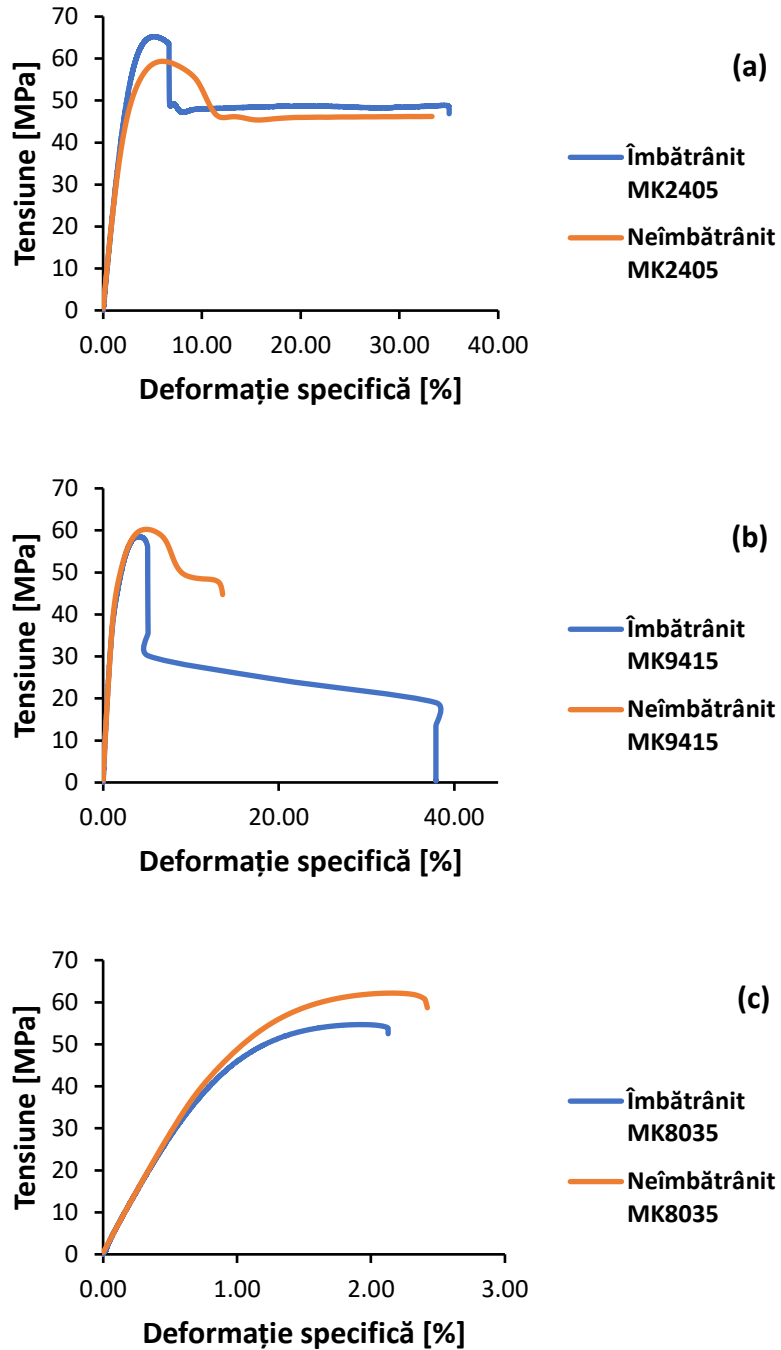


Fig. 3.8. Curbele de tensiune – deformație specifică aparținând probelor îmbătrânite și neîmbătrânite pentru cele trei tipuri de policarbonat: (a) MK2405, (b) MK9415 și (c) MK8035.



Tabelul 3.9 grupează valorile modului de elasticitate și a rezistenței maxime pentru materialele de policarbonat în condiții îmbătrânite și neîmbătrânite. Din valorile prezentate se poate observa o creștere foarte mică (1,2%) pentru modulul de elasticitate și pentru rezistența maximă (10%) în favoarea probelor îmbătrânite, dar numai în cazul materialului neranforsat.

În cazul materialelor ranforsate cu fibră de sticlă tendința se va modifica, făcând materialele neîmbătrânite mult mai stabile în cazul încărcărilor cu magnitudini apropiate de rezistența maximă.

Tabel 3.9. Variația modului de elasticitate și a rezistenței maxime datorită îmbătrânirii epruvetelor.

	Makrolon 2405		Makrolon 9415		Makrolon 8035	
	Modulul de elasticitate [MPa]	Rezistența maximă [MPa]	Modulul de elasticitate [MPa]	Rezistența maximă [MPa]	Modulul de elasticitate [MPa]	Rezistența maximă [MPa]
Îmbătrânit	2487.45	65.21	4215.37	58.53	5846.45	54.69
Neîmbătrânit	2457.84	59.33	4042.02	60.26	5960.54	58.83

Tehnica corelării digitale a fost de asemenea folosită pentru investigația materialelor îmbătrânite, în scopul determinării coeficientului de contracție transversală (coeficientul lui Poisson) și pentru comparația acestuia cu valorile măsurate în cazul materialelor neîmbătrânite.

Sistemul utilizat, împreună cu probele testate și special vopsite în prealabil în scopul măsurătorilor, este reprezentat în figura 3.9. Acesta este de tipul Dantec Dynamics Q-400, un dispozitiv de măsurare optică din dotarea laboratorului de Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică, echipat cu două camere, care filmează deformația probei din două unghiuri diferite, și o sursă de lumină monocromatică pentru iluminarea probei în timpul încercărilor. Camerele împreună cu reflectorul sunt conectate la un software special de calculator, printr-o unitate de interfață avansată, capabilă să comunice și cu alte echipamente de măsurare din laborator (în cazul unor măsurători mai complexe care necesită sincronizarea aparatelor).

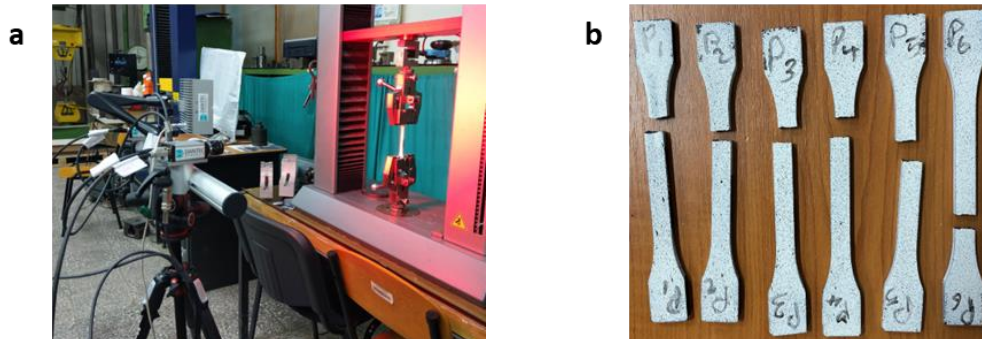
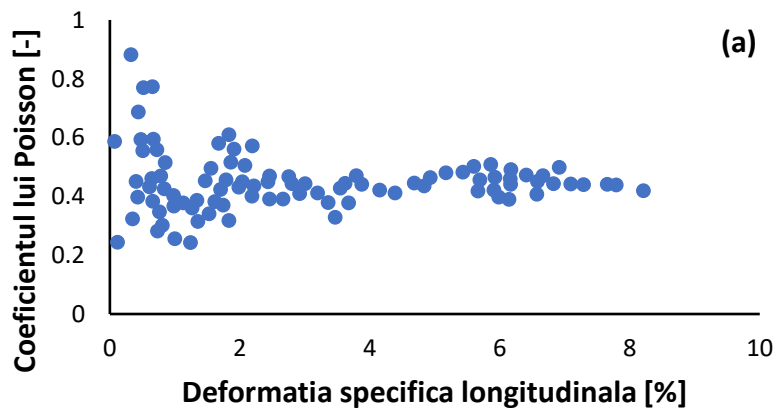


Fig. 3.9. (a) Sistemul de corelare digitală de tip Dantec Dynamics Q-400 din dotarea laboratorului de Rezistența Materialelor; (b) Probele îmbătrânite, special vopsite și testate în cadrul încercărilor la tracțiune.

În figura 3.10 sunt reprezentate măsurătorile directe ale coeficientului de contracție transversală în funcție de deformația specifică longitudinală, extrase din programul echipamentului. Dispersia rezultatelor se datorează multitudinii de puncte (sau markere) vopsite pe suprafața probelor și care sunt recunoscute de către camerele sistemului, respectiv monitorizate în timp real, în timpul efectuării încercărilor de tracțiune.

Se poate observa totuși că odată cu creșterea deformațiilor specifice longitudinale, dispersia valorilor coeficientului lui Poisson se stabilizează.



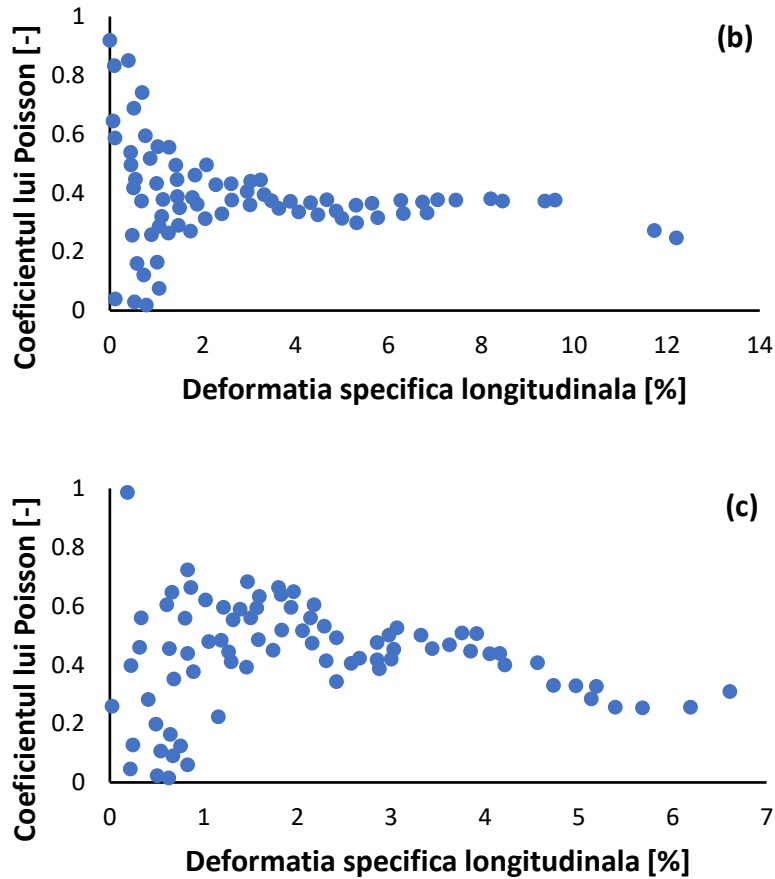


Fig. 3.10. Reprezentarea variației coeficientului lui Poisson în funcție de deformația specifică longitudinală pentru cele trei clase de material testate: a) MK2405, b) MK9415 și c) MK8035.

Tabelul 3.10 grupează valorile medii ale coeficienților de contracție transversală pentru toate cele trei tipuri de materiale testate, atât în condiții de îmbătrânire cât și în condiții normale, cu scopul de a avea o comparație corectă între valorile obținute.

Conform valorilor din tabel, se poate afirma că efectul îmbătrânirii asupra coeficientului de contracție transversală este minim, aceștia păstrându-se aproape constante – o deviație de 14% poate fi remarcată în cazul materialului având 30% fibră de sticlă, însă aceasta poate fi datorată și marjei de eroare a sistemului de corelare digitală.

Tabel 3.10. Variația coeficientului de contracție transversală datorită îmbătrânirii epruvetelor.

	Coeficientul de contracție transversală [-]		
	Makrolon 2405	Makrolon 9415	Makrolon 8035
Îmbătrânit	0,44	0,39	0,44
Neîmbătrânit	0,44	0,41	0,38

Cu toate că comportamentul manifestat de epruvetele îmbătrânite este diferit de cel observat de Sonja et al. [52], scăderea bruscă a tensiunilor, în comparație cu probele neîmbătrânite, este așteptată să fie datorită îmbătrânirii fizice și chimice a materialelor la nivel microscopic, rezultând ruperi de legături și făcând astfel loc degradărilor.

Pentru a compara rezultatele experimentale în cazul tuturor materialelor investigate, figura 3.11 este menită să prezinte modulul de elasticitate în funcție de viteza de încărcare, figura 3.12 prezintă variația rezistenței maxime cu variația vitezei de încărcare, iar în figura 3.13 se poate observa rezistența maximă în funcție de temperatură.

Din figura 3.11 reiese clar că influența majoră asupra creșterii modulului de elasticitate o are creșterea raportului conținutului de fibră de sticlă, de la 0%, în cazul Makrolon 2405, la 30% pentru Makrolon 8035. Analizând valorile medii ale modulului de elasticitate pe tot parcursul intervalului vitezei de încărcare, se poate identifica o mică creștere. Rezultate similare au fost prezentate în literatura de specialitate pentru alte tipuri de polimeri [53], [54].

Influența vitezei de încărcare asupra rezistenței admisibile indică o creștere între 13,67% pentru Makrolon 2405 și 7,87% pentru Makrolon 8035 (figura 3.12), cu creșterea vitezei traversei, confirmând studii asemănătoare din literatură, precum investigațiile lui Schossig et al. [24]. Pe lângă aceasta, se poate observa că odată cu creșterea procentajului de fibră materialul devine mai puțin sensibil la variația vitezei de încărcare. Însă, se poate afirma că toate cele trei materiale investigate demonstrează o ecrusare indusă de viteza de încărcare.

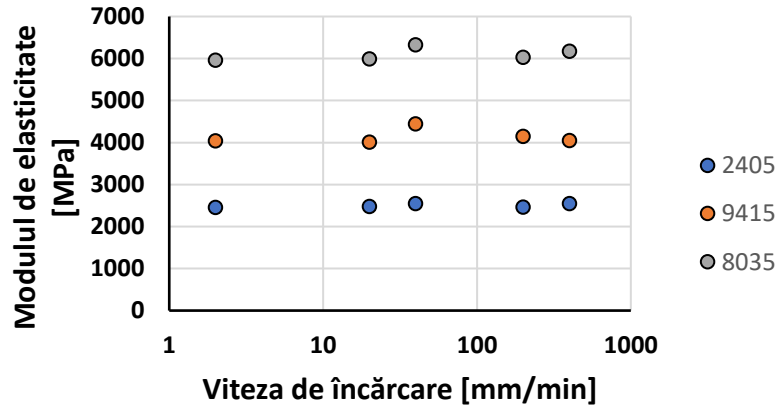


Fig. 3.11. Modulul de elasticitate în funcție de viteza de încărcare pentru materialele investigate.

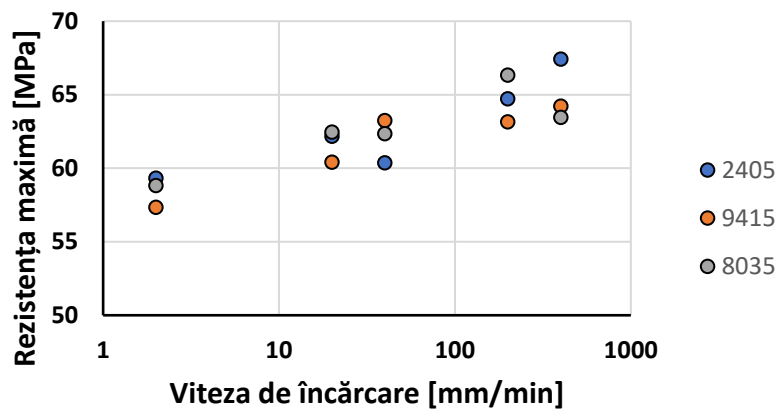


Fig. 3.12. Rezistența maximă în funcție de viteza de încărcare pentru materialele investigate.

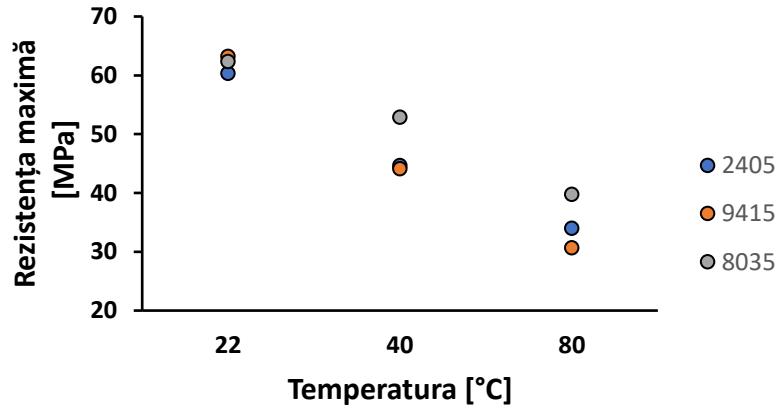


Fig. 3.13. Rezistența maximă în funcție de temperatură pentru materialele investigate.

Materialele investigate sunt mult mai sensibile la creșterea temperaturii, care produce scăderi substanțiale a rezistenței maxime. Acest aspect ar trebui avut în vedere pe parcursul proiectării componentelor care vor fi expuse unor temperaturi mai ridicate. Modulul de elasticitate (Fig. 3.14) și coeficientul lui Poisson (Fig. 3.15), pe de altă parte, arată un comportament mult mai stabil de-a lungul plajei de temperaturi considerate.

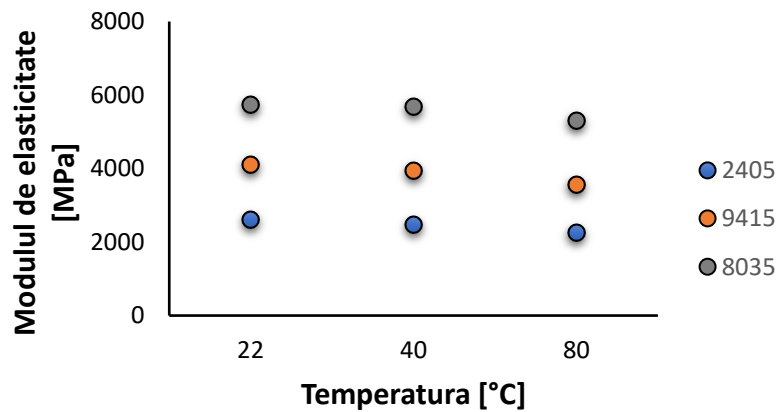


Fig. 3.14. Modulul de elasticitate în funcție de temperatură pentru materialele investigate.

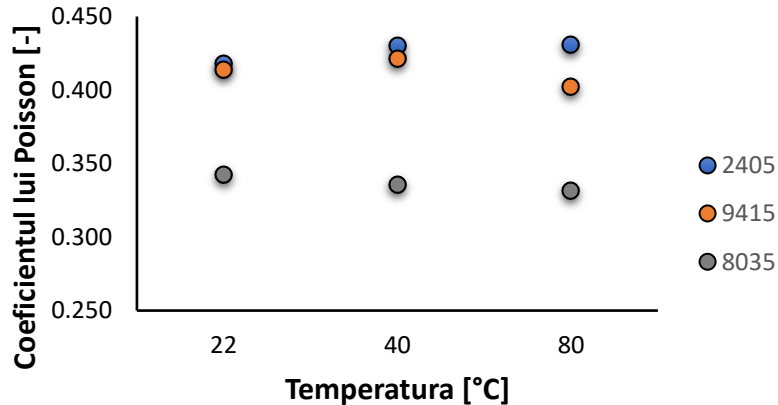


Fig. 3.15. Coeficientul lui Poisson în funcție de temperatură pentru materialele investigate.

În cazul modulului de elasticitate, ca și în cazul vitezei de încărcare, procentajul de fibră devine mult mai dominant decât influența temperaturii în sine, valorile suferind o foarte mică scădere datorată creșterii temperaturii. În cazul coeficientului lui Poisson, tendința creșterii sau scăderii datorită influenței temperaturii nu poate fi ușor stabilită, însă toate cele trei materiale păstrează o stabilitate oarecare, dispersia valorilor fiind aproape infimă.

### 3.3 Încercări de tenacitate la rupere prin încovoiere în trei puncte

Măsurătorile statice de tenacitate la rupere a celor trei clase de policarbonat au fost efectuate prin încercări de tip încovoiere în trei puncte, utilizând epruvete crestate și o mașină universală de tracțiune. Bazat pe formulele matematice, cu forța maximă obținută în timpul testelor și cu factorii geometrici ( $a/W$ ), s-a calculat factorul critic de intensitate a tensiunii, care, la urmă, a fost comparat între materialul neranforsat și între cele ranforsate.

Tenacitatea la rupere este cunoscută ca una dintre cele mai importante caracteristici ale unui material structural, care descrie rezistența materialului la propagarea unei fisuri, sau cu alte cuvinte, indică abilitatea materialului de a absorbi energia de deformare înainte de rupere [55], [56].

Evaluarea valorilor tenacității la rupere în procesul de selecție al unui material, în aplicații diferite de proiectare, este critică pentru a elimina diverse tipuri de defecte mecanice [57], [58], [59]. Materialele structurale cu valori mai mari ale tenacității la rupere sunt mai rezistente la propagarea fisurilor.

Valorile tenacității la rupere pot fi determinate prin măsurători experimentale specifice, dintre care cele mai des utilizate metode sunt încercările de impact cu ciocanul Charpy, respectiv testele de încovoiere în trei puncte, folosind

epruvete precrestate. Amândouă încercări sunt efectuate pe epruvete standardizate, precrestate în formă de V sau U înaintea aplicării încărcărilor particulare [60], [61], [62].

Epruvetele folosite în cadrul încercărilor statice de tenacitate la rupere au fost debitate din epruvete standarde de tracțiune, de tip "dog bone", obținute direct în forma specifică prin injecție de mase plastice, cu dimensiunile specifice conform cu probele de tip 1B menționate în standardul ISO 527-2 [63], standard de testare la tracțiune. Pentru a obține formele dreptunghiurale specifice, capetele epruvetelor mai sus menționate au fost tăiate. În urma acestui proces mecanic de prelucrare, s-au introdus și creștăturile particulare în toate epruvetele, în conformitate cu standardul ASTM D5045 [64]. Conform acestuia, pentru speciamele de tip single-edge-notch bending (SENB) raportul dintre lungimea fisurii prestate și dintre lățimea speciamei trebuie să fie în intervalul 0,45-0,55. Urmând instrucțiunile, creștături ascuțite au fost tăiate în probe, pe lângă care, o fisură naturală a fost generată, lovind ușor o lamă plasată în creștătura prelucrată (Fig. 3.16).



Fig. 3.16. Probele pregătite pentru investigațiile statice ale tenacității la rupere.

Măsurătorile statice de tenacitate la rupere au fost efectuate pe o mașină universală, electromecanică, de tip Zwick-Roell Z005, echipată cu o celulă de forță de 5 [kN].

Deoarece epruvetele selectate au fost de tipul SENB, teste de încovoiere în trei puncte au fost efectuate, cu epruveta simplu rezemată pe cele două capete, la o distanță egală față de fisura prestabilită, orientată către baza mașinii, și față de cilindrul apăsător, plasat pe partea opusă a speciamei față de creștătură. Măsurătorile s-au făcut la temperatura ambiantă (22°C), cu o viteză de încărcare de 2 [min/mm].

Pentru a obține caracteristicile tenacității la rupere pentru toate cele trei materiale, șase epruvete crestate au fost testate din toate clasele de material.



### 3.3 – Încercări de tenacitate la rupere prin încovoiere în trei puncte | 65

Din analiza microscopică a zonei de rupere s-au putut trage concluzii importante: materialul de bază (neranforsat) a arătat un comportament fragil la rupere, însă, contrar acestei observații, cele două materiale ranforsate cu fibră de sticlă nu au suferit o rupere totală până la sfârșitul testelor. Probele supuse încărcărilor de încovoiere s-au deformat plastic, dar fisura generată prin prelucrări mecanice nu s-a propagat prin toată secțiunea transversală a epruvetei.

Figura 3.17 prezintă imaginile microscopice din zona creștăturilor pentru câteva dintre epruvetele testate.

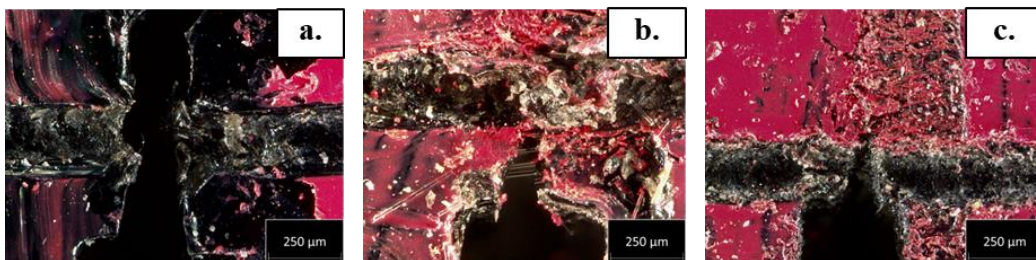
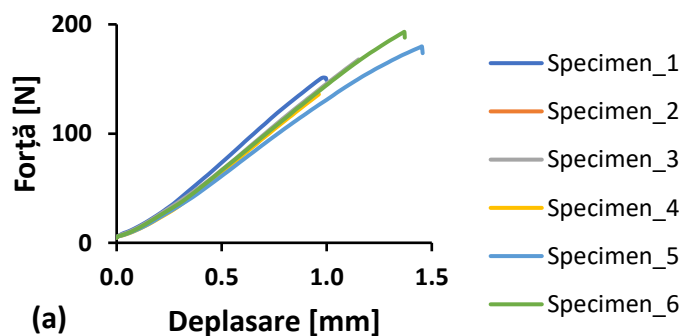


Fig. 3.17. Imaginile microscopice ale epruvetelor supuse încărcărilor statice de încovoiere în trei puncte: a) MK2405, b) MK9415 și c) MK8035

Din imagini se poate observa direcția de propagare a fisurii și capetele luminoase ale fibrelor de sticlă, reflectând lumina emisă de microscop. Ruperea materialelor ranforsate indică mecanismul de "bridging", fibrele creând o punte care ține împreună suprafețele fracturate după ce matricea a fost propagată de fisură, [65]. Epruvetele nearmate cu fibre au prezentat o rupere fragilă.

Curbele forță - deplasare ale claselor de materiale testate arată o repetabilitate foarte bună a măsurărilor, fără împrăștiere semnificativă între datele individuale (Fig. 3.18).



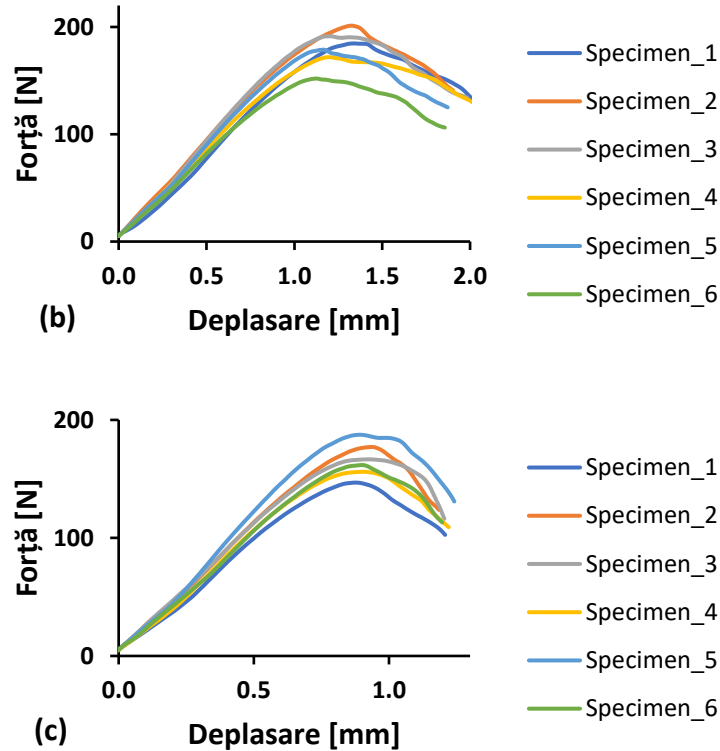


Fig. 3.18. Curbe forță-deplasare pentru cele trei clase de material testate: a) MK2405, b) MK9415 și c) MK8035.

Curbele caracteristice subliniază concluziile trase din prima analiză a probelor testate, mai exact faptul că materialul de bază, Makrolon 2405, a demonstrat un comportament de rupere fragilă, în timp ce în cazul claselor ranforsate, Makrolon 9415 și Makrolon 8035, curbele indică o comportare elasto-plastică, materialele trecând prin deformații ductile.

Din parametri geometrici ai epruvetelor testate, și cu forțele maxime măsurate, valorile tenacității la rupere au fost calculate cu relația (3.1).

$$K_C = \frac{F_{max}}{\sqrt{WB}} f(a/W) \quad (3.1)$$

în care:

- $F_{max}$  – este forța critică, [N]
- $W$  – este lățimea epruvetei, [mm<sup>0.5</sup>]
- $B$  – este grosimea epruvetei, [mm]
- $f(a/W)$  – este factorul geometric, [-]

### 3.3 – Încercări de tenacitate la rupere prin încovoiere în trei puncte | 67

Valorile obținute ale tenacității la rupere, alături de deviațiile standard, sunt sintetizate în tabelul 3.11.

Tabel 3.11. Valorile medii și deviațiile standard ale tenacității la rupere pentru cele trei tipuri de Makrolon.

	Makrolon 2405		Makrolon 9415		Makrolon 8035	
	Medie	Dev. standard [%]	Medie	Dev. standard [%]	Medie	Dev. standard [%]
Tenacitate la rupere [MPa m <sup>0.5</sup> ]	4.447	1.283	4.896	0.71	4.549	0.577

Rezultatele tenacității la rupere indică faptul că armarea cu fibre de sticlă a policarbonatului crește tenacitatea la rupere. Totuși, un volum prea mare de fibre conduce din nou la scăderea tenacității, probabil din cauza zonelor de interfață matrice - fibre care cresc cu creșterea volumului de fibre.

### 3.4 Concluzii privind comportamentul materialelor pe bază de policarbonat la încercările statice

Scopul investigațiilor a fost evaluarea influenței vitezei de încărcare și a temperaturii - atât la încălzire constantă, cât și la îmbătrânirea materialului - asupra comportamentelor celor trei clase din gama Makrolon la încercări de tracțiune, respectiv evaluarea tenacității statice la rupere a materialelor selectate.

În cazul încercărilor la tracțiune, investigațiile curente subliniază faptul că rigiditatea materialului este puțin afectată de viteza de încărcare. Cu toate acestea, atunci când rezistența maximă este factorul decisiv, variația acesteia cu viteza de încărcare și cu condițiile de temperatură trebuie să fie luată în considerare.

Se poate afirma că combinația dorită dintre rigiditate și rezistență maximă poate fi obținută prin adăugarea unui conținut particular de fibră.

În cazul tenacității la rupere, pentru toate materialele, o repetabilitate foarte bună a valorilor măsurate poate fi observată, fără o dispersie semnificativă a rezultatelor determinate în termeni de forță - deplasare.

Valorile tenacității la rupere cresc odată cu creșterea volumului de fibră de sticlă, însă se poate identifica o aplatizare a valorilor, după care acestea încep să scadă dacă procentajul fibrelor de sticlă depășește un anumit prag.

## Capitolul 4 - Caracterizarea mecanică prin încercări dinamice a materialelor pe bază de policarbonat

### 4.1 Încercări de încovoiere prin șoc a materialelor pe bază de policarbonat cu ciocanul instrumentat Charpy

#### 4.1.1 Introducere

Compozitele cu matrice din policarbonat sunt foarte răspândite în diferite arii ale industriei pentru fabricația unor produse. Cu toate că aceste materiale sunt folosite cu mare fidelitate, proprietățile lor mecanice vor depinde în mare măsură de: procesele de fabricație, orientarea fibrelor în funcție de direcția de încărcare, tipul încărcării, condițiile de mediu etc.

Acest capitol e menit să prezinte comportamentul dinamic la încercările de impact de tip Charpy în cazul celor trei materiale din policarbonat, din gama Makrolon, în condiții crestate și necrestate.

Măsurătorile experimentale au demonstrat într-un mod clar efectul conținutului de fibră asupra tensiunii maxime la impact a materialului: cu creșterea raportului de fibră tensiunea maximă descrește, manifestând un comportament fragil.

Caracterizarea la impact a epruvetelor crestate poate facilita selecția de materiale pentru aplicații cu complexități geometrice ridicate, unde concentratorii de tensiune nu pot fi eliminați. Pe lângă aceasta, modelele de materiale obținute prin corelări, pot ajuta la creșterea acurateții simulărilor și la accelerarea ciclurilor de dezvoltare ale produselor.

Încercările de impact au fost realizate pentru a măsura experimental rezistența unui produs sau a unui material la încărcări de viteze mari. De-a lungul ciclurilor de viață a multor produse, acestea pot fi expuse la încărcări externe specifice, precum șocuri, coliziuni sau căderi (*drops*), care pot necesita absorbții rapide ale energiei. Prin urmare, materialele pieselor individuale, mai ales cele fabricate prin injecția maselor plastice, trebuie selectate luând în calcul toate circumstanțele posibile care pot apărea în ciclul de viață al unui produs, pentru a garanta funcționalitatea continuă a acestora. Una dintre cele mai dificile sarcini este asigurarea proprietăților mecanice, cu precădere a rezistenței maxime la impact, având în vedere că acești parametri sunt foarte dependenți de efectele geometrice [61].

Încercarea de impact de tip Charpy, sau testul Charpy pe epruvete cu crestături de tip V, este un test clasic, standardizat, cu viteze de încărcare mari,

#### 4.1 – Încercări de încovoiere prin șoc a mater. pe bază de policarbonat cu Charpy| 69

folosit pentru a măsura energia absorbită de o epruvetă crestată sau necrestată, în timpul ruperii, cauzată de o încărcare de impact.

Această procedură de testare a materialului a devenit una dintre cele mai des utilizate metode de verificare a rezistenței maxime la impact sau de control al calității pentru senzitivitatea la crestături, tenacității la impact sau a determinării modului de rupere a diferitelor materiale ingineresti. [66], datorită multiplelor avantaje, precum: simplitatea epruvetei și a efectuării testului, rezultate obținute rapid și cu un cost redus [67], rezultate comparabile cu cele obținute prin alte metode de testare des utilizate, de exemplu testul de forfecare de tip *short beam shear* în cazul materialelor compozite [68] etc.

În mod similar cu alte metode de testare, testul clasic de impact Charpy este și el caracterizat de o serie de dezavantaje, din care se poate menționa aspectul său calitativ: rezultatele obținute din teste pot fi folosite doar în scopuri de comparație, măsurătorile se pot compara între ele sau cu o cerință specifică, dar nu pot fi utilizate pentru calcule ulterioare.

Testarea la impact de tip Charpy instrumentat, însă, a fost dezvoltată în așa fel încât să depășească limitele testului clasic de impact, oferind mai mult decât valoarea energiei ce poate fi absorbită de proba testată. Forța maximă, curba forță - deplasare, curgerea generală, răspunsul potențial de rupere accelerată sau o imagine mai clară despre tranziția materialului de la comportamentul ductil spre cel fragil prin evaluarea comportamentului la impact la temperaturi diferite [62], [69], sunt doar câteva dintre abilitățile principale pe care încercarea la impact de tip Charpy instrumentat le posedă. Pe lângă aceste caracteristici de materiale și altele au fost derivate din investigațiile numeroase asupra testării la impact prin metoda instrumentată, dintre care este de menționat propunerea lui Server [70], în ceea ce privește estimarea limitei dinamice de curgere bazată pe forța caracteristică la curgerea generală, având o importanță deosebită pentru materialele cu o senzitivitate ridicată la vitezele de încărcare, cum ar fi oțelurile de rezistență maximă scăzută, compozitele etc.

Obiectivul acestui studiu a fost evaluarea comportamentului la impact a trei clase diferite de policarbonat, materiale comercial disponibile, în cazul unor epruvete crestate și necrestate, pentru a determina dacă avantajele aduse de fibrele de ranforsare, precum îmbunătățirea rezistenței mecanice și a rigidității, pot fi regăsite, de asemenea, și în proprietățile tenacității la rupere ale acestor materiale. Pe lângă primul obiectiv își propune să elaboreze și un model de material pentru simulările numerice, bazat pe un proces de corelare, cu scopul de a facilita procesele de selecție ale materialelor și cele de pregătire a conceptelor în domeniul proiectării mecanice.

Ca și în cazul oricărei metode standardizate de caracterizare a materialelor, testările la impact de tip Charpy descriu în mod asemănător procesul de manufacturare și dimensiunile probelor care se utilizează în scopul investigațiilor experimentale. În cazul materialelor polimerice standardul care se urmărește este ISO 179 [71] care e menit să acopere procedura de testare atât pentru metodele

## 70 | Cap. 4 – Caract. mecanică prin încercări dinamice a mater. pe bază de policarbonat

neinstrumentate cât și pentru cele instrumentate, descrise în două părți separate (partea 1 și partea 2).

Epruvetele folosite în cadrul acestui studiu au fost derivate din epruvete clasice, de tip dog bone (Fig.4.1.a), fabricate prin tehnica injecției maselor plastice, conform probei de tip 1B, din standardul de testare la tracțiune ISO 527-2 [63]. Formele dreptunghiulare și dimensiunile specifice impuse de standardul de testare la impact de tip Charpy, au fost apoi obținute prin tăierea capetelor, rezultând probe cu următorii parametri: lungime de  $80 \pm 2$  [mm], lățime de  $10.0 \pm 0.2$  [mm] și grosime de  $4.0 \pm 0.2$  [mm] (Fig.4.1.b).

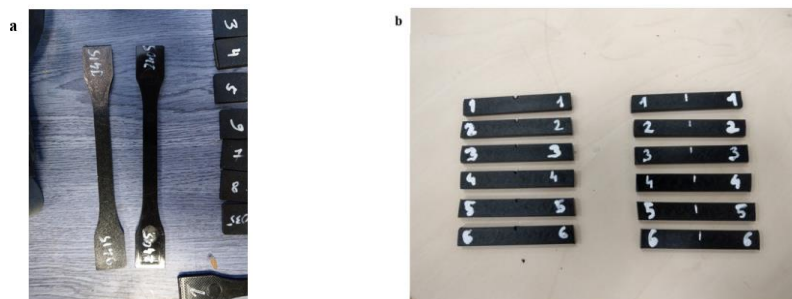


Fig. 4.1. (a) Probe de tracțiune conform ISO 527-2; (b) Probe de impact crestate și necrestate de tip Charpy conform ISO 179-1.

Pentru tipul de epruvetă crestată, s-au considerat crestături de tip A, conform celor menționate de standardul ISO 179-1. Acestea sunt caracterizate de o crestătură cu unghiul la vârf de  $45 \pm 1^\circ$ , și o rază la vârf de  $0,25 \pm 0,05$  [mm]. Lățimea rămasă a probei în dreptul crestăturii este de  $8.0 \pm 0.2$  [mm].

Datorită faptului că probele au fost obținute din epruvete de tracțiune de tip 1B, și în consecință având o porțiune paralelă mai scurtă decât lungimea cerută de standardul Charpy, epruvetele folosite pentru investigațiile au avut o deviație de 20 [mm] în lungime, în comparație cu dimensiunile prescrise. Cu toate acestea, această scurtare nu a avut un impact negativ asupra comportamentului probelor la impact, deoarece distanța dintre suportți, caracteristică a echipamentului folosit, a fost măsurată având 40 [mm].

Pentru caracterizarea la impact de tip Charpy a celor trei clase de policarbonat selectate o mașină instrumentată de tip Instron CEAST 9050 a fost utilizată (Fig.4.2.a). Mașina consta dintr-un pendul având o lungime de 394,5 [mm] combinat cu un ciocan la capăt, având o masă de 3,46 [kg], care posedă o energie potențială de 25 [J] și o viteză de impact de 3,8 [m/s]. Măsurătorile semnalului de forță au fost transmise aplicației preinstalate pe calculatorul echipamentului printr-un sistem de achiziție a datelor conectat la ciocan.

#### 4.1 – Încercări de încovoiere prin șoc a mater. pe bază de policarbonat cu Charpy| 71

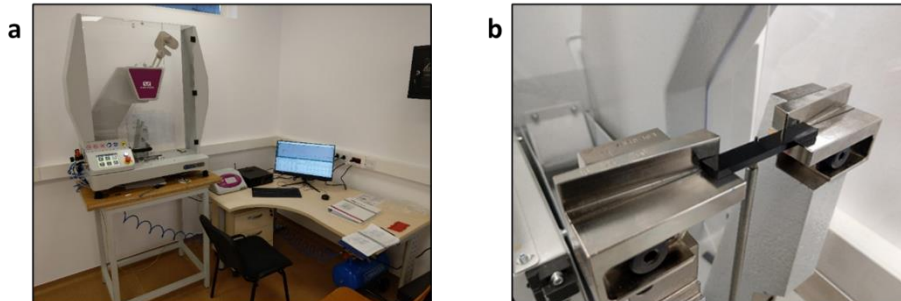


Fig. 4.2. (a) Instron CEAST 9050 echipament instrumentat de testare la impact; (b) Poziționarea probei în vederea testării.

Pentru efectuarea testelor, probele au fost plasate orizontal, prin maniera *edgewise*, pe suprafețele de așezare ale dispozitivului și împinse către nicovalele acestuia. În plus, un ac de centrare a fost utilizat pentru alinierea creștăturii între nicovale (Fig.4.2.b). În cazul epruvetelor necrestate, un marcaj a fost folosit în locul acului ca și referință.

Pentru determinarea caracteristicilor de impact s-au efectuat încercări experimentale pentru câte șase epruvete crestate și necrestate din fiecare categorie de material.

##### 4.1.2 Măsurători experimentale pentru epruvete necrestate

În cazul epruvetelor necrestate s-au putut observa comportamente diferite de post impact. Makrolon 2405 (materialul neranforsat) nu a suferit cedare totală de material, în schimb s-a putut observa o deformație permanentă a probelor (Fig.4.3.a). În cazul lui Makrolon 9415 (10% raport de fibră din volum) acesta a manifestat o ruptură parțială în urma impactului (Fig.4.3.b), în timp ce Makrolon 8035 (policarbonat cu 30% fibră de sticlă) a prezentat o ruptură totală de-a lungul direcției impactului (Fig.4.3.c).

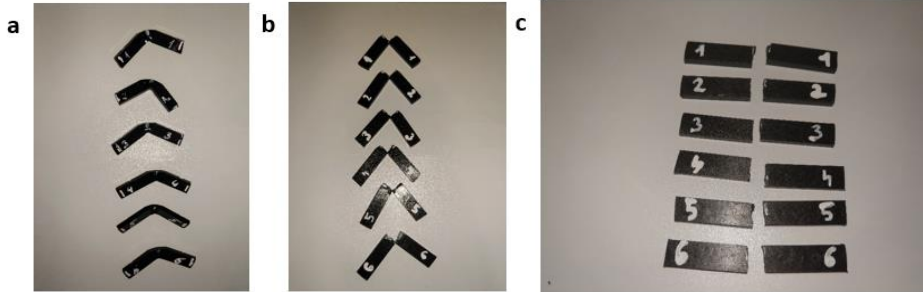
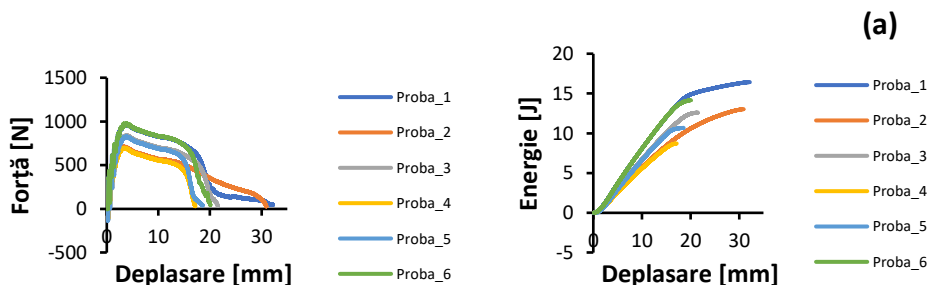


Fig. 4.3. Probe necrestate în urma impactului: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Profitând de posibilitățile oferite de testul de impact instrumentat Charpy și pentru a pregăti un model de material pentru investigațiile numerice ulterioare, s-a făcut o analiză mai detaliată a rezultatelor cu privire la datele înregistrate de tip forță în funcție de timp.

Pentru scopuri de evaluare și de comparație curbe de tipul forță-deplasare, respectiv energie-deplasare au fost reprezentate, atât pentru setul de probe crestate, cât și pentru cele necrestate.

În mod similar cu rezultatele cvasistatice de tracțiune, pe curba forță-deplasare a policarbonatului neranforsat, toate cele trei regiuni caracteristice au putut fi observate: regiunea deformațiilor elastice urmată de regiunea deformațiilor plastice, încheiând cu regiunea propagării fisurii (Fig.4.4.a). În termeni de energie în funcție de deplasare, efectul deformațiilor plastice poate fi derivat din creșterea deplasărilor la niveluri constante ale energiei. Pentru materialul conținând 10% fibră de sticlă a treia regiune este caracterizată de un comportament mai fragil, cu toate că deformații ductile sunt încă prezente înainte de apariția ruperii (Fig.4.4.b). Se poate constata scăderea energiei de impact cu creșterea procentajului de fibră. În cazul materialului cel mai dur (având 30% fibră de sticlă) regiunea elastică este direct urmată de ruperea fragilă și se asociază cu cantitatea cea mai mică de energie pe care materialul o poate absorbi înaintea ruperii (Fig.4.4.c).





#### 4.1 – Încercări de încovoiere prin șoc a mater. pe bază de policarbonat cu Charpy | 73

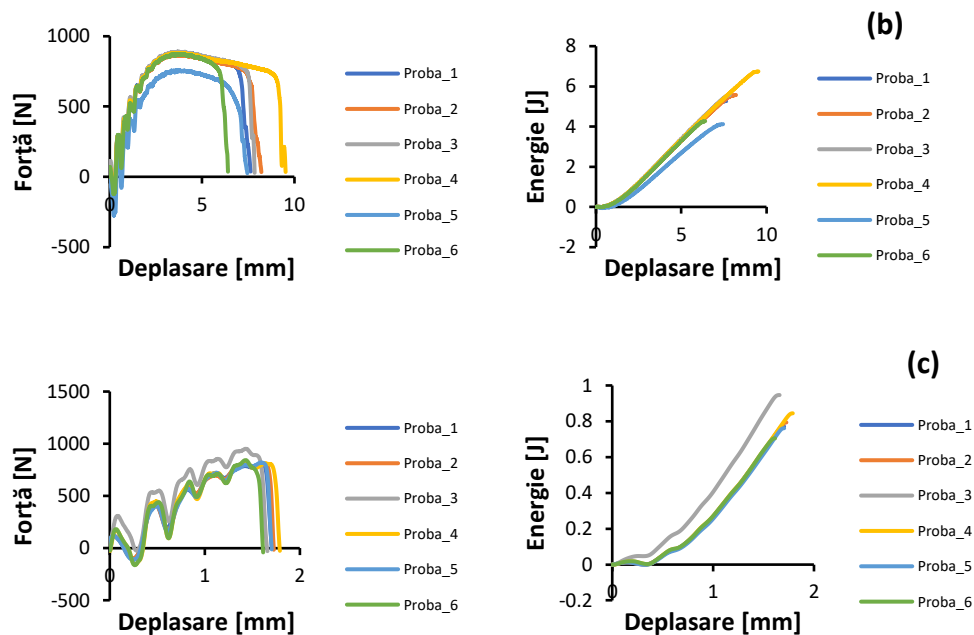


Fig. 4.4. Curbe forță-deplasare, respectiv energie-deplasare pentru probele necrestate: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

#### 4.1.3 Măsurători experimentale pentru epruvete crestate

Măsurătorile pentru epruvetele crestate au fost efectuate cu un pendul diferit față de probele necrestate, acesta având următorii parametri: lungime pendul 229,7 [mm], cu un ciocan integrat la căpatul de lovire de 1,18 [kg] cu o energie potențială de 5 [J] și o viteză de impact de 2,9 [m/s], restul configurației de testare rămânând identică cu cea de dinainte.

În cazul epruvetelor crestate, pentru toate probele și pentru toate materialele, cu excepția a câteva cazuri pentru materialul pur (Makrolon 2405), un comportament de rupere fragilă la impact a fost observat, declanșat de energia cinetică a ciocanului. Probele rupte sunt prezentate în Figura 4.5.a, 4.5.b și 4.5.c.

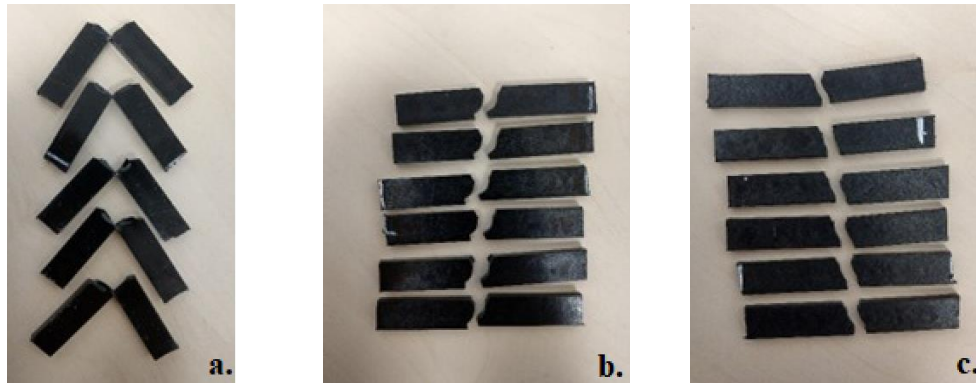


Fig. 4.5. Probe rupte în urma încercărilor dinamice de impact tip Charpy, folosind un ciocan de 5 [J]: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Suprafețele de rupere în cazul tuturor epruvetelor testate prezintă aceeași tendință de inițiere și de propagare a fisurii.

În figura 4.6 sunt reprezentate imaginile microscopice ale secțiunilor de rupere pentru fiecare material în parte. În cazul lui MK2405 și MK9415 se pot diferenția într-un mod clar zonele ductile, cu deformații locale înaintea cedării materialului, proporționale cu procentajul fibrelor de sticlă din compoziție. În cazul lui MK8035 secțiunea transversală este caracterizată în cea mai mare măsură de o ruptură fragilă.

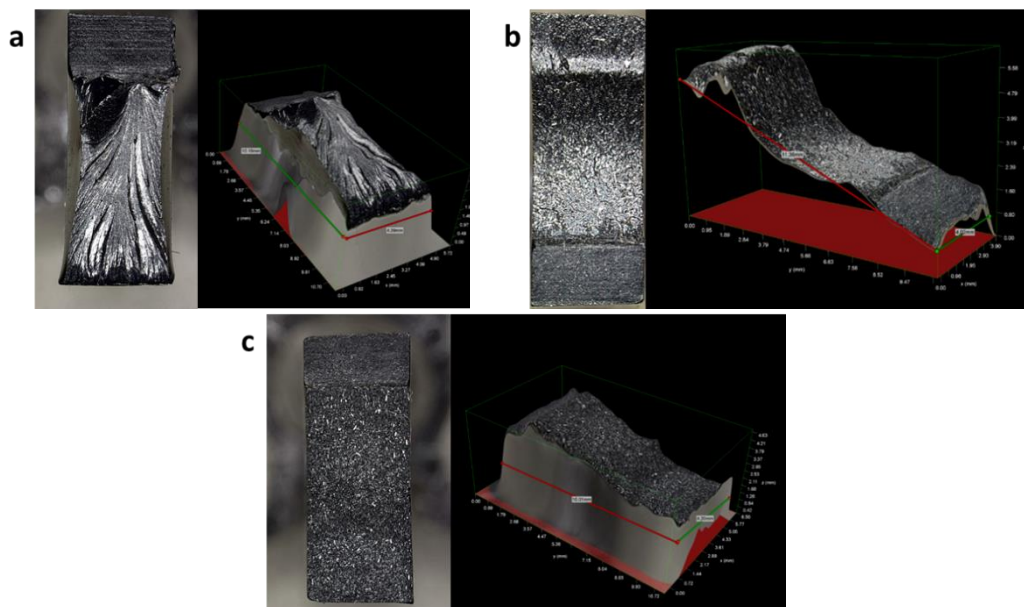


Fig. 4.6. Probe rupte în urma încercărilor dinamice de impact tip Charpy, folosind un ciocan de 5 [J]: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

#### 4.1 – Încercări de încovoiere prin șoc a mater. pe bază de policarbonat cu Charpy| 75

Câteva analogii cu perechile necrestate pot fi observate în termeni de regiuni caracteristice, însă natura fragilă a rupei este mult mai accentuată pentru toate categoriile de material. Prin urmare, energiile absorbite la impact sunt mult sub nivelurile de energii absorbite în cazul probelor necrestate. Graficele corespunzătoare sunt reprezentate în figurile 4.7.a, 4.7.b și 4.7.c.

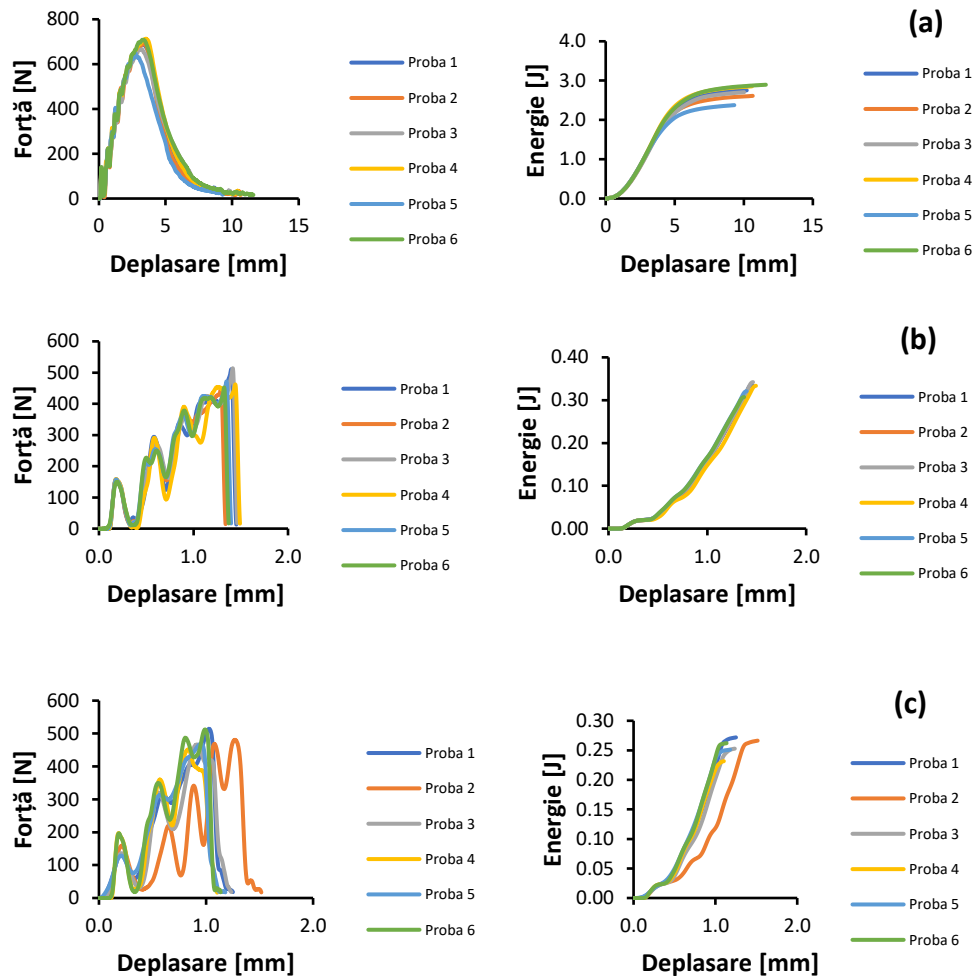


Fig. 4.7. Curbe forță-deplasare, respectiv energie-deplasare pentru probele crestate: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Capacitatea mare de absorbție a energiei de impact în cazul policarbonatului de bază (Makrolon 2405) în comparație cu materialele ranforsate, poate fi extrasă direct din valorile forță-deplasare. Însă, analizând curbele de energie-deplasare, se

poate observa că energia absorbită de materialul neranforsat este de zece ori mai mare decât energiile absorbite de materialele armate cu fibră de sticlă.

Pentru a minimiza probabilitatea erorilor de încercare posibile, testele au fost repetate pentru mai multe epruvete, însă aceeași tendință a fost identificată.

Bazat pe datele înregistrate valorile rezistenței maxime la impact au fost de asemenea calculate. Acestea sunt rezumate, printr-o comparație, în figura 4.8.

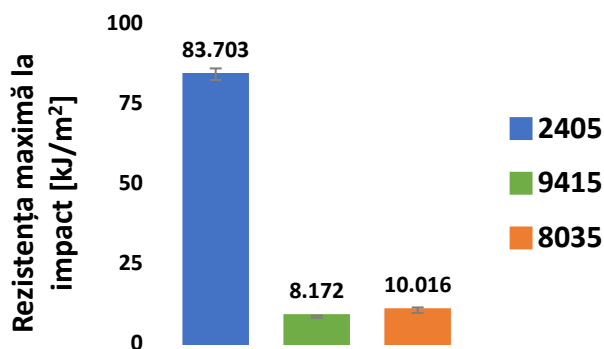


Fig. 4.8. Valorile rezistenței maxime la impact pentru toate cele trei materiale calculate din datele înregistrate.

Cu toate că în literatura de specialitate nu se găsesc foarte multe studii axate pe comportamentul la impact a polycarbonatelor crestate, Allen et al. [37] menționează valori ale rezistenței la impact pentru materialul nerarmat aproape identice cu cele obținute în cadrul acestor investigații dinamice.

Obiectivul investigațiilor a fost studierea comportamentului la impact pentru cele trei tipuri de polycarbonat din familia Makrolon.

Pe lângă determinarea valorilor de forță-deplasare și energie-deplasare - valori care arată diferențe de aproape un ordin de mărime dintre materialul de bază și cele armate, în favoarea celui neranforsat - s-a calculat rezistența maximă la impact a materialelor testate, iar valorile obținute au fost comparate cu cele găsite în literatura de specialitate.

Tabelul 4.1 rezumă valorile determinate ale rezistenței maxime la impact pentru toate cele trei clase de polycarbonat.

Pentru Makrolon 2405 necrestat valoarea rezistenței maxime la impact nu se aplică, având în vedere că nu s-a produs nicio rupere în material.

În literatură, pentru materialele testate, doar date privind rezistența maximă la impact a probelor necrestate au putut fi găsite, arătând o potrivire a valorilor de rezistență determinate după cum urmează: pentru Makrolon 2405 nu s-a observat ruperea nici în cazul încercărilor experimentale, nici în literatură, pentru Makrolon 9415 o diferență de 12,33% (131,5 kJ/m<sup>2</sup> măsurat față de 150 kJ/m<sup>2</sup> în baza de

#### 4.1 – Încercări de încovoiere prin șoc a mater. pe bază de policarbonat cu Charpy| 77

date a materialelor) a fost depistată, în timp ce pentru Makrolon 8035 o discrepanță mai mare de aproximativ 50% dintre valorile măsurate și cele date în baza de date a fost remarcată (20,125 kJ/m<sup>2</sup> măsurat față de 40 kJ/m<sup>2</sup> în bazele de date). Se presupune că diferențele rezultă din procesul de fabricație a probelor.

Tabel 4.1. Rezistența maximă la impact pentru clasele de policarbonat testate în condiții necrestate și crestate

Makrolon 2405	Necrestat		Crestat	
	Medie [kJ/m <sup>2</sup> ]	Deviația standard [%]	Medie [kJ/m <sup>2</sup> ]	Deviația standard [%]
	N/A	N/A	83,703	9,212
Makrolon 9415	Necrestat		Crestat	
	Medie [kJ/m <sup>2</sup> ]	Deviația standard [%]	Medie [kJ/m <sup>2</sup> ]	Deviația standard [%]
	131.50	18.41	10,016	1,066
Makrolon 8035	Necrestat		Crestat	
	Medie [kJ/m <sup>2</sup> ]	Deviația standard [%]	Medie [kJ/m <sup>2</sup> ]	Deviația standard [%]
	20.11	10.51	8,172	0,737

Atât în cazul probelor crestate, cât și în cazul celor necrestate, se poate identifica că creșterea valorilor rezistenței maxime la impact este invers proporțională cu creșterea fracției volumice a fibrei de sticlă. Altfel spus, valorile maxime s-au obținut în cazul materialului naranțat, în timp ce cele minime sunt identificate în cazul Makrolonului 8035, ranforsat cu 30% fibră de sticlă. De aici se poate trage concluzia că în cazul aplicațiilor supuse la condiții severe de impact și de șoc, comportamentul dinamic cel mai potrivit se obține în cazul folosirii unui material cu o fracție volumică minimă de fibră de sticlă sau chiar folosind un material naranțat.

Studiul sensibilității creșterii, considerată ca una dintre cele mai mari probleme asociate cu materialele de tip policarbonat [41], și comparația claselor de policarbonat alese, privind proprietățile lor la impactul de tip Charpy, este oarecum un potențial neexploatat în caracterizarea mecanică și procesul de selecție a materialelor optime în cazul acestor materiale polimerice – similar cu comportamentul la rupere [72] și caracterizarea la impact a compozitelor ranforsate cu fibră de sticlă sau de carbon [73] – care, împreună cu celelalte investigații din planul experimental propus, este așteptată să câștige popularitate în departamentele de proiectare mecanică.

## 4.2 Încercări de oboseală prin tracțiune a materialelor pe bază de policarbonat

### 4.2.1 Introducere

Oboseala, prin definiție, înseamnă modificarea în timp a proprietăților oricărui material care se află sub acțiunea unor solicitări variabile, reducând semnificativ durata de viață a unui component și ducând la defecte precum ruperea materialului, la niveluri de tensiune mult mai joase decât rezistența la rupere sau chiar limita de curgere [74].

Oboseala reprezintă un proces de degradare care se caracterizează prin faptul că deformațiile plastice, având contribuția majoră în reducerea rezistenței materialului, se localizează în jurul unor defecte din material sau la vârfurile unor fisuri inițiate, iar măsurarea acestora devine aproape imposibilă.

Producătorii de piese mecanice sunt interesați de rezistența materialelor la oboseală, mai ales când durata de viață este dificilă de examinat sau când din cauza oboselii materialului se pot întâmpla cedări nedorite. De-a lungul timpului, dar inclusiv în zilele de astăzi, cedarea unei piese mecanice în timpul utilizării datorită oboselii materialului de bază constituie cel mai dominant factor pentru pierderile financiare produse. În cazul ruperii prin oboseală, piesele sau structurile de rezistență funcționând de cele mai multe ori normal până când fisura inițiată atinge un prag critic și astfel, prin suprasolicitarea secțiunii transversale a materialului, declanșează ruperea acestuia.

Pentru a preveni cedările timpurii ale materialelor supuse solicitărilor variabile încercările la oboseală au fost dezvoltate, cu menirea să măsoare rezistența materialelor la defecte, reducerea rigidității și a rezistenței maxime, respectiv determinarea numărului total de cicluri de încărcare până la ruperea completă sub acțiunea solicitărilor variabile în timp.

Cu alte cuvinte, prin oboseală se măsoară durata de viață sau durabilitatea unei piese sau structuri mecanice, în termeni de numărul ciclurilor de încărcare pe care o piesă le poate suporta înaintea cedării.

Durabilitatea este egală cu intervalul de timp corespunzător inițierii fisurii, respectiv propagării acesteia.

Prima fază este cea de inițiere sau de formare a fisurii, în care defectul este în general atribuit impurităților, golurilor din material, sau în cazul compozitelor la interfața dintre matrice și fibră, respectiv la capetele fibrelor de ranforsare, care reprezintă concentratori de tensiune și care pot conduce local la depășirea limitelor admisibile de rezistență ale materialului. Aceste observații au fost analizate de numeroși autori precum [75], [76], [77].

În timpul solicitărilor repetate, chiar și după un număr redus de cicluri, pornind de la aceste goluri din material, se pot genera și forma crăpături, în zona

#### 4.2 – Încercări de oboseală prin tracțiune a mater. pe bază de policarbonat | 79

secțiunii cea mai solicitată și la niveluri ale tensiunilor inferioare limitei de curgere a materialului.

Dacă nu există defecte în volumul materialului, inițierea fisurii de oboseală de regulă apare pe suprafața probei testate și de cele mai multe ori este asociată cu un concentrator de tensiune superficial, precum un unghi ascuțit sau diferite discontinuități. Din această cauză, în scopul reducerii riscurilor, finisarea suprafețelor devine foarte importantă.

A doua fază din procesul de degradare este caracterizată de o creștere rapidă a defectului din cauza unirii microfisurilor, rezultând astfel fisuri mari, care la urmă vor duce la ruperea fragilă a secțiunii materialului [78], [79].

Pentru majoritatea solidelor amorfe și pentru încercările de oboseală în domeniul durabilităților mari, intervalul de timp al primei faze este mereu și cu ordini de magnitudine mai mare decât faza secundă [76], [78]. În plus, prima fază este strict dependentă de istoricul magnitudinii încărcărilor deoarece inițierea fisurii necesită o tensiune mai mare decât propagarea acesteia.

Durabilitatea unei piese aflate sub influența următoarelor mecanisme de oboseală poate fi clasată de la mic la mare după cum urmează: șoc termic, domeniul durabilităților mici de oboseală cu temperaturi mari, domeniul durabilităților mici de oboseală cu temperaturi mici, respectiv domeniul durabilităților mari de oboseală. În evaluarea riscului de avariere prin oboseală se poate afirma că piesa este considerată sigură pentru un număr infinit de cicluri dacă nu prezintă defecte după un milion, sau în cazurile mai prudente, zece milioane de cicluri.

Încercările de oboseală pot fi executate în mai multe feluri. Cele mai comune metode folosite sunt cele de încărcări repetate de tracțiune – tracțiune, compresiune – compresiune, tensiune – compresiune sau alte combinații de încărcări ciclice.

Tensiunea sau forța de oboseală selectată înaintea începerii testului, este aplicată în mod repetat asupra epruvetei utilizând o varietate de forme de undă. Acestea pot fi sinusoidale, trapezoidale sau dreptunghiulare, forma cea mai des utilizată fiind cea sinusoidală.

Ciclurile de solicitare pot fi categorizate, de asemenea, în cicluri deterministe, atunci când tensiunea este exprimată în funcție de timp, respectiv cicluri aleatoare, când expresia matematică a tensiunii nu mai este definită printr-o expresie explicită.

În categoria ciclurilor deterministe intră și ciclul sinusoidal, la care variația în timp a tensiunii este dată de ecuația:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.1)$$

în care:

- $\sigma_m$  – este tensiunea medie a ciclului
- $\sigma_a$  – este amplitudinea ciclului
- $\omega$  – reprezintă pulsația
- $\varphi$  – denotă faza inițială în raport cu originea timpului

Conform ecuației de mai sus, un ciclu sinusoidal este caracterizat printr-o componentă statică și una variabilă.

În funcție de cele două componente ciclurile de solicitare pot fi clasificate după cum urmează:

- Cicluri simetrice -  $\sigma_m=0$ ,  $R=-1$
- Cicluri alternante -  $0 < \sigma_m < \sigma_a$ ,  $-1 < R < 0$
- Cicluri pulsante -  $\sigma_m = \sigma_a$ ,  $R=0$
- Cicluri oscilante (asimetrice) -  $\sigma_m < \sigma_a$ ,  $0 < R < 1$

introducând astfel conceptul de coeficient de asimetrie, notat cu  $R$ , reprezentând raportul dintre tensiunea minimă și tensiunea maximă utilizate în timpul încercărilor.

Încercările la oboseală pot fi împărțite în două categorii mari după numărul de cicluri și în funcție de amplitudinea tensiunilor aplicate.

Astfel putem diferenția:

- domeniul durabilităților mici, sau oboseala oligociclică, cu numere de cicluri cuprinse între  $10^3$  și  $10^4$  cicluri, unde jumătate din primul ciclu corespunde unei singure alternanțe ale încărcării la o tensiune egală cu rezistența la rupere a materialului
- domeniul durabilităților mari, sau oboseala la număr mare de cicluri, pentru numere de cicluri mai mari de  $10^4$

Comportamentul la oboseală al materialelor poate fi influențat de mulți factori, precum tensiunile ciclice, tensiunile remanente, proprietățile materialului, defectele interne, mărimea grăunților, temperatura, calitatea suprafețelor probei, parametri geometrici sau oxidarea și coroziunea în cazul materialelor metalice. Mai mult de atât, defectele introduse în probele testate în timpul fabricării sau prelucrării mecanice pot reduce, de asemenea, durata de viață a pieselor.

Frecvența ciclurilor de încărcare este în general aleasă ca fiind una joasă, în intervalul de 1-20 Hz, pentru a evita autoîncălzirea probelor, un lucru nedorit, deoarece poate avea un efect negativ asupra rezultatelor de oboseală [80].

În plus, durata de viață la oboseală a stucturilor este dependentă și de plasticitatea de la vârful fisurilor care controlează inițierea și propagarea fisurilor, obținând valori diferite ale durabilității în regiunile caracteristice domeniului durabilităților mici (low cycle), respectiv domeniului durabilităților mari (high cycle).

Principalii parametri care se definesc în cadrul unui test de oboseală sunt frecvența încărcării, tensiunea maximă, tensiunea minimă și coeficientul de



#### 4.2 – Încercări de oboseală prin tracțiune a mater. pe bază de policarbonat | 81

asimetrie (R). La finalul încercărilor de oboseală rezultatele aferente diferitelor niveluri de tensiune la care s-au făcut testele sunt reprezentate grafic într-o curbă denumită S-N care descrie numărul ciclurilor până la cedarea materialului. Limita de rezistență sau rezistența maximă la oboseală este un alt parametru important care se obține, referindu-se la tensiunea la care proba va ceda, cu alte cuvinte la care devine incapabil să reziste mai multe cicluri de încărcare.

Metoda de bază în scopul determinării rezistenței la oboseală a materialelor este curba de durabilitate (fatigue life, S-N). Această curbă este o reprezentare a tensiunii maxime de oboseală, notată cu S, în funcție de numărul ciclurilor de încărcare până la ruperea materialului, notat cu N. De regulă, curba este reprezentată grafic având tensiunile de oboseală pe ordonată și pe o scară liniară, pe când pe axa absciselor având ciclurile de încărcare până la cedare pe o scară logaritmică. Datele pentru curbă sunt generate prin testarea unor probe la diferite niveluri de tensiune de oboseală în vederea obținerii numărului de cicluri până la avariarea completă a materialului.

Exemple de materiale posedând combinații excelente de rezistență și de tenacitate sunt materialele polimerice amorfe, respectiv metalele și aliajele amorfe. Cu toate acestea, puține studii s-au efectuat în vederea investigației defectelor datorate oboselii în cazul solidelor amorfe, majoritatea cercetătorilor alegând să investigheze evoluția ruperilor prin metode micromecanice sub influența încărcărilor statice multiaxiale care pot cauza deformații mari dar nu și defecte caracteristice oboselii materialului.

Ruperea solidelor amorfe cauzate de oboseala materialului au la bază mecanisme guvernate de încărcări termice și/sau mecanice, așa cum este demonstrat în numeroase titluri din literatura de specialitate [81], [82].

Multe materiale amorfe manifestă comportamente distincte de dependență de timp, respectiv răspunsuri neliniare în timpul încărcării și descărcării, particularități care sunt observate într-un mod repetat și în cazul încărcărilor ciclice [83], [84], [85].

Studiul prezentat în acest capitol are scopul de a prezenta oboseala guvernată de mecanismele mecanice, fără influența temperaturilor, nici din mediul exterior și nici de încălzirea probelor datorită frecvențelor relativ joase de testare [82].

Multe investigații au fost făcute cu scopul determinării comportamentului la oboseală și pentru precizarea duratei de viață a componentelor metalice, însă puține s-au axat asupra caracteristicilor la oboseală ale materialelor termoplastice, în ciuda numeroaselor aplicații ale acestora în industrii diferite. Pentru a asigura rezistența pieselor din plastic, există o nevoie de a studia într-un mod sistematic proprietățile la oboseală ale acestor materiale plastice [86].

#### 4.2.2 Măsurători experimentale

Rezistența la oboseală a materialelor sub acțiunea solicitărilor variabile se determină prin metode experimentale și prin construirea unei diagrame de oboseală, denumită curba S-N sau diagrama Wöhler.

Încercarea constă din supunerea unor epruvete identice la cicluri de solicitare având același coeficient de asimetrie  $R$  al ciclului, însă cu valori ale încărcărilor care se micșorează de la o epruvetă la alta. În cazul primei epruvete încercarea se face la o amplitudine a ciclului  $\sigma_1$ , puțin mai mică decât limita de curgere statică a materialului, ruperea având loc după  $N_1$  cicluri. Pentru următoarea probă se scade amplitudinea la nivelul  $\sigma_2 < \sigma_1$  și astfel rezultă  $N_2 > N_1$ . Succesiv se continuă măsurătorile până când nivelul tensiunii din probă devine mai mică decât rezistența la oboseală, numărul ciclurilor atingând astfel ordinea milioaneilor. După terminarea măsurătorilor se reprezintă rezultatele și se obține astfel diagrama Wöhler.

Proprietățile cvasistatice, la temperatura ambiantă (22°C), ale celor trei clase de Makroloni supuse încercărilor la oboseală sunt prezentate în Tabelul 4.2.

Tabel 4.2. Proprietățile cvasistatice ale materialelor supuse încercărilor la oboseală

	Modulul de elasticitate [MPa]	Rezistența maximă [MPa]
Makrolon 2405	2400	65
Makrolon 9415	3800	45
Makrolon 8035	5100	59

Epruvetele folosite în cadrul testelor erau de același tip ca și cele supuse încercărilor statice prezentate în Capitolul 3 al tezei – probe de tracțiune, injectate direct în forma finală, având forma (dogbone) și dimensiunile conform standardului ISO 527-1.

Un număr de 13 probe au fost testate din fiecare tip de material în parte, la diferite niveluri de încărcare, toate testele făcându-se în aceleași condiții de laborator, având temperatura și umiditatea controlate.

Pentru studiul celor trei tipuri de Makrolon la încercarea dinamică de oboseală s-a folosit o mașină de tip Instron Electropuls E3000, cu o capacitate de 3 kN și cu o acționare electrică pe motor liniar, din dotarea laboratorului Institutului de Fizica Materialului din Brno, Cehia (IPM Brno), prezentată în Fig. 4.9.



Fig. 4.9. Instron Electropuls E300 folosit în cadrul încercărilor la oboseală.

Testele de oboseală au fost efectuate prin controlul forței (tensiunii), cu un coeficient de asimetrie de 0,1, o frecvență de 10 Hz și condiții constante de temperatură. Temperatura probei a fost monitorizată în timpul încercărilor pentru a evita efectul autoîncălzirii materialului, cu ajutorul unui termocuplu prins de suprafața probei (Fig. 4.10.a) și legat printr-un multimetru la programul de analiză al mașinii (Fig. 4.10.b). Conform măsurătorilor încălzirea cauzată pe suprafața probelor din cauza solicitărilor repetitive a fost ținută sub 1°C. Toate încercările au fost efectuate, în prima fază, prin creșterea încărcării la nivelul mediu (mean stress) în mai puțin de 5 [s], iar apoi prin variația ciclică a acesteia într-o formă sinusoidală între nivelurile maxime și minime.

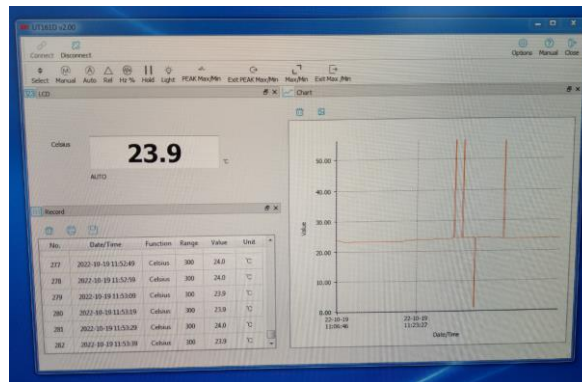


Fig. 4.10. Măsurarea temperaturii probei în timpul încercărilor la oboseală: a) termocuplul folosit; b) temperatura înregistrată.

Pentru a minimiza erorile, toate rezultatele arătate în acest studiu au fost obținute doar de la epruvetele care au cedat încercărilor dinamice la oboseală în regiunea porțiunii calibrate, restul rezultatelor obținute în afara acestei porțiuni, mai ales în dreptul prinderilor, fiind excluse.

## 4.2.3 Elaborarea curbelor de oboseală de tip Wöhler

În general curba de oboseală se reprezintă în coordonate dublu logaritmice, mai ales în cazul domeniului durabilităților mari, iar astfel se poate constata că aceasta devine o dreaptă care poate fi descrisă de o lege de putere (power law) de forma (4.2):

$$\sigma = \sigma_0 N^{-\frac{1}{k}} \quad (4.2)$$

ecuație în care:

- $\sigma$  – este amplitudinea tensiunii, [MPa]
- $N$  – este numărul ciclurilor până la cedarea materialului, [-]
- $\sigma_0$  și  $k$  – sunt parametri ce depind de material și care pot fi influențați de condițiile de mediu, condițiile de test și de tensiunea medie (*mean stress fraction*)

Uneori, parametrii de material se mai notează și cu literele A și B.

Rezultatele obținute în urma încercărilor la oboseală prin tracțiune, în termeni de amplitudine de tensiune, respectiv numărul de cicluri aferente tensiunilor, sunt sintetizate în Tabelul 4.3.

Tabel 4.3. Numărul de cicluri în funcție de tensiunile aplicate pentru materialele supuse încercărilor la oboseală

Makrolon 2405		Makrolon 9415		Makrolon 8035	
Amplitudine de tensiune [MPa]	Număr de cicluri [-]	Amplitudine de tensiune [MPa]	Număr de cicluri [-]	Amplitudine de tensiune [MPa]	Număr de cicluri [-]
20	7642	30	27485	38	32221
20	17132	30	41780	38	34930
20	17394	27	52660	35	59605
20	22338	27	58181	35	98364
18	21174	25	63658	30	111464
17	554710	25	90612	30	136704
16	1000000	20	118934	25	326276
15	1000000	20	179500	25	494340
15	1000000	18	259618	23	484313
		18	273158	23	1000000
		16	400417	21	1000000
		16	460835	21	1000000
		14	1000000	20	1000000
		14	1000000		

#### 4.2 – Încercări de oboseală prin tracțiune a mater. pe bază de policarbonat | 85

În urma obținerii valorilor din tabelul de mai sus s-au construit curbele Wöhler pentru cele trei clase de material investigate.

În Figura 4.11 sunt prezentate cele trei curbe de oboseală, împreună cu ecuațiile dreptelor obținute prin regresia liniară a punctelor, respectiv cu valorile coeficienților de determinare  $R^2$ .

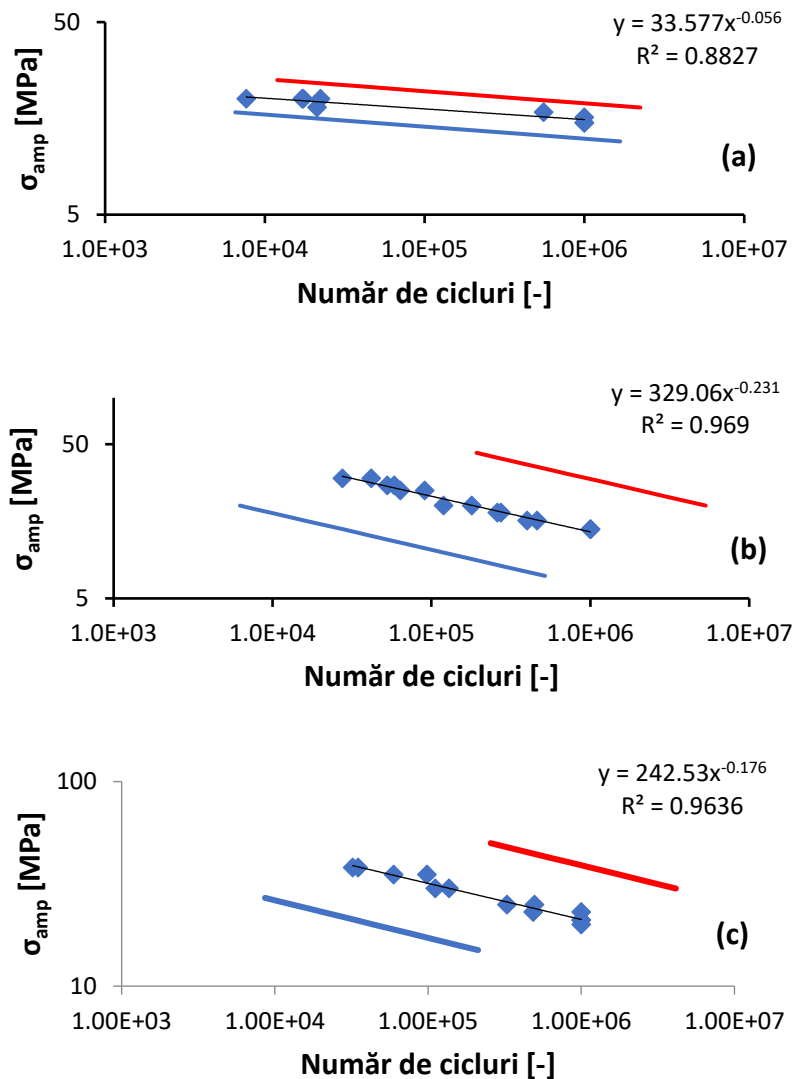


Fig. 4.11. Curbele de oboseală și expresiile dreptelor obținute prin regresie liniară: a) Makrolon 2405; b) Makrolon 9415; c) Makrolon 8035.

Dispersia valorilor obținute este relativ mică, fapt dovedit și de magnitudinea coeficienților de determinare, care tinde spre 0.9 – 1, în toate cazurile studiate.

Încercările de oboseală efectuate pentru clasele de material propuse s-au concentrat asupra domeniului durabilităților mari, drept urmare toate amplitudinile de tensiune aplicate au fost alese ca acestea să ducă la un număr de cicluri situând între  $10^4$  –  $10^6$ .

Deși unii autori ai unelor lucrări spun că domeniul durabilităților infinite este considerată să înceapă după  $10^7$  cicluri, numeroase studii au dovedit că, împreună cu alte marje de siguranță din procesul de proiectare al pieselor mecanice, se poate considera materialul termoplastice rezistent la încărcările ciclice inclusiv după un milion de cicluri.

Având în vedere că determinarea curbelor de oboseală și a rezistenței materialului la încărcările ciclice, repetitive, este un proces care implică eforturi foarte mari, atât din punct de vedere al timpului necesar, cât și din cel al resurselor cerute, numeroase investigații s-au făcut pentru obținerea unui model matematic, bazându-se pe relații empirice, care să descrie comportamentul și durata de viață a unui material. Majoritatea acestor modele are la bază comportamentul la nivel microscopic, și anume inițierea și propagarea unor fisuri ale materialului, fisură care crește într-un mod proporțional cu creșterea numărului de cicluri, și care poate fi determinată prin diferite legi din sfera mecanicii ruperii, precum legea lui Paris.

Cu toate că acest tip de modelare și determinare a durabilității materialului oferă rezultate cu acuratețe crescută, el totuși necesită o abordare mai detaliată și mai de lungă durată pentru determinarea unor parametri prin metode experimentale sau prin metode numerice, care în procesul accelerat al dezvoltării produselor nu este tot timpul fezabilă. Astfel, este mult mai eficientă apelarea la o metodă macro fenomenologică cu scopul modelării efectelor mecanismelor de oboseală asupra duratei de viață, decât folosirea unei abordări microscopice.

De-alungul anilor s-au făcut mai multe încercări pentru estimarea curbei de oboseală în cazul materialelor compozite ranforsate cu fibre scurte de sticlă sau de carbon.

Identificarea curbei master de oboseală (master S-N curve) depinde de măsura în care rezistența la oboseală va fi utilizată.

Una dintre cele mai uzuale abordări este normalizarea rezistenței la oboseală bazată pe rezistența maximă la tracțiune. Această abordare se bazează pe experimente care au demonstrat proporționalitatea ambelor proprietăți [20], [87], [88], [89]. Cu toate acestea, nu s-a găsit o argumentație clară asupra faptului că rezistența la oboseală trebuie să varieze în aceeași manieră ca și rezistența maximă la tracțiune, având în vedere că există evidențe clare care confirmă că mecanismele de rupere a propagării fisurilor, respectiv ruperea finală, sunt diferite pentru încercările la tracțiune și pentru cele de oboseală [90], [91]. Acest dezavantaj al metodei este parțial compensat printr-o corelare bună a rezistenței la oboseală cu rezistența la tracțiune, indiferent de temperatură [89].

Cu toate acestea metoda este considerată ca fiind una cu acuratețe scăzută având în vedere că nu poate lua în considerare efectele raportului de tensiune, iar astfel să identifice o curbă master S-N pentru un set de date de la teste de oboseală efectuate la rapoarte diferite de temperatură.

Alte metode, menite să compenseze dezavantajele date de metoda normalizării, se bazează pe scalarea curbei S-N în funcție de parametrul de creștere a fisurii de oboseală [92]. Această abordare conduce la rezultate acceptabile, însă necesită pe lângă o curbă de oboseală și acel parametru de creștere a fisurii, care se obține prin teste extensive și cu dificultate crescută.

Kawai et al. [90] a propus un raport modificat, adimensional al rezistenței la oboseală și a demonstrat că o curbă master de oboseală poate fi identificată pentru date de oboseală provenite de la rapoarte diferite de tensiuni în cazul compozitelor de tipul termosetelor ranforsate cu fibre unidirecționale. Alți cercetători precum Mortazavian și Fatemi [93], au studiat o tensiune echivalentă și au arătat că aceasta poate fi folosită pentru elaborarea unei curbe master de oboseală pentru date de oboseală provenite din încercări efectuate la diferite rapoarte de tensiuni, în cazul compozitelor termoplastice ranforsate cu fibre scurte de sticlă. Bourgogne et al. [94] au dus mai departe propunerea lui Kawai prin introducerea unui coeficient de sensibilitate a temperaturii, coeficient denumit și variabila de tip Arrhenius, care permite predicția comportamentului pseudo-vâscoplastic al termoplastului ranforsat studiat printr-un interval de temperatură. Prin acest model au simplificat procesul propus de determinare a unei curbe de oboseală la o anumită temperatură, bazată pe curba de oboseală de la temperatura ambiantă și pe valorile cvasistatice ale rezistenței maxime la tracțiune, atât la temperatura ambiantă, cât și la cea la care se dorește identificarea curbei de oboseală.

Metoda propusă de Bourgogne et al. a fost testată și în cazul celor trei clase de Makrolon.

În primul pas s-a calculat coeficientul de sensibilitate a temperaturii, notat cu  $\delta_p$ , utilizând relația 4.3:

$$\delta_p = \frac{T_1}{T_1 - T_2} [\ln(\sigma_{max}(T_2)) - \ln(\sigma_{max}(T_1))] \quad (4.3)$$

ecuație în care:

- $T_1$  - este temperatura ambiantă sau de referință, [°C]
- $T_2$  - reprezintă temperatura la care se face predicția comportamentului pseudo-vâscoplastic al materialului, [°C]
- $\sigma_{max}(T)$  - este tensiunea maximă cvasistatică, atât la temperatura de referință  $T_1$ , cât și la temperatura  $T_2$  la care se face predicția [MPa]

Cu coeficientul de sensibilitate calculat s-au determinat valorile tensiunilor corespunzătoare aceluiași număr de cicluri care au fost obținute cu valorile tensiunilor propuse în cadrul încercărilor de oboseală la temperatura ambiantă, prin utilizarea relației 4.4:

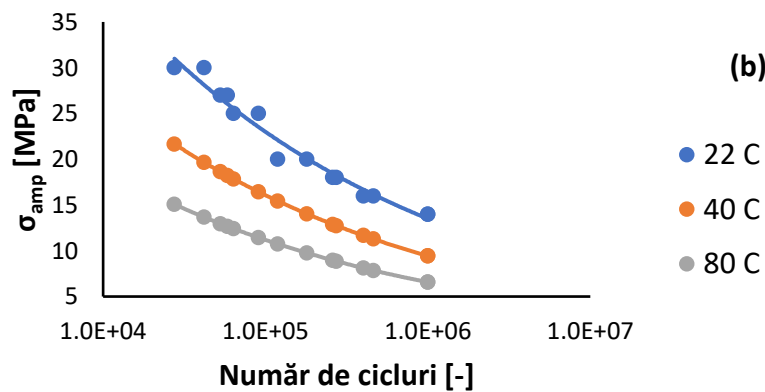
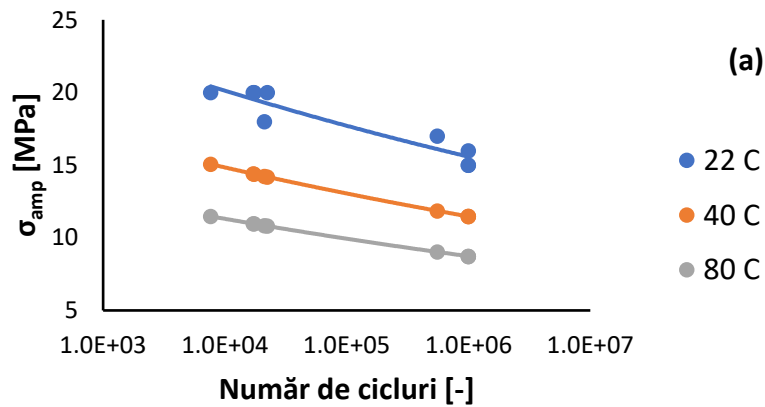
#### 88 | Cap. 4 – Caract. mecanică prin încercări dinamice a mater. pe bază de policarbonat

$$\sigma_{max} = A(T)(N_f)^B = Ae^{(\delta_p)(1-\frac{T_{eq}}{T_0})}(N_f)^B \quad (4.4)$$

în care:

- A și B - sunt parametri din ecuația lui Basquin, notate în ecuația 4.2 cu  $\sigma_0$  și k
- $\delta_p$  - coeficientul de sensibilitate
- $T_{eq}$  - este echivalentul lui  $T_2$  din ecuația 4.3
- $T_0$  - este echivalentul lui  $T_1$  din ecuația 4.3
- $N_f$  - reprezintă numărul ciclurilor determinat prin încercările de oboseală la temperatura ambiantă

Curbele S-N teoretice obținute prin metoda aplicată pentru cele trei tipuri de Makrolon, la 40°C și la 80°C, în comparație cu curba de oboseală de referință, determinată în cadrul încercărilor de laborator, sunt reprezentate în figura 4.12.





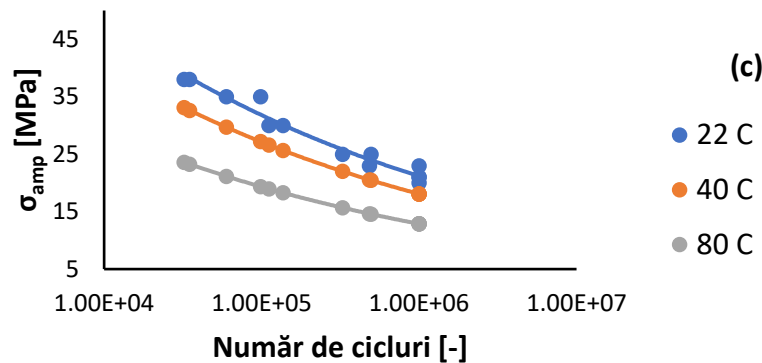


Fig. 4.12. Curbele teoretice de oboseală obținute la 40°C și la 80°C prin metoda lui Bourgoigne et al.: a) Makrolon 2405; b) Makrolon 9415; c) Makrolon 8035.

Deși mulți autori au investigat comportamentul la oboseală al compozitelor termoplastice, în momentul de față încă nu a fost elaborată o măsură universală a rezistenței la oboseală care să permită identificarea unei curbe master S-N pentru un compozit specific, pe toată plaja rapoartelor de tensiune și pentru orice orientare a fibrelor de ranforsare. Cea mai eficientă metodă pentru acest scop ar fi utilizarea unei diagrame CFL (constant fatigue life) [89], [95], cu toate că aceasta se folosește doar în evaluările efectului tensiunii medii asupra durabilității materialului. Diagrama parabolică lui Gerber, respectiv versiunile modificate ale acesteia pot fi folosite în cazul termoplasticele ranforsate cu fibre scurte încărcate în regim de tracțiune-tracțiune, adică în regiunea pozitivă a valorilor tensiunii medii. Însă diagrama Gerber nu s-a dovedit a fi potrivită în cazul încărcărilor ciclice din regimul tracțiune-compresiune sau compresiune-compresiune, regimuri care pot fi adesea regăsite în domeniile de utilizare ale materialelor compozite.

Cu alte cuvinte, o diagramă CFL completă pentru plaja întreagă a tensiunilor medii încă nu a fost identificată în cazul compozitelor termoplastice ranforsate cu fibre scurte.

Pentru aceste tipuri de materiale o metodă care să prezică într-un mod eficient durabilitatea trebuie să ia în calcul efectele temperaturii, ale umidității, respectiv cele ale rapoartelor tensiunilor aplicate.

### 4.3 Concluzii privind comportamentul materialelor pe bază de policarbonat la încercările dinamice

Acest capitol s-a concentrat asupra evaluării comportamentului la impact a celor trei clase de policarbonat, atât în cazul unor probe crestate cât și în cazul unora necrestate, cu scopul determinării avantajelor aduse de fibrele de sticlă asupra proprietăților de tenacitate dinamică la rupere ale acestor materiale ranforsate.

Atât pentru epruvetele crestate cât și pentru cele necrestate, în urma impactului, un comportament de rupere fragilă a fost observat, însă acest comportament este mult mai accentuat în cazul probelor crestate. Probele necrestate datorită plasticității materialului care precede ruperea, au absorbit niveluri de energii mult mai mari la impact.

Dincolo de diferențele dintre probele crestate și necrestate, s-a observat un delta semnificativ de mare, între capacitatea mare de absorbție a energiei de impact în cazul policarbonatului de bază (Makrolon 2405) față de materialele ranforsate. Energia absorbită de materialul neranforsat este cu un ordin de mărime mai mare decât energiile absorbite de materialele armate cu fibră de sticlă.

Creșterea valorilor rezistenței maxime la impact invers proporțională cu creșterea fracției volumice a fibrei de sticlă a fost remarcată pentru ambele tipuri de probe supuse încercărilor - crestate și necrestate. Bazat pe această remarcă, și pe observația anterioară, se poate trage concluzia că în cazul aplicațiilor care de-a lungul ciclului de viață vor fi supuse la condiții severe de impact și de șoc, este recomandată folosirea unui material cu o fracție volumică redusă de fibră de sticlă sau chiar folosirea unui material neranforsat pentru a asigura condițiile optime de rezistență și tenacitate.

În cazul încercărilor de oboseală pentru clasele de material propuse, studiul s-a concentrat asupra domeniului durabilităților mari, reprezentativ pentru piesele de automobile care se supun unor cicluri repetitive și variabile pe parcursul duratei de viață.

Acest studiu a fost propus în contextul în care numeroase investigații s-au făcut cu scopul determinării comportamentului și a rezistenței la oboseală a componentelor metalice, însă doar un număr redus s-a axat asupra caracteristicilor la oboseală a materialelor termoplastice, chiar dacă ele se regăsesc într-un număr foarte mare de aplicații în industrii diferite.

În urma măsurătorilor rezultate consistente, cu o dispersie redusă a datelor, au fost obținute, care mai apoi au fost prelucrate și reprezentate sub forma unor curbe Wöhler.

Ca și în cazul încercărilor cvasistatice s-a observat o creștere a rigidității și a tenacității materialului (la impact tenacitatea maximă este la epruvetele nerarmate) cu creșterea procentajului de fibră din material.

Încercările de oboseală efectuate au reprezentat punctul de plecare pentru studiul durabilităților celor trei clase de Makrolon, având în vedere, că print-o documentare mai detaliată a datelor și a cunoștințelor disponibile în momentul de față, o metodă, sau o diagramă CFL, care să prezică într-o manieră eficientă, cu o acuratețe crescută, durabilitate materialelor termoplastice, luând în calcul multiple efecte externe, precum temperatură și umiditate, respectiv mai mulți coeficienți de asimetrie (R), este doar tratată în cazuri particulare, astfel reprezentând o direcție care poate oferi multe posibilități pentru mediul academic și pentru cel industrial.

## **Capitolul 5 - Modele de material pentru analize utilizând metoda elementelor finite**

### **5.1 Introducere**

Modelarea materialelor în vederea folosirii acestora în diferite analize numerice depinde în cea mai mare măsură de obiectivul investigației.

În procesul dezvoltării produselor timpul alocat pentru elaborarea unor analize cu elemente finite de obicei este scurt, însă acesta nu este neapărat în detrimentul rezultatelor. Există numeroase cazuri când o analiză rapidă poate aduce beneficii majore în proiectarea unei piese sau a unui produs mecanic, fără să fie nevoie de un timp îndelungat pentru calibrarea unor modele complexe, care să includă diferite tipuri de neliniarități, orientarea fibrelor de ranforsare, parametri de mecanica ruperii etc. Aceste analize sunt caracteristice fazelor premature ale proiectării unor produse, când constrângerile specifice proiectării, fabricării, asamblării, sunt mult mai puține ca număr, permițând astfel analiza a unui număr mare de concepte, respectiv o serie de optimizări de design, implicând un efort redus de timp și de resurse.

Pe de altă parte, în anumite cazuri analizele rapide, efectuate în domeniul liniar elastic își arată slăbiciunile când piesa proiectată atinge o fază mai matură de design și necesită argumente clare și bine justificate în privința luării unei decizii cu un impact major asupra unui volum mare de piese. În astfel de cazuri inginerul de simulări trebuie să gândească bine structura analizei pe care urmează să o efectueze, și să cântărească informațiile necesare, respectiv tipul acestora, pentru a răspunde la întrebările proiectanților. Aceste aspecte, bineînțeles, sunt foarte dependente de nivelul de cunoștințe și de experiența inginerului simulant.

Acuratețea rezultatelor unei analize numerice depinde de intrările setate în faza de preprocesare a simulării, iar șansele ca o analiză să fie setată greșit sunt foarte mari cu toate că pot exista un număr mare de date menite să crească semnificativ nivelul de credibilitate al rezultatelor obținute, cu alte cuvinte, să reproducă cât mai exact fenomenele fizice din realitate, dacă aceste date sunt considerate greșit în definirea modelelor de materiale sau în definirea condițiilor la limită. Modelul de material trebuie să fie ales în funcție de materialul piesei de analizat (polimer, elastomer, metal etc.), respectiv de tipul încărcării și a nivelului de deformații produs de acel tip de încărcare.

## 5.2 Modele de material neliniare elasto-plastice

Așa cum s-a menționat în subcapitolul *Introducere* modelul de material ales în vederea unei investigații prin metoda elementelor finite trebuie să ia în calcul natura materialului care se analizează, scopul investigației, respectiv extinderea acesteia – prin scop și extindere a se înțelege limita admisibilă și deformațiile corespunzătoare, fie ea cea de curgere, dacă deformațiile permanente nu sunt permise, cea de rupere, dacă plasticitatea materialului este acceptată pentru diferite considerente sau cea de oboseală, când materialul se supune unor număr mari de cicluri repetitive, cu amplitudini mici ale deformațiilor.

În principiu se pot defini trei categorii majore de încărcări mecanice pentru care se caută cele mai potrivite modele de material, cu scopul prezicerii anumitor defecte și minimizării riscurilor acestora înainte trimiterii în execuție a pieselor proiectate și validarea lor experimentală.

Aceste trei categorii sunt următoarele:

- 1) *Încărcări quasistatice* – corespunzătoare proceselor de asamblare ale pieselor dintr-un ansamblu, în general caracterizate de neacceptarea deformațiilor permanente ale pieselor individuale.
- 2) *Încărcări dinamice de vibrații* – corespunzătoare atât proceselor greșite de asamblare și de manipulare, cum ar fi scăparea pe jos sau lovirea unei piese în timpul asamblării, cât și vibrațiilor caracteristice funcționării autovehiculelor rutiere, cum ar fi vibrațiile armonice provenite de la motorul acestuia, respectiv vibrațiile aleatoare provenite de la rularea acestuia pe diferite condiții de drum; similar încărcărilor quasistatice sunt caracterizate de deformații mici, în domeniul elastic, respectând limitele admisibile la oboseala materialelor.
- 3) *Încărcări dinamice de impact* – corespunzătoare accidentelor rutiere, când integritatea pieselor devine mai puțin importantă, în schimb se pune accent pe capacitatea materialelor de-a absorbe energiile de impact, chiar și prin cedarea acestora.

Categoria încărcărilor dinamice este caracterizată prin folosirea unor modele de material liniar elastice, datorită naturii analizelor de vibrații dar și a deformațiilor permise care nu au voie să depășească un anumit procentaj considerat foarte mic. Drept urmare, categoriile de încărcări care permit utilizarea unor modele de material caracterizate de neliniarități sunt categoriile încărcărilor quasistatice și a celor dinamice de impact.

Deși categoria încărcărilor quasistatice, în majoritatea cazurilor, limitează deformațiile materialelor în domeniul elastic, există anumite cazuri de excepție, precum unele procese de asamblare unde deformațiile permanente joacă un rol foarte important, astfel făcând necesară găsirea unor modele matematice care să descrie comportamentul materialului inclusiv după depășirea limitei de elasticitate, fără a depăși însă limita de rupere.

### 5.2.1 Simularea testelor statice

Pentru a găsi cele mai potrivite modele matematice care descriu comportamentul celor trei grade de policarbonat alese studiului, categoria încărcărilor quasistatice a fost împărțită în două părți: prima parte concentrându-se la găsirea unui model de material care să redea comportamentul elastoplastic al termoplasticelelor, până la începutul fenomenului de gătuire, respectiv a doua parte care se focusează la găsirea unui model vâscoplastic potrivit să reproducă atât răspunsul materialelor după începerea gătuirii acestora dar, în același timp, care să fie capabil să țină cont și de variația vitezelor de încărcare sau de încărcările ciclice.

În cazul primei părți modelul de material ales a fost cel de ecruisare izotropică multiliniară (multilinear isotropic hardening), model caracteristic pentru majoritatea programelor de analiză cu elemente finite, precum și pentru ANSYS Workbench.

Acest model constă din perechile de date tensiune reală în funcție de deformația specifică plastică, și însoțește, bineînțeles, modelul de material liniar elastic, cuprinzând modulul de elasticitate al materialului și coeficientul de contracție transversală (coeficientul lui Poisson).

Perechile de date tensiune reală – deformație specifică plastică au fost obținute din datele de forță – deplasare, măsurate cu extensometrul în timpul încercărilor de tracțiune, prezentate în capitolul 3 al tezei. Din aceste date, cu ajutorul relațiilor matematice 5.1 și 5.2 s-au extras datele de tensiune reală și cele de deformație specifică reală, asumând ipoteza incompresibilității materialului, prin care tensiunea Kirchhoff devine identică cu tensiunea Cauchy.

$$\sigma = s(1 + e) \quad (5.1)$$

în care:

- $\sigma$  este tensiunea reală
- $s$  este tensiunea nominală
- $e$  este deformația specifică nominală.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (5.2)$$

unde:

- $\varepsilon$  este deformația specifică reală
- $e$  este deformația specifică nominală.

Pentru determinarea curbei de ecruisare, din curba de tensiune reală – deformație specifică reală, a fost aplicată relația de descompunere a deformației specifice 5.3.

$$\varepsilon^t = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (5.3)$$

în care:

- $\varepsilon^t$  este deformația specifică totală
- $\varepsilon^e$  este deformația specifică elastică
- $\varepsilon^p$  este deformația specifică plastică.

Primul punct de curgere pentru fiecare material a fost obținut prin identificarea primei perechi de tensiune – deformație specifică care avea abatere de la răspunsul liniar elastic. Ulterior, valorile tensiune reală de curgere – deformația specifică plastică au fost determinate prin trasarea unor linii paralele cu răspunsul liniar elastic și înregistrarea punctelor de intersecție cu curba tensiune – deformație specifică.

Curbele de ecrusare obținute pentru fiecare material în parte sunt reprezentate în Fig. 5.1.

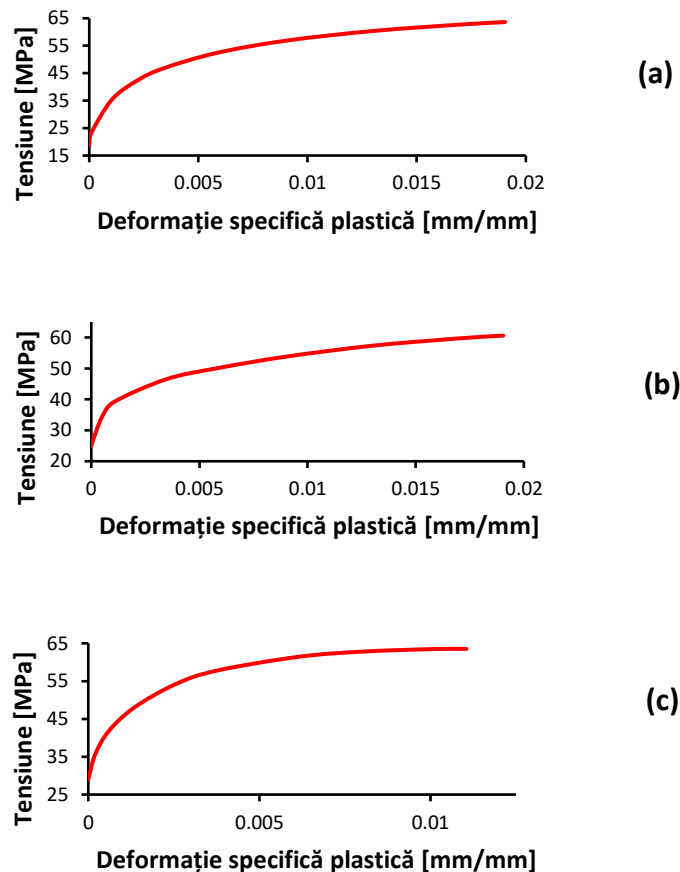


Fig. 5.1. Curbe tensiune reală – deformație specifică de plasticitate reprezentând modelul de ecrusare izotropică multiliniară pentru: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

## 5.2 – Modele de material neliniare elasto-plastice | 95

După definirea modelului de material în modulul Engineering Data al programului ANSYS Workbench, s-a trecut la discretizarea modelului geometric, respectiv la definirea condițiilor la limită.

Modelul geometric ales era epruveta de tracțiune (dogbone), având dimensiunile specificate în standardul de încercare la tracțiune a materialelor termoplastice [63].

Discretizarea s-a realizat utilizând elemente hexaedrice de mărime 2 [mm] [Fig. 5.2.a]. Condițiile la limită constau din fixarea capătului de jos al epruvetei și din aplicarea unei forțe pe capătul celălalt al probei [Fig. 5.2.b].

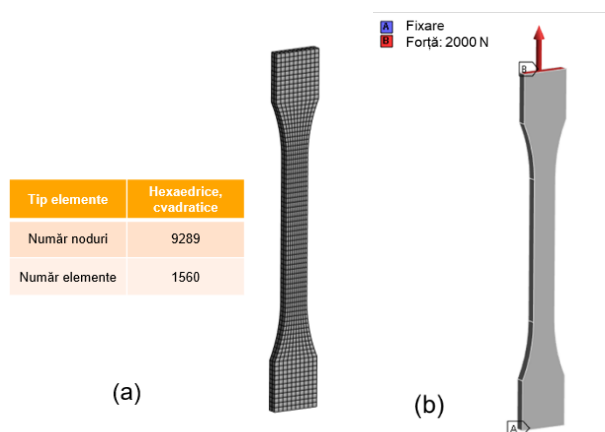


Fig. 5.2. Discretizarea modelului geometric (a) și condițiile la limită definite (b).

Rezultatele analizelor numerice suprapuse măsurărilor obținute în testele experimentale pentru toate cele trei grade de Makrolon sunt reprezentate în Fig. (5.3).

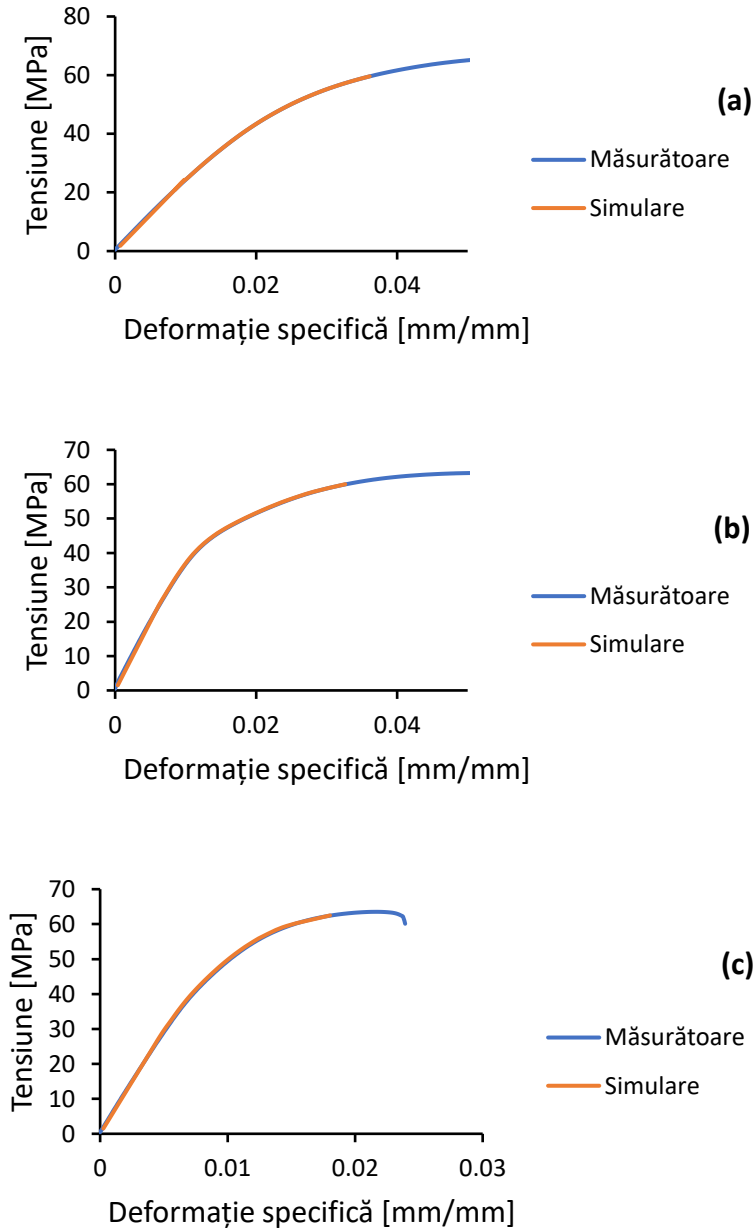


Fig. 5.3. Curbe suprapuse de tensiune – deformație specifică reprezentând măsurătorile experimentale și rezultatele numerice pentru: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.



După cum se poate observa modelul multiliniar ales descrie perfect comportamentul elastoplastic al tuturor celor trei materiale la tracțiune. Cu alte cuvinte, pentru cazurile în care se urmărește comportamentul materialului până la atingerea rezistenței maxime sau până la începutul fenomenului de gătuire, modelul de ecruisare izotropică multiliniară este modelul de material cel mai potrivit.

Necesită însă puțină atenție folosirea acestui tip de model de material, deoarece dacă în timpul conversiei datelor de tensiune reală – deformație specifică reală în perechi de tensiune reală – deformație specifică de plasticitate limita de curgere nu este corect identificată, aceasta va influența toate rezultatele ce țin de plasticitate (de exemplu Equivalent plastic strain), urmând ca cel care nu cunoaște particularitățile modelului va interpreta greșit rezultatele și astfel se poate ajunge la supradimensionarea unor piese. Acest dezavantaj al modelului de material este datorat comportamentului neliniar elastic al materialelor termoplastice și nu al modelului matematic în sine.

În cazul celei de-a doua parte a încărcărilor quasistatice, dar acoperind în același timp și o parte a încărcărilor dinamice de impact, s-a ales ca model de material ANSYS Three Network Model, sau prescurtat ANSYS TNM.

Acest model de material face parte din categoria modelelor neliniare, vâscoplastice avansate, special calibrate pentru materialele termoplastice, având ca avantaj principal capacitatea de-a considera dependența materialului termoplastic atât de viteza de încărcare, cât și de variația temperaturii. În plus, el acoperă atât cazul deformațiilor mici cât și cazul deformațiilor mari, prin împărțirea curbei caracteristice în trei domenii diferite, controlând fiecare de câte un mecanism de deformare diferit.

Acest model de material a fost dezvoltat de [96] cu scopul de-a genera un model de material termomecanic, având o acuratețe și eficiență de calcul crescută pentru materialele termoplastice.

Necesitatea unui model de material vâscoplastic care să poată descrie comportamentul policarbonatului nearmat de după rezistența maximă este esențială, deoarece o gătuire semnificativă a fost observată în timpul încercărilor experimentale, la mai multe viteze de încărcare, conform imaginilor prezentate în capitolul 3 al tezei.

Pentru calibrarea unui astfel de model de material ANSYS TNM, pentru datele experimentale determinate în cadrul încercărilor de tracțiune, s-a folosit programul comercial MCalibration.

Acest program include un număr foarte mare de modele de material pentru diferite categorii de materiale și solve, precum ANSYS, ABAQUS, NASTRAN etc., și are un solver intern de o performanță și eficiență foarte crescută pentru calculele de optimizare, prin care se calibrează parametrii specifici fiecărui model de material în parte. Acești parametri, în urma calibrărilor, pot fi direct exportati în formatele specifice programelor de elemente finite.

Pentru analiza numerică prezentată în acest capitol doar dependența de viteza de încărcare a fost considerată, așadar, parametri ce țin de variația temperaturii au fost considerați având valoarea zero.

Tabelul 5.1 sintetizează toți parametri caracteristici modelului ANSYS TNM, calibrați cu scopul replicării comportamentelor policarbonatelor testate, când acestea se solicită la încărcarea cvasistatică de tracțiune.

Acești parametri caracteristici s-au obținut prin aplicarea iterativă, cu evaluarea unor funcții într-un număr de ordinul miilor, a mai multor metode de optimizare specifice programului MCalibration, cum ar fi metoda Nelder-Mead Simplex, metoda de căutare Levenberg-Marquardt, metoda de căutare NEWUOA sau algoritmul Covariance Matrix Adaption Evolution Strategy (CMA-ES).

Tabel 5.1. Parametrii caracteristici modelului ANSYS TNM și valorile lor calibrate

Simbol	Valoare	Descriere
$\mu_A$	224,618	Modulul de forfecare al rețelei A
$\hat{t}_A$	25,9952	Rezistența la curgere a rețelei A
$m_A$	58,0879	Exponențialul tensiunii al rețelei A
$\mu_{Bi}$	617,215	Modulul de forfecare inițial al rețelei B
$\mu_{Bf}$	49,4602	Modulul de forfecare final al rețelei B
$\beta$	26,1441	Rata de evoluție a $\mu_B$
$\hat{t}_B$	32,0792	Rezistența la curgere a rețelei B
$m_B$	41,1627	Exponențialul tensiunii al rețelei B
$\mu_C$	0,0028707	Modulul de forfecare al rețelei C
$q$	0	Contribuția relativă a I2
$a$	0	Dependența curgerii de presiune
$n$	0	Exponențialul tensiunii
$\lambda_L$	33,7122	Întinderea de blocare (locking stretch)
$\kappa$	1310,38	Modulul vrac (bulk modulus)
$\hat{\theta}$	0	Factor de temperatură
$\theta_0$	293	Temperatura de referință a dilatării termice

Fig. 5.4 prezintă comparația între datele experimentale și predicțiile modelului de material calibrat în termeni de curbe caracteristice pentru toate cele trei clase de Makrolon.

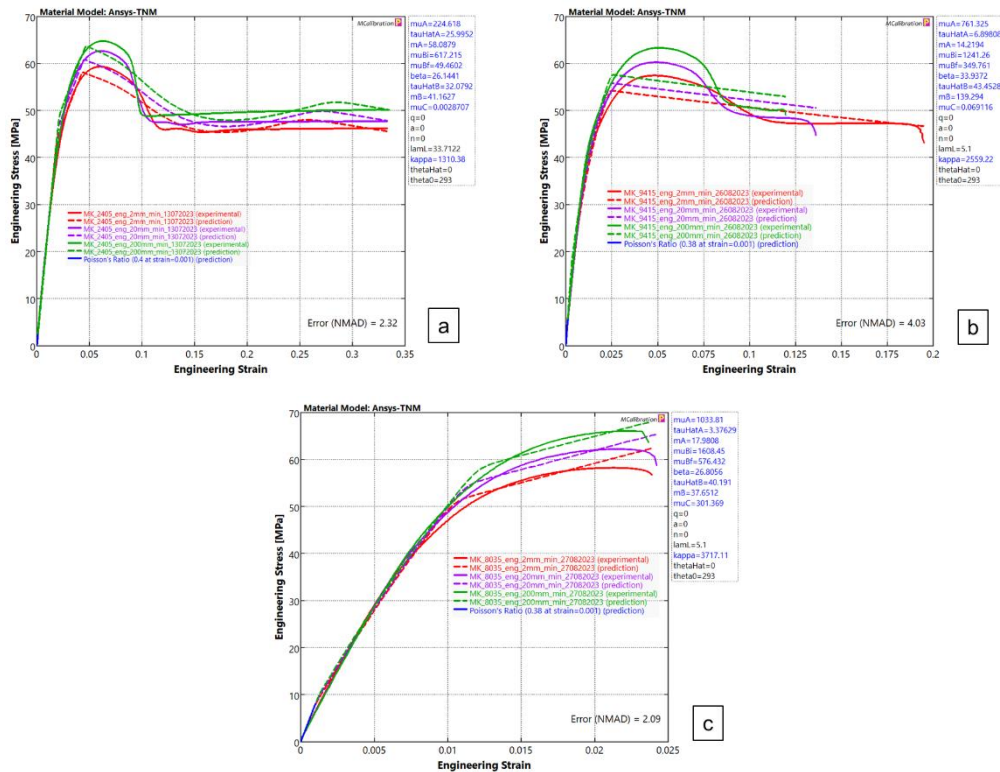


Fig. 5.4. Comparație între datele experimentale și predicțiile modelului de material ANSYS TNM pentru: a) Makrolon 2405, b) Makrolon 9415 și c) Makrolon 8035.

După cum se poate observa din curbele caracteristice comparate, în cazul Makrolonului 2405 și al lui Makrolon 9415, modelul matematic propus are puțină deviere față de curbele experimentale, în privința punctelor maxime de pe curbă, corespunzând limitei de curgere, pentru toate cele trei viteze de încărcare (2 mm/min, 20 mm/min, 200 mm/min).

Panta de coborâre este și ea diferită între datele reale și cele calibrate, observând o scădere mai bruscă a valorilor de tensiune, din momentul în care materialul începe să curgă, în cazul măsurătorilor experimentale față de modelul matematic.

De la deformația specifică de 15% până la limita de rupere - sau până la atingerea limitei impuse în cazul probelor nerupte - se observă o oarecare stabilizare a valorilor determinate de modelul matematic, față de perechile de date măsurate, mai accentuat în cazul materialului narmat decât pentru cel cu 10% fibră de sticlă.

Pentru Makrolon 8035 potrivirea curbelor este aproape perfectă, cu mențiunea că modelul de material calibrat duce la valori ale tensiunilor puțin mai mari, corespunzătoare deformațiilor maxime, decât cele observate în datele experimentale.

În ciuda diferențelor mai sus menționate, marja de eroare între predicții și măsurători este în intervalul 2,09 – 4,03%, ceea ce se consideră o potrivire destul de bună în cazul unor calibrări de materiale.

Cu scopul validării modelului de material obținut, pentru Makrolon 2405, a fost setată o analiză numerică bazată pe aceleași condiții la limită ca și analiza prezentată pentru modelul de ecrusare izotropică multilineară, mai puțin încărcarea aplicată, aceasta fiind o deplasare impusă pe capătul liber al epruvetei.

Forma deformată a epruvetei obținută în urma aplicării deplasării impuse este prezentată în Fig. 5.5.a. Conform acesteia se poate observa cum modelul de material a permis replicarea fenomenului de gâtuire a porțiunii calibrate a epruvetei.

De asemenea, modelul de material a reușit să descrie, cu o acuratețe destul de ridicată, și zona în care se va produce ruperea materialului, după extinderea gâtuirii pe o porțiune aproape egală cu regiunea inițială calibrată a probei (Fig. 5.5.b).

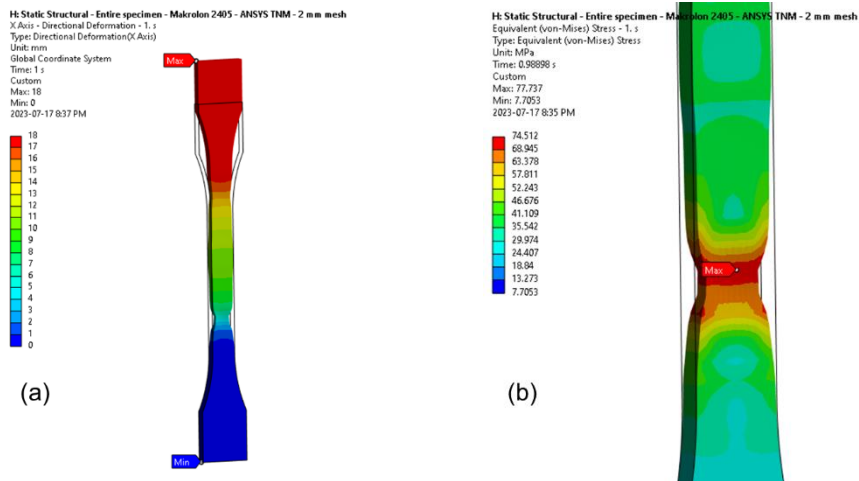


Fig. 5.5. Predicțiile modelului de material ANSYS TNM pentru Makrolon 2405: (a) gâtuirea materialului; (b) zona de rupere a materialului.

Rezultatele analizei numerice efectuate folosind modelul de material ANSYS TNM, în termeni de forță – deplasare, sunt reprezentate în Fig. 5.6., în comparație cu curbele forță – deplasare determinate în cadrul măsurătorilor.

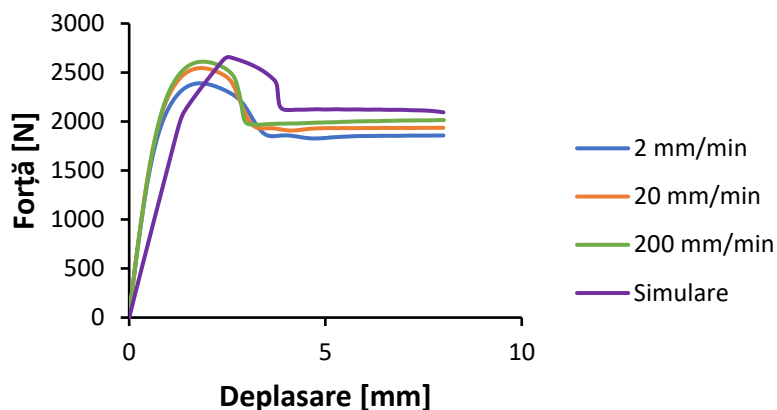


Fig. 5.6. Comparație între datele experimentale și rezultatele analizei numerice folosind modelul de material ANSYS TNM pentru Makrolon 2405.

Se poate observa o translație ușoară a curbei față de datele experimentale, în termeni de deplasare, în schimb analizând valorile forțelor acestea sunt foarte apropiate de valorile măsurate.

### 5.2.2 Simularea testelor dinamice

Încărcările dinamice de impact, conform definiției inițiale, corespund mai ales situațiilor de impact, de accident, în care pot fi implicate piesele de plastic, necesitând cunoașterea comportării mecanice a acestora în astfel de situații, cu scopul proiectării unor produse robuste, dar sigure în același timp.

Pentru replicarea încercărilor de impact de tip Charpy, descrise în capitolul 4 al tezei de doctorat, modelarea numerică a măsurătorilor experimentale a fost făcută cu programul comercial de analize explicite LS-DYNA, aparținând suitei ANSYS.

Pentru a înțelege mai bine comportamentul materialului și pentru a asigura încrederea modelului de material, modele de tip multilinear isotropic hardening - similar încărcărilor cvasistatice - au fost setate și definite pentru modelele de element finit ale probelor necrestate. În plus față de datele izotropice, un criteriu de cedare bazat pe deformația specifică plastică (plastic strain failure) a fost definit pentru fiecare material, bazat pe valorile din literatura de specialitate, pentru modelarea răspunsului materialelor după apariția ruperii prin metoda eroziunii elementelor, într-un mod asemănător cu Hufenbach et al. [60].

Condițiile la contur au fost setate identic pentru toate materialele individuale. Vârful ciocanului a fost modelat conform cu dimensiunile furnizate de producător (Instron): unghiul la vârf de  $30^\circ$ , rază la vârf de  $2,06$  [mm], considerat ca un corp rigid, de oțel. Într-un mod asemănător, suportii de rezemare au fost modelați ca corpuri rigide, cu nodurile constrânse în toate direcțiile și având ca material asignat oțelul. Legat de încărcarea de impact, o condiție inițială de tip viteză a fost selectată, cu o viteză inițială de  $3,8$  [m/s], precum este menționat în specificațiile echipamentului, asignată ciocanului.

Discretizarea s-a realizat utilizând elemente hexaedrice solide cu 8 noduri (Hex8) pentru epruvetă, în combinație cu elemente solide tetraedrice și prismatice (Tet4 și Wed6) în cazul ciocanului și al suportilor, cu o mărime de element de  $1$  [mm] impusă tuturor componentelor (Fig. 5.7). Astfel a rezultat un model discretizat, tridimensional, cu un număr total de 32730 elemente și 15096 noduri.



Fig. 5.7. Model de elemente finite utilizat pentru simulări – mesh solid folosind elemente hexaedrice.

Ca și în cazul oricărei modelări a unui test experimental, și în cazul încercării la impact de tip Charpy primul pas este efectuarea unei comparații între curbele forță – deplasare aparținând testelor experimentale și analizelor numerice [97].

Diagrama forță – timp reprezentând rezultatele atât de la încercările fizice, cât și cele de la simulări, pentru proba necrestată din Makrolon 2405, se găsește în Fig. 5.8.

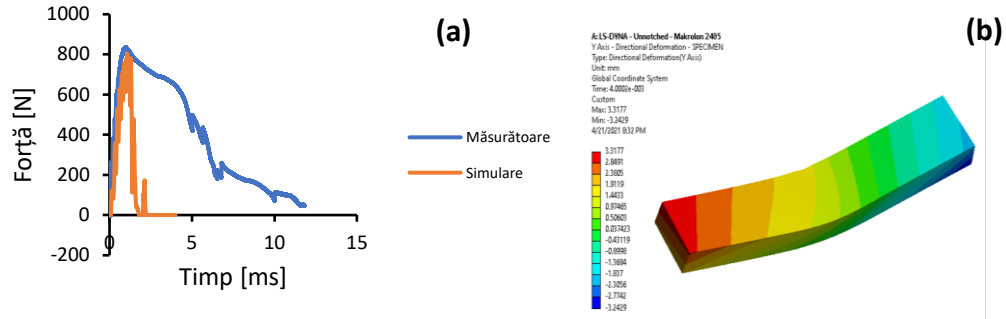


Fig. 5.8. Epruvetă necrestată de Makrolon 2405: (a) diagramă forță – timp; (b) Rezultate de deformație din analiza numerică.

După cum se poate observa din figura 5.8.a, potrivirea dintre cele două curbe este foarte bună în regiunea elastică, până la forța maximă, însă o discrepanță mare poate fi observată dincolo de punctul de inflexiune datorită naturii modelului de plasticitate selectat. Pe de altă parte, forma deformată a epruvetei obținută din analiza numerică (Fig. 5.8.b) seamănă foarte mult cu epruvetele deformați în urma impactului, conform celor arătate în capitolul 4 al tezei.

În cazul lui Makrolon 9415 se poate observa din nou o potrivire excelentă a curbelor obținute experimental și numeric (Fig. 5.9.a). Forța maximă detectată în simulare are o valoare aproape egală cu forța determinată în timpul măsurătorilor, iar deformațiile elastice urmăresc aceeași pantă. În plus, cu toate că simularea pune în evidență niște diferențe în regiunea deformațiilor plastice, acoperirea celor două curbe este mult mai bună decât în cazul lui Makrolon 2405. De asemenea, parametrul de cedare de material impus a descris destul de precis ruperea materialului datorată încărcării de impact (Fig. 5.9.b).

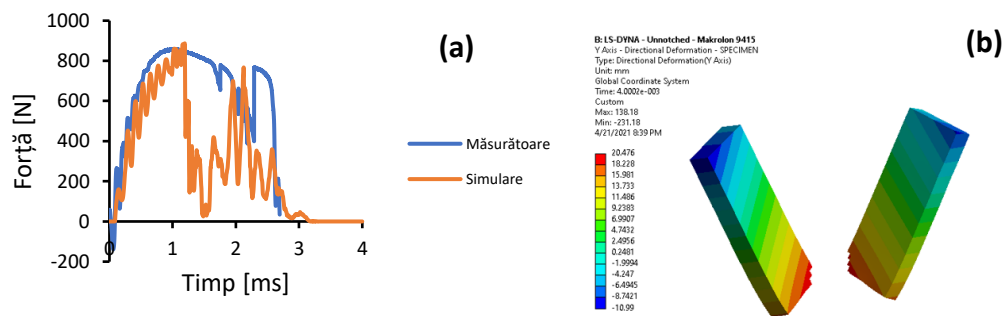


Fig. 5.9. Epruvetă necrestată de Makrolon 9415: (a) diagramă forță – timp; (b) Rezultate de deformație din analiza numerică.

Spre deosebire de primele două materiale, pentru Makrolon 8035 comparația între cele două diagrame nu a condus la rezultate foarte bune. În termeni de amplitudine de forță, diferențele sunt destul de mari, în ciuda faptului că o similitudine pentru formele curbelor în regiunea elastică poate fi observată (Fig. 5.10.a). Din punct de vedere al deformației și al ruperii, criteriul de eroziune al elementelor a prezis fractura epruvetei din cauza încărcării de impact (Fig. 5.10.b). O explicație posibilă la diferențele observate este legată de modelul de material folosit: modelul de isotropic hardening în cazul unui material cu o fracție de volum de 30% nu reflectă corect comportamentul la impact al materialului.

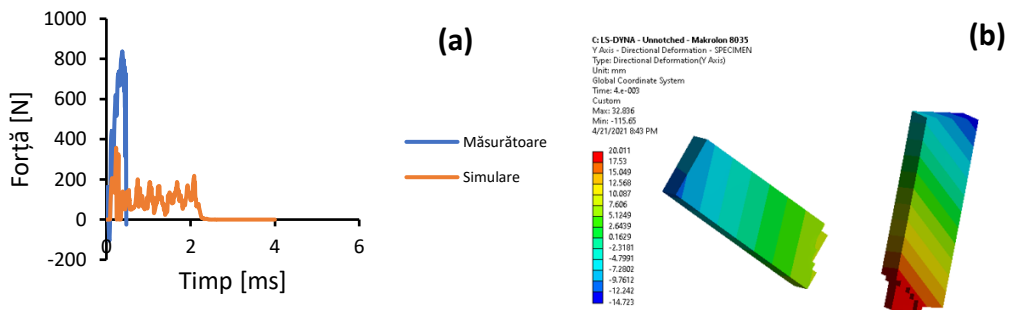


Fig. 5.10. Epruvetă necrestată de Makrolon 8035: (a) diagramă forță – timp; (b) Rezultate de deformație din analiza numerică.

Analizele numerice corespunzătoare probelor crestate au fost, într-un mod asemănător cu probele necrestate, setate în programul comercial de analize explicite LS-DYNA, din familia de produse ANSYS.

Condițiile la contur difereau de la prima analiză prin prezența crestăturii, zonă discretizată local cu elemente de dimensiuni reduse, respectiv prin reprezentarea suporturilor prin elemente de tip shell cu scopul simplificării modelului, dar păstrând considerația de componentă rigidă (Fig. 5.11).



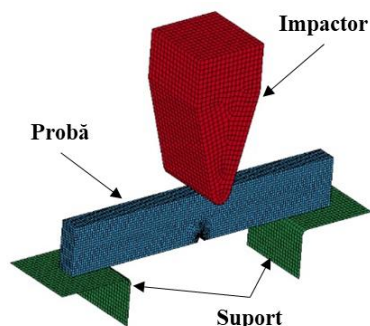


Fig. 5.11. Model de elemente finite utilizat în LS-DYNA.

De asemenea, având în vedere că încercările s-au efectuat folosind un ciocan de impact cu o energie potențială redusă – 5 [J] în loc de 25 [J] în vederea reducerii dispersiei datelor obținute cu privire la probele crestate – și viteza inițială impusă ciocanului în modelul de simulare a fost redusă la 2,9 [m/s].

În termeni de model de material utilizat pentru probele modelate numeric, s-a folosit modelul \*MAT\_089 (\*MAT\_PLASTICITY\_POLYMER), un model de material specific materialelor polimerice din librăria programului, model care permite definirea întregii curbe tensiune – deformație specifică, fără separarea perechilor de valori tensiune reală în funcție de deformație specifică plastică, specific modelului de ecruisare izotropică folosit în cazurile anterioare. Desigur, similar cu prima abordare, și acest card de material s-a bazat pe relațiile forță – deplasare, determinate la o varietate de viteze de încărcare de Krausz și alții [51].

Pentru a reproduce numeric ruperea observată în timpul măsurătorilor experimentale, parametri de tip \*MAT\_ADD\_DAMAGE\_DIEM au fost de asemenea definiți, bazați pe dependența de viteza de încărcare a limitei admisibile deformației specifice.

Graficele suprapuse de tipul viteză în funcție de timp, obținute de la măsurătorile experimentale, respectiv din analizele explicite, pentru Makrolon 2405 și Makrolon 8035 sunt reprezentate în figura 5.12.

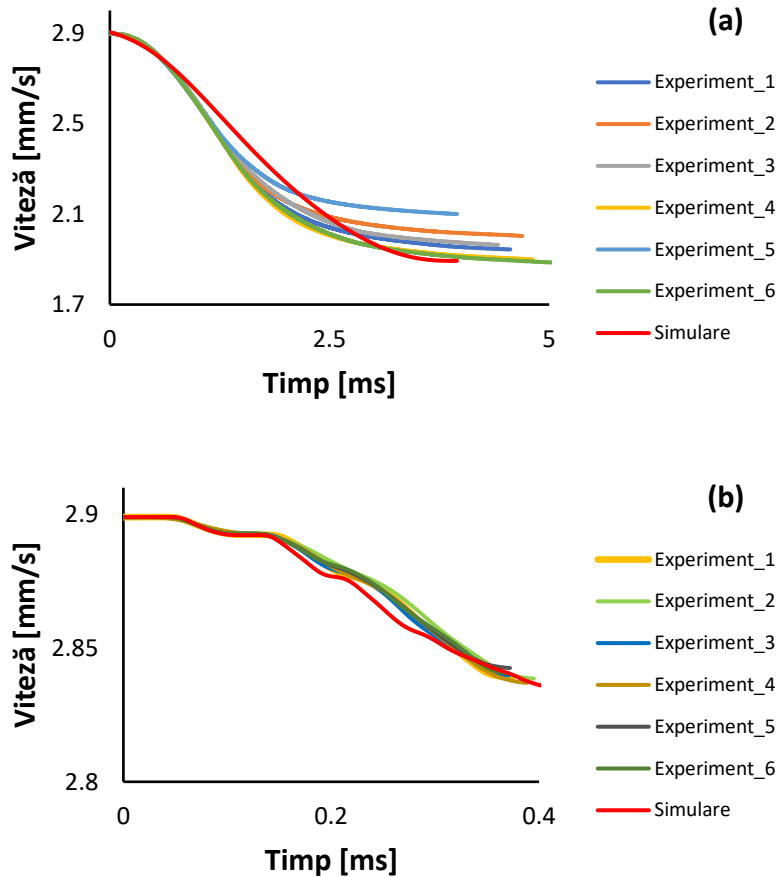


Fig. 5.12. Reprezentările grafice ale curbelor viteză – timp de la încercările de impact, respectiv din analizele numerice pentru: (a) MK2405; (b) MK8035.

În cazul policarbonatului neranfostat vitezele obținute din analizele explicite au o pantă de scădere mai puțin abruptă decât cea observată în cazul măsurătorilor experimentale. Deviația dintre datele simulate și cele experimentale este mult mai accentuată în intervalul de timp de la 1 la 3 milisecunde. După acest interval de 3 [ms] rezultatele numerice vor începe să converge și să urmărească aceeași tendință ca și datele măsurate.

Spre deosebire de observația anterioară, în cazul materialului Makrolon 8035 simularea arată un comportament mai conservator. Vârfuri și văi repetitive sunt observate atât în datele experimentale cât și în rezultatele numerice, însă de data aceasta având o coborâre puțin mai semnificativă în cazul modelului numeric decât în măsurătorile de laborator.

În ambele cazuri descrise anterior, o explicație posibilă la diferențele observate ar putea fi modelarea gradelor de policarbonat considerându-le ca materiale izotropice, omogene, sau parametrii de degradare definiți, pentru care măsurători suplimentare ar fi fost necesare.

## 5.3 Elaborarea unei analize numerice pentru un produs de tip Head-Up Display

### 5.3.1 Descriere produs

Produsele de tip Head-Up Display (HUD) sunt niște afișaje integrate în bordul mașinii, între volanul acesteia și parbriz, având rolul de-a afișa anumite informații precum viteza de deplasare, indicatoarele rutiere pentru diferitele porțiuni de drum, respectiv, în cazul ultimelor generații, chiar și a indicațiilor de orientare provenite de la sistemul de navigație, pe parbrizul mașinii, cu scopul reducerii distragerii atenției șoferului.



Fig. 5.13. Sistem de tip Head-Up Display.

Având în vedere că acest produs integrează, pe lângă o serie de componente și sisteme electronice și un sistem cinematic, format dintr-un motorăș pas cu pas și un subsistem de oglinzi, totul cântărind aprox. 2,5 [kg], trebuie asigurată atât rezistența mecanică cât și rezistența termică a acestuia de către inginerii proiectanți.

Asigurarea integrității și durabilității HUD-ului îi revine carcasei acestuia, piesă care în cazul tuturor produselor mai vechi era fabricată din diverse aliaje de magneziu. Însă cu scopul reducerii costurilor, dar și a reducerii greutății sistemelor

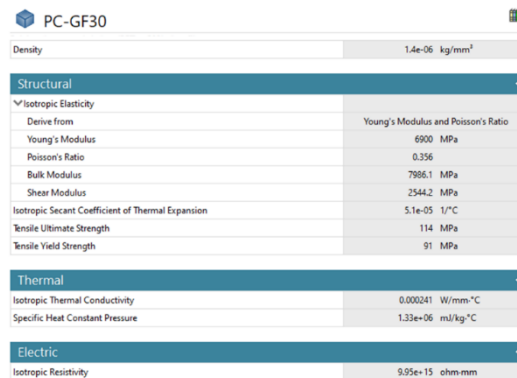
unui autovehicul, s-a implementat și soluția de carcasă fabricată din material termoplastic, ranforsat cu fibre de sticlă.

Deoarece comportamentul mecanic al unui material termoplastic ranforsat era destul de necunoscut în rândul departamentelor de proiectare, s-a recurs la o serie de încercări experimentale și modelări numerice folosind metoda elementelor finite, încercări printre care se numără și cele efectuate în cadrul acestei teze de doctorat.

### 5.3.2 Metode de simulare

Pentru a prezice cu o acuratețe cât mai ridicată modurile proprii de vibrații și frecvențele naturale aferente s-au efectuat două analize numerice cu abordări diferite.

Prima abordare era cea clasică, considerând materialul ranforsat – policarbonat cu 30% fibră de sticlă – ca fiind unul omogen, definind proprietățile acestuia doar prin parametri liniar elastici (Fig. 5.14).



PC-GF30	
Density	1.4e-06 kg/mm <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	6900 MPa
Poisson's Ratio	0.356
Bulk Modulus	7986.1 MPa
Shear Modulus	2544.2 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	5.1e-05 1/°C
Tensile Ultimate Strength	114 MPa
Tensile Yield Strength	91 MPa
<b>Thermal</b>	
▼ Isotropic Thermal Conductivity	
Isotropic Thermal Conductivity	0.000241 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	1.33e+06 mJ/kg·°C
<b>Electric</b>	
▼ Isotropic Resistivity	
Isotropic Resistivity	9.95e+15 ohm-mm

Fig. 5.14. Proprietățile de material folosite pentru analiza numerică considerând policarbonatul ranforsat ca material omogen.

A doua abordare, însă, a fost selectată pentru modelarea materialului ca fiind unul anizotrop, neomogen, concentrându-se asupra modelării orientării fibrelor de sticlă în urma procesului de injecție a mase plastice.

Pentru această modelare s-a ținut cont de rezultatele simulărilor reologice sau de curgere, efectuate cu scopul identificării parametrilor optimi de injecției a unei piese complexe din punct de vedere geometric.

Din aceste analize reologice se pot exporta tensorii care descriu orientarea fibrelor în secțiunea transversală a materialului injectat.

Pentru acest studiu s-a folosit programul comercial CADMOULD (Fig. 5.15).

### 5.3 – Elaborarea unei analize numerice pentru un produs de tip Head-Up Display | 109

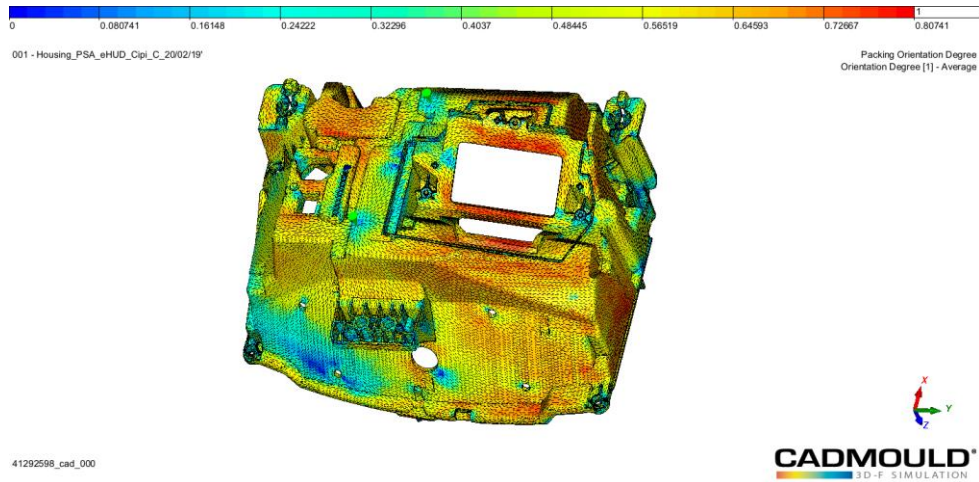


Fig. 5.15. Orientarea fibrelor de sticlă în funcție de parametri de injecție conform analizei reologice.

În urma exportării tensorului de orientare și a discretizării modelului geometric din programul de analiză reologică, aceste date au fost mapate la modelul discretizat din analiza structurală obținut în ANSYS Mechanical. Maparea fibrelor a fost efectuată în programul comercial CONVERSE. Procesul mapării fibrelor este reprezentat în Fig. 5.16.

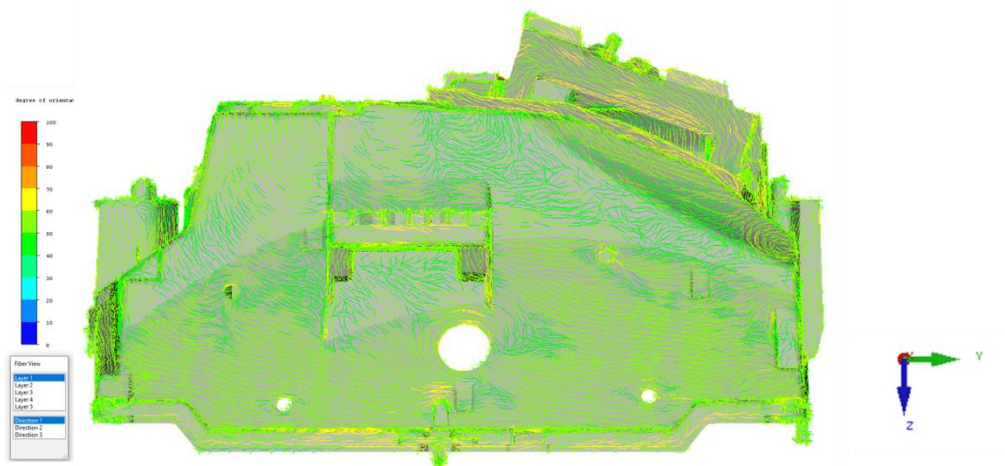


Fig. 5.16. Maparea orientării fibrelor de sticlă pe modelul discretizat al analizei structurale.

## 110 | Cap. 5 – Modele de material pentru analize utilizând metoda elementelor finite

După ce fibrele sunt mapate se definesc proprietățile de material al compozitului ales, urmând ca prin maparea fibrelor fiecare element ce rezultă din discretizarea modelului geometric, să aibă proprietățile lui specifice (Fig. 5.17).

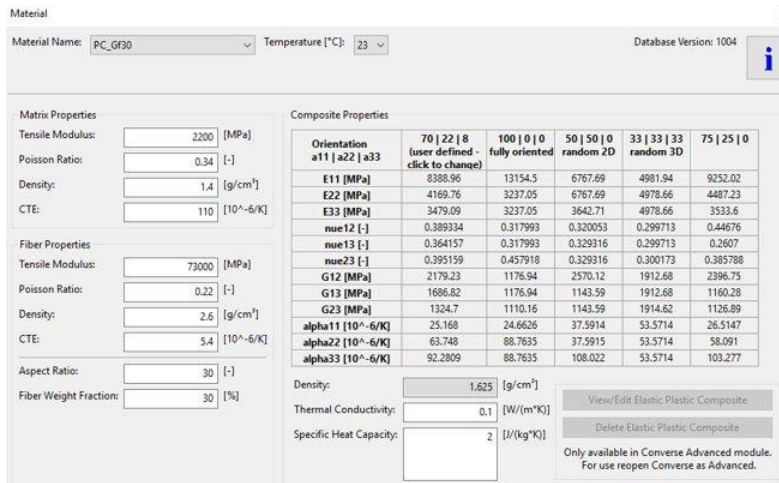


Fig. 5.17. Model de material liniar anizotropic pentru materialul PC-GF30 obținut în CONVERSE.

Când maparea fibrelor de sticlă s-a realizat modelul a fost adus în ANSYS Mechanical și condițiile la limită au fost definite, în aceeași manieră ca și cele pentru analiza liniară considerând materialul ranforsat ca omogen.

Comparația rezultatelor obținute în urma efectuării analizei modale cu maparea fibrelor de orientare cu rezultatele analizei cu materialul omogen este reprezentată în Fig. 5.18.

(a) Frecvența proprie	Izotrop	Anizotrop	Delta
1	174,37	145,14	-16,76%
2	281,07	234,89	-16,43%
3	363,29	312,03	-14,11%
4	452,07	382,28	-15,44%
5	495,85	418,48	-15,60%
6	546,99	452,91	-17,20%

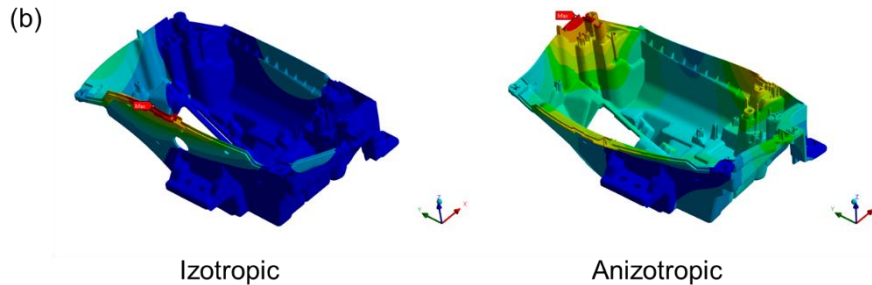


Fig. 5.18. Comparația între analizele modale efectuate folosind material izotrop și anizotrop: (a) diferențele privind frecvențele de rezonanță; (b) diferențele privind modurile proprii de vibrație.

Se pot observa diferențele atât ale valorilor frecvențelor de rezonanță, cât și ale modurilor proprii, manifestând astfel efectele locale ale ranforsării prin fibrele de sticlă asupra comportamentului dinamic al materialului.

### 5.3.3 Validarea rezultatelor obținute prin încercări experimentale

Conform celor prezentate în subcapitolul anterior, în urma modelării unui policarbonat ranforsat cu 30% fibră de sticlă printr-un model de material liniar elastic sau printr-unul anizotrop, având orientarea fibrelor mapată provenită dintr-o analiză reologică, pot rezulta diferențe atât la nivelul frecvențelor proprii de rezonanță, cât și la nivelul modurilor proprii de vibrații.

Pentru a demonstra eficacitatea modelului anizotrop s-a efectuat o măsurătoare de laborator pentru carcasa Head-Up Display-ului, evaluată anterior în analizele cu elemente finite.

Încercarea dinamică a fost efectuată în laboratorul de calificare (Quality Lab) al companiei Continental Automotive Romania SRL, sediul din Timișoara, pe un shaker electrodinamic.

Carcasa a fost fixată de un dispozitiv robust de aluminiu, fixat la rândul său de masa shaker-ului, iar achiziția de date s-a realizat folosind trei accelerometre triaxiale prinse de piesă în diferite poziții (Fig. 5.19). Pentru excitație a fost folosit un profil sinusoidal (sine sweep), având amplitudinea de 1g, în intervalul 0 – 250 [Hz].

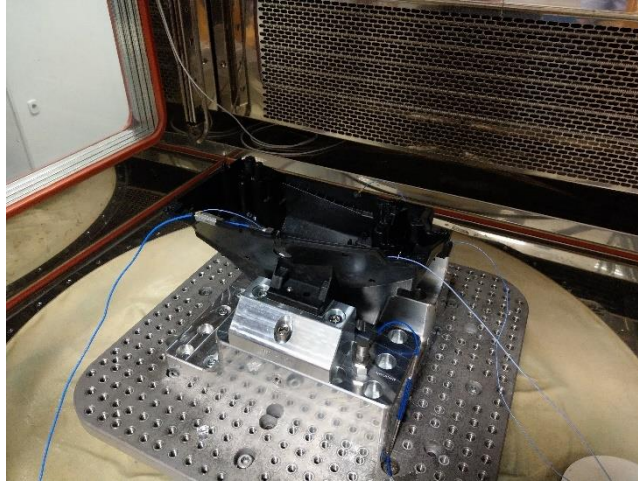


Fig. 5.19. Setările de laborator folosite pentru măsurarea frecvențelor de rezonanță și al accelerațiilor pe carcasa de Head-Up Display.

În urma prelucrării datelor înregistrate valorile obținute au fost comparate cu rezultatele analizelor numerice.

Graficul comparând valorile primei frecvențe de rezonanță, prin normalizarea acestora cu frecvența de rezonanță măsurată în timpul încercărilor de laborator, între valoarea experimentală și cele două obținute prin abordările diferite privind modelarea materialului în analizele numerice, este reprezentat în Fig. 5.20.

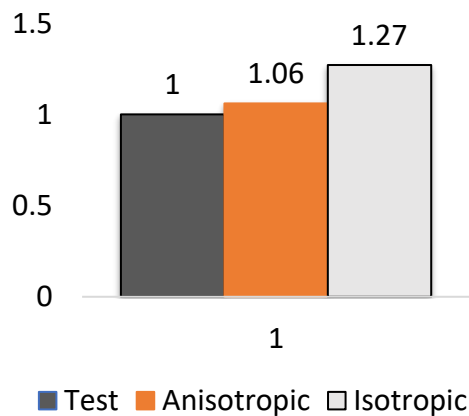


Fig. 5.20. Comparația normalizată între valoarea primei frecvențe de rezonanță obținută în teste de laborator, respectiv în analizele numerice folosind modele de materiale anizotropice și izotropice.



### 5.3 – Elaborarea unei analize numerice pentru un produs de tip Head-Up Display | 113

Conform comparației se poate observa necesitatea considerării orientării fibrelor din material în cazul în care se urmărește o evaluare cu un grad ridicat de acuratețe (aprox. 6%), diferențele putând ajunge și până la un procentaj de 27% în cazul considerării materialului ca fiind unul omogen, față de gradul de anizotropie al unui model real.

#### 5.3.4 Analiza de oboseală

Analiza de oboseală reprezintă determinarea numerică a duratei de viață, în termeni de numere de cicluri, pe care o piesă analizată le poate suporta.

Acest tip de simulare se bazează pe curba S-N determinată experimental, iar rezultatele simulării sunt strict dependente de tensiunile maxime – normale, tangențiale sau echivalente – obținute în simulările cvasistatice sau dinamice setate în prealabil pentru piesa analizată. De aici rezultă și dificultatea efectuării și a interpretării corecte a unei astfel de analize, necesitând experiența inginerului simulant, având în vedere că orice defect numeric, o discretizare necorespunzătoare sau condițiile de contur alese diferit față de condițiile din testele fizice, vor influența semnificativ durabilitatea urmărită.

Pentru o evaluare cât mai corectă se recomandă calibrarea modelului numeric cu modelele fizice în mai mulți pași, printre care cele mai importante sunt calibrarea materialului și calibrarea răspunsului dinamic, descris prin frecvențele de rezonanță și prin amplitudinile corespunzătoare acestora.

Bazat pe curba de oboseală determinată și prezentată în capitolul 4 al tezei de doctorat (Fig. 5.21), respectiv pe validarea modelului numeric din subcapitolul 5.3.3, s-a efectuat o analiză de oboseală pentru carcasa de Head-Up Display, fabricată din policarbonat ranforsat cu 30% fibră de sticlă.

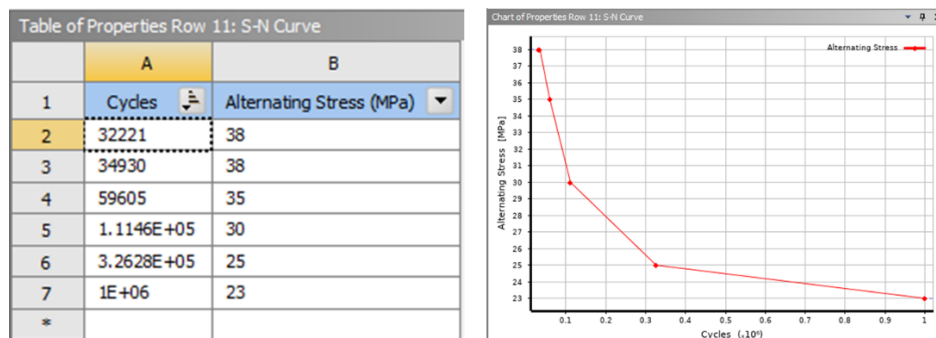


Fig. 5.21. Curba de oboseală definită în cadrul analizei numerice bazată pe măsurătorile experimentale.

Pentru simplificarea analizei s-a ales abordarea cvasistatică pentru obținerea stării de tensiune în piesa analizată, bazată pe amplitudinile măsurate în cadrul validărilor experimentale, cu un coeficient de siguranță adăugat – un multiplu de 1,5.

Astfel carcasa a fost fixată în două dintre prinderile de șurub așezate pe aceeași parte (Fig. 5.22.a), iar încărcarea, în termeni de forță, a fost aplicată în prinderea din fața carcasei, conform figurii 5.22.b.

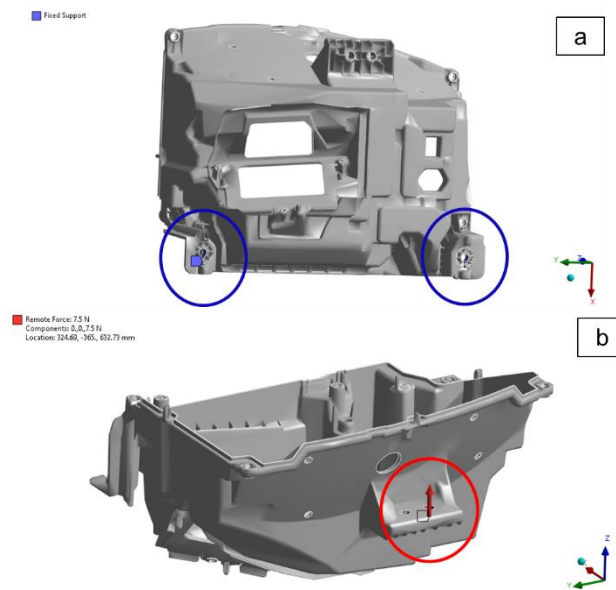


Fig. 5.22. Condițiile de contur folosite în cadrul analizei de oboseală: a) fixarea carcasei; b) forța aplicată.

În urma aplicării forței s-a obținut o deformare maximă de 0,43 [mm] și o tensiune maximă de 6,1 [MPa] în dreptul unei prinderi. Acestea sunt reprezentate în figurile 5.23.a și 5.23.b.

### 5.3 – Elaborarea unei analize numerice pentru un produs de tip Head-Up Display | 115

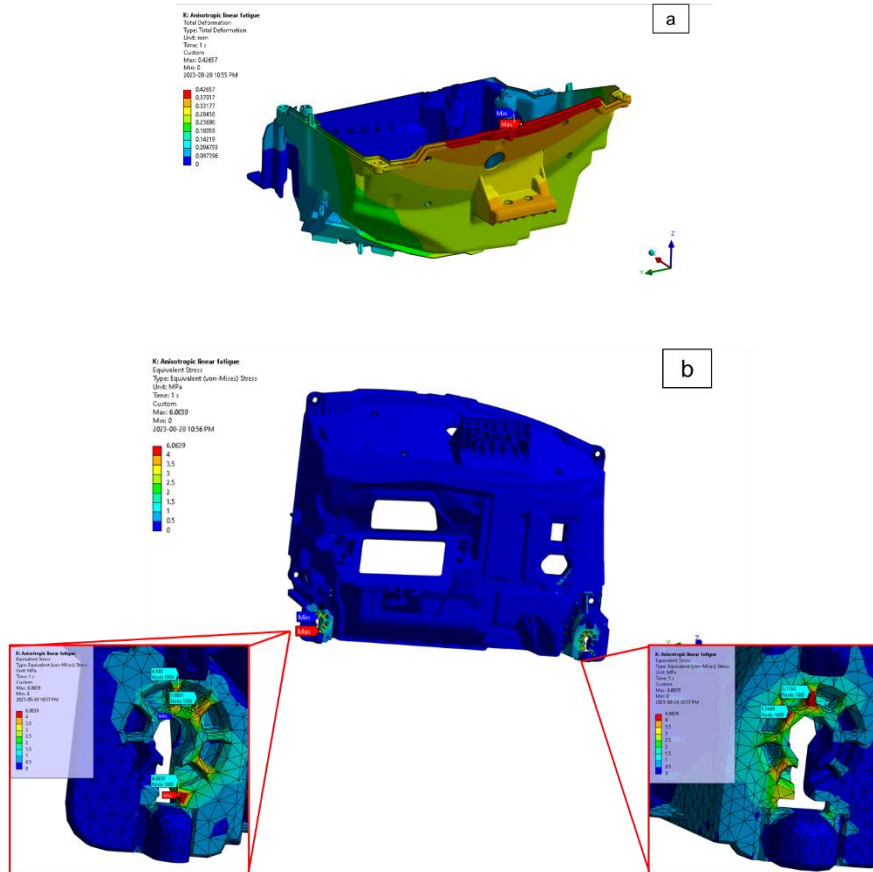


Fig. 5.23. Rezultatele analizei cvasistatice: a) deformația totală; b) tensiunea echivalentă.

Rezultatele analizei de oboseală efectuată pe baza tensiunilor echivalente obținute în urma aplicării forței în regim cvasistatic arată o durabilitate pentru materialul carcasei analizate mai mare ca  $10^6$  cicluri, astfel că se poate afirma că în condițiile ideale ale unei încărcări sinusoidale ciclice, materialul piesei prezintă o durată de viață infinită (Fig. 5.24).

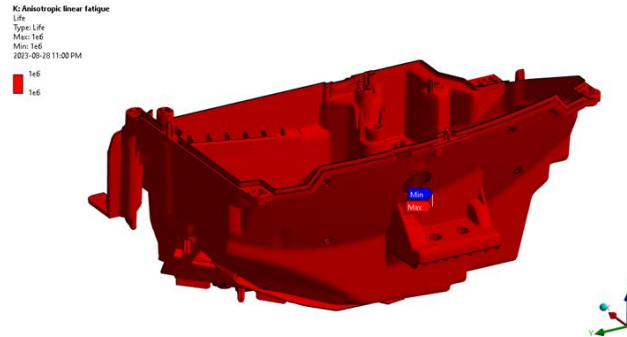


Fig. 5.24. Durabilitatea calculată pentru materialul carcasei Head-Up Displayului.

#### 5.4 Concluzii privind modelarea numerică a materialelor polimerice pe bază de policarbonat în urma caracterizărilor mecanice

Scopul studiilor prezentate în acest capitol era găsirea unor modele de material pentru diferite cazuri de încărcare la care poate fi supus un material termoplast ic folosit în produsele automotive.

Principiul de bază care stă la bază modelării materialelor cu scopul folosirii acestora în diferite analize numerice, este că modelul de material trebuie selectat în funcție de obiectivul investigației.

Modelul de material se selectează în funcție de tipul piesei de analizat, diferențiind piesele ca fiind fabricate din materiale polimerice, elastomerice sau metalice, respectiv în funcție de tipul încărcării și de deformațiile produse de acel tip de încărcare. Se pot defini trei categorii mari de încărcări mecanice: încărcări cvasistatice, încărcări dinamice de vibrații și încărcări dinamice de impact.

Având ca obiectiv determinarea din timp a unor defecte posibile a conceptelor mecanice și pentru minimizarea riscurilor acestora în produsele finite, inginerii caută cele mai potrivite modele de material pentru analizele numerice efectuate în timpul procesului de dezvoltare.

Fiecare categorie de încărcare mecanică se caracterizează prin anumite particularități. Categoriei încărcărilor dinamice îi este specifică utilizarea modelelor liniar elastice, impuse mai ales de natura analizelor de vibrații dar și de deformațiile permise, reprezentând un procentaj considerat foarte mic. Categoriile de încărcări caracterizate de neliniarități, și astfel de modele de material mai complexe, sunt categoriile încărcărilor cvasistatice și a celor dinamice de impact.

Pentru găsirea celor mai potrivite modele matematice în cazul celor trei grade de policarbonat selectate s-au făcut mai multe investigații. În primul pas categoria încărcărilor cvasistatice a fost împărțită în două părți: prima parte având ca obiectiv găsirea unui model capabil să replice comportamentul elastoplastic al materialelor, până la începutul fenomenului de gătuire, respectiv a doua parte cu scopul găsirii unui model vâscoplastic, care să descrie atât răspunsul materialelor după începerea găturii acestora dar, în același timp, care să fie capabil să țină cont și de variația vitezelor de încărcare sau de încărcările ciclice.

Un model de ecrusare izotropică multiliniară (multilinear isotropic hardening) a fost ales primei părți a încărcărilor cvasistatice. În urma analizelor numerice s-a putut observa o descriere perfectă a comportamentului elastoplastic al tuturor celor trei grade de policarbonat la încercarea de tracțiune. Astfel, se poate spune că atunci când se urmărește răspunsul materialului până la atingerea rezistenței maxime sau până la începutul fenomenului de gătuire, modelul de ecrusare izotropică multiliniară reprezintă o alegere perfectă.

Pentru cea de-a doua parte a încărcărilor cvasistatice, valabil însă, în același timp, și a încărcărilor dinamice de impact, a fost ales modelul de material ANSYS Three Network Model (ANSYS TNM).

Acesta este caracteristic modelelor neliniare, vâscoplastice avansate, calibrate în mod special pentru materialele termoplastice, și se caracterizează prin capacitatea de-a considera dependența materialului termoplastic atât de viteza de încărcare, cât și de variația temperaturii.

Un astfel de model fiind necesar pentru descrierea comportamentului de după rezistența maximă, când materialul trece printr-o gătuire semnificativă, precum prezentat în capitolul 3 al tezei.

Din curbele caracteristice comparate se poate observa o deviere ușoară între modelul matematic propus și curbele experimentale, în privința punctului maxim de pe curbă, care corespunde limitei de curgere, pentru toate cele trei viteze de încărcare la care modelul a fost calibrat.

O altă diferență privește panta de coborâre, evidențiind o scădere mai bruscă a tensiunilor, din momentul începerii curgerii materialului, în cazul măsurătorilor experimentale față de modelul matematic.

Această diferență se stabilizează însă de la deformația specifică de 15% până la limita de rupere.

Cu toate aceste diferențe observate, eroarea calculată între predicții și măsurători este de doar 2,32%, reprezentând o potrivire bună în cazul calibrărilor de modele de material.

Pentru validarea modelului de material obținut din programul MCalibration, a fost setată o analiză numerică în ANSYS Mechanical. Folosind modelul TNM s-a putut replica fenomenul de gătuire a porțiunii calibrate a epruvetei. În plus, modelul de material a redat, cu o acuratețe destul de ridicată, și zona în care s-ar produce ruperea materialului, după o extindere semnificativă a găturii materialului.

Analizând curbele forță – deplasare, se poate observa o translatare ușoară a rezultatelor numerice față de datele experimentale, însă doar în termeni de deplasare, valorile forțelor fiind foarte apropiate de valorile măsurate.

Pentru modelarea numerică a încercărilor dinamice de impact de tip Charpy, analizele s-au efectuat cu programul comercial de analize explicite ANSYS LS-DYNA.

În cadrul studiului numeric, similar încercărilor cvasistatice, s-a folosit modelul de ecruisare izotropică multiliniară, însoțit de un criteriu de cedare, bazat pe deformația specifică plastică (plastic strain failure), pentru fiecare material în parte, folosind valorile din literatura de specialitate, cu scopul modelării răspunsului materialelor după apariția rupei prin metoda eroziunii elementelor.

Pentru modelarea numerică o corelare foarte bună a fost observată în cazul probelor necrestate de Makrolon 2405 și 9415, în privința forței maxime și a pantei curbei în regiunea elastică. Pe de altă parte, pentru Makrolon 8035, modelul de plasticitate izotropică propus nu s-a ridicat așteptărilor, mai ales datorită neomogenității materialului ranforsat cu 30% fibră de sticlă.

Diagramele viteză – timp suprapuse arată că modelul numeric subestimează puțin scăderea vitezelor probelor actuale, dar acest comportament este mai mult accentuat în cazul materialului neranforsat. Această comportare este considerată ca fiind influențată mai ales de parametri de degradare, definiți în cardul de material, care ar putea fi îmbunătățiți efectuând studii de optimizare.

Analizele numerice corespunzătoare pentru al doilea set de încercări dinamice la impact de tip Charpy au fost setate într-un mod asemănător primei analize, însă în termeni de model de material s-a folosit modelul \*MAT\_089 (\*MAT\_PLASTICITY\_POLYMER), un model de material specific materialelor polimerice din librăria de materiale a lui ANSYS LS-DYNA, care permite definirea întregii curbe tensiune – deformație specifică, fără separarea perechilor de valori tensiune reală în funcție de deformație specifică plastică, specific modelului de ecruisare izotropică folosit în cazurile anterioare. Cu scopul reproducerii rupei observate în timpul încercărilor experimentale, parametri de tip \*MAT\_ADD\_DAMAGE\_DIEM au fost definiți, bazându-se pe dependența de viteza de încărcare a limitei admisibile deformației specifice.

În acest caz analizele au vizat doar materialul naranforsat și cel ranforsat cu 30% fibră de sticlă.

În cazul policarbonatului neranforsat vitezele obținute din analizele numerice au evidențiat o pantă de scădere mai puțin abruptă decât cea obținută în cazul măsurărilor experimentale, deviația dintre date fiind mult mai accentuată în intervalul de timp de la 1 la 3 milisecunde. După acest interval, rezultatele numerice încep să converge și urmăresc aceeași tendință ca și datele măsurate.

În cazul materialului Makrolon 8035 răspunsul obținut din simulare este unul mai conservator. Pentru acest material curba obținută este caracterizată de variații repetitive, atât pentru datele experimentale cât și pentru rezultatele numerice, dar având, în acest caz, o coborâre puțin mai semnificativă în cazul modelului numeric

decât cea observată în timpul măsurătorilor. O posibilă explicație la diferențele observate, pentru ambele abordări de simulare prezentate, reprezintă modelarea gradelor de polycarbonat ca materiale izotropice, omogene, respectiv parametri de degradare definiți, care ar necesita măsurători și calibrări suplimentare.

Având ca obiectiv determinarea celui mai potrivit model de material care să prezică cu o acuratețe cât mai ridicată modurile proprii de vibrații și frecvențele naturale aferente, pentru polycarbonatul ranforsat cu 30% fibră de sticlă, s-au efectuat două analize numerice folosind abordări diferite.

Prima abordare, cea clasică, consideră materialul ca fiind unul omogen, definind proprietățile acestuia doar prin parametri liniar elastici.

A doua abordare implică modelarea materialului ca fiind unul anizotrop, neomogen, considerând diferențele de rigiditate datorate orientării fibrelor de sticlă, rezultate în urma procesului de injecție.

Acest tip de modelare se bazează pe rezultatele simulărilor reologice, care se efectuează cu scopul identificării parametrilor optimi de injecție pentru piesele cu forme geometrice complexe.

Efectuând aceste analize reologice, se obțin și se pot exporta tensorii care descriu orientarea fibrelor în secțiunea transversală a materialelor injectate.

Considerând orientarea fibrelor, comparând rezultatele analizelor structurale se pot observa diferențele atât pentru valorile frecvențelor de rezonanță, cât și pentru modurile proprii, ca și consecința ale efectelor locale ale ranforsării prin fibrele de sticlă asupra comportamentului dinamic al materialului față de materialul omogen.

Pentru validarea concluziei anterioare a fost efectuată o măsurătoare de laborator, pentru aceeași carcasă de Head-Up Display, ca și cea supusă analizelor cu elemente finite.

Conform validării devine clar faptul că atunci când se urmărește o evaluare cu un grad ridicat de acuratețe (aprox. 6%) este necesară considerarea orientării fibrelor din material. În cazul în care ele nu sunt considerate pentru scopul simulării, ci se folosește doar un material omogen, diferențele față de valorile reale pot ajunge și până la un procentaj de 27%.

O analiză de oboseală cu o relevanță crescută poate fi efectuată doar în urma unor teste de calibrare, având în vedere factorii multipli care pot influența durabilitatea materialului unei piese, precum datele de material, condițiile la limită, o discretizare proprie, respectiv răspunsul dinamic în termeni de frecvențe proprii și amplitudinile corespunzătoare.

Pe baza curbei de oboseală determinată în capitolul 4 al tezei de doctorat pentru polycarbonatul ranforsat cu 30% fibră de sticlă, respectiv pe baza validării experimentale a modelului numeric, o analiză de oboseală pentru carcasa Head-Up Display-ului a fost efectuată.

Cu scopul simplificării analizei abordarea cvasistatică a fost aleasă pentru obținerea stării de tensiune în piesa analizată, pe baza amplitudinilor măsurate în cadrul validărilor experimentale, adăugând în plus un coeficient de siguranță de 1,5.

Efectuând analiza de oboseală pe baza tensiunilor echivalente obținute aplicând forța în regim cvasistatic, a rezultat o durabilitate pentru materialul carcasei mai mare ca 106 cicluri, afirmându-se astfel ca în condițiile ideale ale unei încărcări sinusoidale ciclice materialul piesei va prezenta o durată de viață infinită.



## Capitolul 6 - Concluzii finale

### 6.1 Concluzii generale

Scopul investigațiilor în cadrul cercetării doctorale a fost determinarea unor proprietăți și comportamente de material, prin încercări experimentale, respectiv elaborarea unor modele de materiale în urma încercărilor pentru analize numerice specifice cu element finit.

Încercările experimentale constau din evaluarea cvasistatică, la încercări de tracțiune (influența vitezei de încărcare și a temperaturii - atât la încălzire constantă, cât și la îmbătrânirea materialului), respectiv evaluarea tenacității statice, dar și dinamice, la rupere (utilizând atât probe crestate, cât și necrestate) a materialelor selectate. Încercările dinamice au mai fost completate și cu teste de oboseală la tracțiune pentru cele trei clase de policarbonat din gama Makrolon.

Pentru elaborarea unor modele de materiale cu scopul folosirii acestora în diferite analize numerice s-a avut în vedere principiul de bază prin care modelul de material trebuie selectat în funcție de obiectivul investigației. Astfel în cazul regimului cvasistatic am diferențiat un model de material capabil să redea răspunsul materialelor până la limita de curgere, și unul care să relice fenomenul de gătuire de după inițierea curgerii materialului, iar pentru regimul dinamic, mai exact pentru analizele de impact, a fost calibrat un model specific analizelor explicite din librăria ANSYS LS-DYNA.

În ultima parte a tezei au fost investigate două abordări de modelare ale policarbonatului ranforsat cu 30% fibră de sticlă în vederea determinării celui mai potrivit model de material pentru prezicerea modurilor proprii de vibrații și a frecvențelor naturale corespunzătoare, efectuând două analize numerice și comparând rezultatele cu un set de măsurători experimentale de vibrații.

Principalele concluzii ale investigațiilor sunt prezentate în cele ce urmează:

- Investigațiile efectuate în cazul încercărilor la tracțiune au subliniat faptul că rigiditatea materialului este puțin afectată de viteza de încărcare, însă când rezistența maximă este factorul decisiv, trebuie să fie considerată variația acesteia în funcție de viteza de încărcare și de condițiile de temperatură.
- În cazul tenacității la rupere, pentru toate clasele de Makrolon investigate, o repetabilitate foarte bună a rezultatelor, în termeni de forță-deplasare, poate fi observată, fără o dispersie semnificativă.
- O altă observație importantă este că toate materialele testate prezintă un comportament, și prin urmare, valori ale tenacității la rupere similare, observând o oarecare creștere a valorilor tenacității odată cu creșterea volumului de fibră de sticlă, urmată însă de o scădere când procentajul fibrelor depășește un anumit prag.

- În cadrul încercărilor de impact, atât pentru epruvetele crestate cât și pentru cele necrestate, un comportament de rupere fragilă a fost observat, mult mai accentuat însă în cazul probelor crestate.
- Probele necrestate datorită plasticității materialului precedând ruperea, au fost capabile să absoarba niveluri de energii mult mai mari la impact.
- A fost remarcată o diferență semnificativ de mare între capacitatea de absorbție a energiei de impact în cazul lui Makrolon 2405 față de cele două clase ranforsate, materialul nearmat absorbind energii care se ridică la un ordin de mărime față de energiile absorbite de materialele ranforsate cu fibră de sticlă.
- Invers proporționalitatea creșterii valorilor rezistenței maxime la impact cu creșterea fracției volumice a fibrei de sticlă a fost confirmată atât pentru probele necrestate cât și pentru cele crestate supuse încercărilor.
- Se poate trage concluzia că în cazul aplicațiilor care vor funcționa în condiții severe de impact și de șoc, se recomandă folosirea unui material cu o fracție volumică redusă de fibră de sticlă, sau chiar folosirea unui material nearmat pentru asigurarea condițiilor optime de rezistență și tenacitate.
- Încercările de oboseală pentru clasele de material propuse s-au concentrat asupra domeniului durabilităților mari, caracteristic pieselor de automobile care pe parcursul duratei de viață se supun unor cicluri repetitive și variabile.
- În cazul încercărilor de oboseală, într-un mod analogic cu cazul încercărilor cvasistatice, a fost observată o creștere a rigidității și a tenacității materialului cu creșterea procentajului de fibră.
- Pentru modelările numerice categoria încărcărilor cvasistatice a fost împărțită în două părți: prima parte referitoare la găsirea unui model care să replice comportamentul elastoplastic al materialelor, până la începutul fenomenului de gătuire, corespunzând punctului de inflexiune de pe curbă, respectiv a doua parte, având ca scop găsirea unui model vâscoplastic, pentru redarea, pe de o parte, a răspunsului materialelor de după gătuire, respectiv care să țină cont și de variația răspunsului în funcție de viteza de încărcare sau de temperatură.
- Un model de ecruisare izotropică multiliniară a fost ales pentru a prima jumătate a încărcărilor cvasistatice, prin folosirea căruia s-a putut observa o descriere perfectă a comportamentului elastoplastic al tuturor celor trei clase de policarbonat la încercarea de tracțiune, până la atingerea rezistenței maxime.
- Se poate afirma că atunci când obiectivul este urmărirea răspunsului materialului până la atingerea rezistenței maxime sau până la începutul găturii materialului, modelul de ecruisare izotropică multiliniară reprezintă alegerea ideală.
- Pentru a doua parte a încărcărilor cvasistatice, dar concomitent și pentru încărcările dinamice de impact, s-a ales modelul de material ANSYS Three Network Model, un model vâscoplastic, calibrat pentru materialele termoplastice, caracterizat prin capacitatea de-a considera răspunsul materialului în funcție de viteza de încărcare și în funcție de temperatură.

- Acest model de material s-a dovedit a fi necesar pentru descrierea comportamentului de după rezistența maximă sau punctul de inflexiune, cunoscând faptul că materialul trece printr-o gâtuire semnificativă.
- S-a putut observa o deviație ușoară între modelul matematic și curbele experimentale, în privința punctului maxim de pe curbă, dar și în ceea ce privește panta de coborâre, acesta arătând o scădere mai bruscă a tensiunilor, din moment ce începe curgerea materialului.
- Cu toate aceste observații, eroarea calculată între predicții și datele măsurate era de doar 2,32%.
- În cazul modelării încercărilor de impact, similar încercărilor cvasistatice, pentru probele necrestate, a fost utilizat modelul de ecruisare izotropică multiliniară, de această dată însoțit de un criteriu de cedare, pe baza deformației specifice plastice, cu scopul replicării răspunsului materialelor după apariția rupei, prin eroziunea elementelor finite.
- Din diagramele viteză – timp suprapuse se observă că modelul numeric subestimează puțin scăderea vitezelor din datele măsurate, acest aspect fiind mai mult accentuat în cazul materialului neranforsat.
- Pentru probele crestate s-a folosit un model de material din librăria programului ANSYS LS-DYNA de tipul \*MAT\_089, însoțit de parametri de cedare de tip \*MAT\_ADD\_DAMAGE\_DIEM, bazați pe dependența de viteza de încărcare a limitei admisibile deformației specifice.
- Rezultatele obținute cu acest model de material au arătat unele deviații în comparație cu măsurătorile, evidențiind atât un decalaj privind scăderea vitezelor în cazul lui Makrolon 2405, cât și un caracter mai conservator al răspunsului numeric în cazul lui Makrolon 8035.
- Pentru demonstrarea importanței includerii orientării fibrelor de ranforsare în analiza numerică, în privința efectelor acestora asupra răspunsului dinamic al unei structuri, o validare numerică, prin două abordări diferite, și una experimentală au fost efectuate pe carcasa de plastic a unui Head-Up Display.
- Prima abordare consta din modelarea materialului ca unul izotrop, prin parametri liniar elastici.
- A doua abordare, pe de altă parte, considera materialul ca fiind unul anizotrop, considerând diferențele de rigiditate induse de orientarea fibrelor de sticlă.
- Conform validării cu încercarea experimentală reiese clar că atunci când scopul este evaluarea cu un grad ridicat de acuratețe (aprox. 6%) a frecvențelor de rezonanță și a modurilor proprii este necesară considerarea orientării fibrelor din material.
- În cazul în care orientarea fibrelor nu este luată în calcul diferențele față de valorile măsurate se pot ridica la un procentaj de 27%.
- Pe baza curbei de oboseală determinată în capitolul 4 al tezei de doctorat pentru Makrolon 8035, respectiv bazat pe validarea experimentală a modelului numeric, o analiză de oboseală pentru carcasa de Head-Up Display a fost efectuată.

- Pentru simplificarea analizei abordarea cvasistatică a fost aleasă cu scopul obținerii stării de tensiune în piesa analizată, bazat pe amplitudinile măsurate în cadrul validărilor experimentale și considerând în plus un coeficient de siguranță de 1,5.
- Prin efectuarea analizei de oboseală pe baza tensiunilor echivalente obținute, a rezultat o durabilitate pentru materialul carcasei mai mare ca 106 cicluri, confirmând astfel ca în condițiile unei încărcări sinusoidale ciclice ideale materialul piesei va prezenta o durată de viață infinită.

## 6.2 Contribuții originale

În urma activităților de cercetare experimentală și numerică în domeniul caracterizării mecanice a unor materiale termoplastice desfășurate în cadrul programului doctoral pentru finalizarea tezei, se pot remarca o serie de contribuții personale precum:

- Studiul influenței armării cu fibre de sticlă a policarbonatului asupra proprietăților mecanice statice și dinamice.
- Analiza efectului temperaturii asupra coeficientului de contracție transversală pentru cele trei clase de policarbonat.
- Analiza efectului îmbătrânirii asupra comportamentului la tracțiune ale celor trei tipuri de Makrolon.
- Prelucrarea mecanică a unor probe de tracțiune pentru obținerea probelor specifice încercărilor de impact.
- Încercarea la impact a probelor crestate, deoarece în literatura de specialitate și în informațiile furnizate de producători găsindu-se doar date pentru probe necrestate.
- Elaborarea unor modele de material validate experimental pentru evaluarea integrității componentelor din materiale polimerice.
- Determinarea rezistenței la oboseală și obținerea unor curbe Wöhler, pentru cele trei clase de Makrolon, în contextul în care numeroase investigații sunt disponibile pentru materiale metalice, însă doar un număr redus de studii se axează pe comportamentul materialelor termoplastice.
- Calibrarea modelului de material vâscoplastic ANSYS TNM pentru cele trei clase de material, considerând influența vitezei de încărcare.
- Maparea orientării fibrelor rezultate din analizele reologice pentru Makrolon 8035 și efectuarea analizei modale cu modelul obținut.
- Efectuarea validării experimentale a analizei de rezonanță pentru carcasa de Head-Up Display.
- Analiza de oboseală pentru carcasa de Head-Up Display validată.
- Din studiile experimentale și numerice pentru determinarea comportamentelor statice și dinamice ale celor trei clase de policarbonat, care au stat la baza elaborării tezei, au rezultat 5 articole științifice, publicate în jurnale și conferințe internaționale (3 ISI și 2 SCOPUS)

### 6.3 Direcții viitoare de cercetare

Teza de doctorat și-a atins principalul obiectiv, rezultatele obținute oferind informații importante legate de comportamentul unor clase de policarbonat, armate și nearmate, la diferite tipuri de încărcări cvasistatice și dinamice și modelarea acestor răspunsuri în analize numerice cu elemente finite. Cu toate acestea, se pot identifica anumite perspective de dezvoltare ulterioară, prin care pot fi aduse îmbunătățiri studiului, cum ar fi:

- Studiul orientării fibrelor prin multiple teste la diferite direcții de orientare (30°, 45°, 60°, 90°).
- Teste de tracțiune la temperaturi negative.
- Încercări ciclice de tracțiune pentru evaluarea comportamentelor vâscoelastice și de relaxare ale materialelor.
- Încercări de forfecare și de compresiune pentru obținerea stării de triaxialitate și astfel a unui model de material cu parametri de cedare.
- Analiza suprafețelor de rupere prin microscopie SEM.
- Încercări dinamice de oboseală la diverse temperaturi pentru investigarea relației între răspunsul materialului la încercări cvasistatice de tracțiune și între încercările ciclice de oboseală la tracțiune, la temperaturi diferite.

## Cuvânt de încheiere

În primul rând, aş dori să îi mulţumesc conducătorului meu de doctorat, domnului prof. univ. dr. ing. Liviu Marşavina, pentru sprijinul permanent, pentru îndrumarea şi pentru încurajarea pe care mi le-a oferit pe parcursul întregului studiu de cercetare până la finalizarea tezei de doctorat.

Mulţumesc membrilor comisiei de îndrumare, domnului prof. univ. dr. ing. Dan Andrei Şerban, domnului conf. univ. dr. ing. Radu Marcel Negru şi domnului ş.l. univ. dr. ing. Adrian George Radu pentru sprijinul şi pentru sfaturile excelente oferite pe parcursul pregătirii şi elaborării acestei teze de doctorat.

Sincere mulţumiri doresc să îi adresez de asemenea domnului ş.l. univ. dr. ing. Sergiu Valentin Gălăţanu pentru timpul său preţios şi pentru sfaturile ştiinţifice valoroase acordate pe parcursul anilor de cercetare şi în elaborarea tezei de doctorat.

Doresc să mulţumesc întregului colectiv din cadrul Departamentului de Mecanică şi Rezistenţa Materialelor pentru susţinere şi pentru colaborările ştiinţifice.

Totodată doresc să mulţumesc colectivului din cadrul Institutului de Fizica Materialelor, aparţinând Academiei Cehe, de la Brno, pentru sprijinul acordat în realizarea testelor dinamice de oboseală, pe toată durata stagiului de cercetare efectuat.

Nu în ultimul rând aş vrea să mulţumesc familiei şi soţiei mele pentru încurajarea constantă şi sprijinul necondiţionat, elemente considerate absolut necesare pentru finalizarea cu succes a activităţilor de cercetare şi elaborarea tezei de doctorat.

## Bibliografie

- [1] W. H. Carothers, "Polymerization.," *Chem Rev*, vol. 8, no. 3, pp. 353–426, Jun. 1931, doi: 10.1021/cr60031a001.
- [2] S. Kenig, "Fiber orientation development in molding of polymer composites," *Polym Compos*, vol. 7, no. 1, pp. 50–55, Feb. 1986, doi: 10.1002/pc.750070110.
- [3] K. J. Meyer, J. T. Hofmann, and D. G. Baird, "Prediction of short glass fiber orientation in the filling of an end-gated plaque," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 62, pp. 77–86, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2013.12.013.
- [4] P. Singh and M. R. Kamal, "The effect of processing variables on microstructure of injection molded short fiber reinforced polypropylene composites," *Polym Compos*, vol. 10, no. 5, pp. 344–351, Oct. 1989, doi: 10.1002/pc.750100511.
- [5] H. Hahn, K. Jerina, and P. Burrett, "Fiber Orientation and Fracture Morphology in Short Fiber-Reinforced Thermoplastics," in *Advances in Thermoplastic Matrix Composite Materials*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1989, pp. 183-183–16. doi: 10.1520/STP24602S.
- [6] A. Siegmann, A. Buchman, and S. Kenig, "Residual stresses in polymers III: The influence of injection-molding process conditions," *Polym Eng Sci*, vol. 22, no. 9, pp. 560–568, Jun. 1982, doi: 10.1002/pen.760220908.
- [7] P. So and L. J. Broutman, "Residual stresses in polymers and their effect on mechanical behavior," *Polym Eng Sci*, vol. 16, no. 12, pp. 785–791, Dec. 1976, doi: 10.1002/pen.760161202.
- [8] S. Bahadur and Y. Zheng, "Mechanical and tribological behavior of polyester reinforced with short glass fibers," *Wear*, vol. 137, no. 2, pp. 251–266, May 1990, doi: 10.1016/0043-1648(90)90138-Z.
- [9] S. Y. Fu and B. Lauke, "Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers," *Compos Sci Technol*, vol. 56, no. 10, pp. 1179–1190, Jan. 1996, doi: 10.1016/S0266-3538(96)00072-3.
- [10] T. Vu-Khanh, J. Denault, P. Habib, and A. Low, "The effects of injection molding on the mechanical behavior of long-fiber reinforced PBT/PET blends," *Compos*

- Sci Technol*, vol. 40, no. 4, pp. 423–435, Jan. 1991, doi: 10.1016/0266-3538(91)90032-K.
- [11] A. Davis and J. H. Golden, “Stability of Polycarbonate,” *Journal of Macromolecular Science, Part C*, vol. 3, no. 1, pp. 49–68, Jan. 1969, doi: 10.1080/15583726908545896.
- [12] D. Kyriacos, “Polycarbonates,” *Brydson’s Plastics Materials: Eighth Edition*, pp. 457–485, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00017-7.
- [13] L. F. Al-Saidi, K. Mortensen, and K. Almdal, “Environmental stress cracking resistance. Behaviour of polycarbonate in different chemicals by determination of the time-dependence of stress at constant strains,” *Polym Degrad Stab*, vol. 82, no. 3, pp. 451–461, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(03)00199-X.
- [14] W. Boentoro, A. Pflug, and B. Szyszka, “Scratch resistance analysis of coatings on glass and polycarbonate,” *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 10, pp. 3121–3125, Mar. 2009, doi: 10.1016/J.TSF.2008.11.119.
- [15] M. Barletta, M. Puopolo, A. Gisario, and S. Vesco, “Smart coatings on thermoplastic polycarbonates: LEGO-Design (LD) for facile manufacturability,” *Prog Org Coat*, vol. 101, pp. 161–177, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.PORGCOAT.2016.08.002.
- [16] Q. H. Shah, “Impact resistance of a rectangular polycarbonate armor plate subjected to single and multiple impacts,” *Int J Impact Eng*, vol. 36, no. 9, pp. 1128–1135, Sep. 2009, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2008.12.005.
- [17] Z. Rosenberg and R. Kositski, “Deep indentation and terminal ballistics of polycarbonate,” *Int J Impact Eng*, vol. 103, pp. 225–230, May 2017, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2017.01.018.
- [18] B. Franzén, C. Klason, J. Kubát, and T. Kitano, “Fibre degradation during processing of short fibre reinforced thermoplastics,” *Composites*, vol. 20, no. 1, pp. 65–76, Jan. 1989, doi: 10.1016/0010-4361(89)90684-8.
- [19] L. M. Gemmell, O. W. Tennant, and R. R. Gallucci, “Glass reinforced PC/ABS blend with toughness,” US5384353A, 1995
- [20] P. Beardmore and C. F. Johnson, “The potential for composites in structural automotive applications,” *Compos Sci Technol*, vol. 26, no. 4, pp. 251–281, Jan. 1986, doi: 10.1016/0266-3538(86)90002-3.



- [21] R. Stewart, "Automotive composites offer lighter solutions," *Reinforced Plastics*, vol. 54, no. 2, pp. 22–28, Mar. 2010, doi: 10.1016/S0034-3617(10)70061-8.
- [22] P. K. Mallick, "Thermoplastics and thermoplastic–matrix composites for lightweight automotive structures," *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, pp. 174–207, Jan. 2010, doi: 10.1533/9781845697822.1.174.
- [23] N. Cristescu, *Mecanica materialelor compozite*, vol. 1. Universitatea Politehnica Bucuresti, 1983.
- [24] M. Schoßig, C. Bierögel, W. Grellmann, and T. Mecklenburg, "Mechanical behavior of glass-fiber reinforced thermoplastic materials under high strain rates," *Polym Test*, vol. 27, no. 7, pp. 893–900, Oct. 2008, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2008.07.006.
- [25] A. Baharlou and K. Nasouri, "A new comprehensive evaluation of the corrosion mechanism of E-type glass fibers in sulfuric acid solutions," *Constr Build Mater*, vol. 268, p. 121213, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121213.
- [26] H. Seeli, V. V. S. Prasad, and M. Venkatesh, "Nano-graphene E-glass fibre epoxy polymer composite thermal and mechanical characteristics study," *Mater Today Proc*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.03.341.
- [27] H. De Brouwer, J. Van Den Bogerd, and J. Hoover, "Color stability of polycarbonate for optical applications," *Eur Polym J*, vol. 71, pp. 558–566, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2015.08.031.
- [28] N. De Vietro, L. Belforte, V. G. Lambertini, and F. Fracassi, "Low pressure plasma modified polycarbonate: A transparent, low reflective and scratch resistant material for automotive applications," *Appl Surf Sci*, vol. 307, pp. 698–703, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.APSUSC.2014.04.105.
- [29] T. Schmauder, K. D. Nauenburg, K. Kruse, and G. Ickes, "Hard coatings by plasma CVD on polycarbonate for automotive and optical applications," *Thin Solid Films*, vol. 502, no. 1–2, pp. 270–274, Apr. 2006, doi: 10.1016/J.TSF.2005.07.296.
- [30] D. Katsamberis, K. Browall, C. Iacovangelo, M. Neumann, and H. Morgner, "Highly durable coatings for automotive polycarbonate glazing," *Prog Org*

- Coat*, vol. 34, no. 1–4, pp. 130–134, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0300-9440(98)00002-2.
- [31] K. Cao, X. Ma, B. Zhang, Y. Wang, and Y. Wang, “Tensile behavior of polycarbonate over a wide range of strain rates,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 16–17, pp. 4056–4061, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.MSEA.2010.03.088.
- [32] K. Cao, Y. Wang, and Y. Wang, “Effects of strain rate and temperature on the tension behavior of polycarbonate,” *Mater Des*, vol. 38, pp. 53–58, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.MATDES.2012.02.007.
- [33] P. G. Autade and D. S. Pawar, “Effect of Temperature and Strain Rate on the Mechanical Properties of Polycarbonate and Polycarbonate/Thermoplastic Polyurethane Blend,” vol. 2, no. 3, pp. 60–65, 2015, doi: 10.9790/019X-0236065.
- [34] W. Zhang and Y. Xu, “Experimental Studies of Mechanical Properties of Polycarbonate,” *Mechanical Properties of Polycarbonate*, pp. 1–28, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-1-78548-313-4.50001-7.
- [35] K. Cao, Y. Wang, and Y. Wang, “Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates,” *Int J Solids Struct*, vol. 51, no. 13, pp. 2539–2548, Jun. 2014, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2014.03.026.
- [36] S. Fu, Y. Wang, and Y. Wang, “Tension testing of polycarbonate at high strain rates,” *Polym Test*, vol. 28, no. 7, pp. 724–729, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2009.06.002.
- [37] G. Allen, D. C. W. Morley, and T. Williams, “The impact strength of polycarbonate,” *J Mater Sci*, vol. 8, no. 10, pp. 1449–1452, Oct. 1973, doi: 10.1007/BF00551669.
- [38] Y. Xu, H. Lu, T. Gao, and W. Zhang, “Predicting the low-velocity impact behavior of polycarbonate: Influence of thermal history during injection molding,” *Int J Impact Eng*, vol. 86, pp. 265–273, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2015.08.013.
- [39] Y. H. Yau, S. N. Hua, and C. K. Kok, “Structural failure analysis of polycarbonate enclosures of electronic devices subjected to multiple ball impacts,” *Polym*

- Test*, vol. 65, pp. 374–386, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2017.12.013.
- [40] F. Mullaoğlu, F. Usta, H. S. Türkmen, Z. Kazanci, D. Balkan, and E. Akay, “Deformation Behavior of the Polycarbonate Plates Subjected to Impact Loading,” *Procedia Eng*, vol. 167, pp. 143–150, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROENG.2016.11.681.
- [41] A. Ahmed, N. Asija, H. Chauhan, Kartikeya, and N. Bhatnagar, “Study of Polycarbonate Based Nano-composites at High Strain Rate Impact,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 14, pp. 507–513, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROSTR.2019.05.061.
- [42] J. Richeton, S. Ahzi, K. S. Vecchio, F. C. Jiang, and R. R. Adharapurapu, “Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress,” *Int J Solids Struct*, vol. 43, no. 7–8, pp. 2318–2335, Apr. 2006, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2005.06.040.
- [43] A. D. Mulliken and M. C. Boyce, “Mechanics of the rate-dependent elastic–plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates,” *Int J Solids Struct*, vol. 43, no. 5, pp. 1331–1356, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2005.04.016.
- [44] A. D. Drozdov, A. Al-Mulla, and R. K. Gupta, “The viscoelastic and viscoplastic behavior of polymer composites: polycarbonate reinforced with short glass fibers,” *Comput Mater Sci*, vol. 28, no. 1, pp. 16–30, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0927-0256(03)00058-2.
- [45] K.-C. Ho, J.-R. Hwang, and J.-L. Doong, “Tensile Properties of Short Glass Fibre Reinforced Polycarbonate,” *Polymers and Polymer Composites*, vol. 4, no. 8, pp. 563–575, Nov. 1996, doi: 10.1177/147823919600400804.
- [46] J. Richeton, S. Ahzi, K. S. Vecchio, F. C. Jiang, and A. Makradi, “Modeling and validation of the large deformation inelastic response of amorphous polymers over a wide range of temperatures and strain rates,” *Int J Solids Struct*, vol. 44, no. 24, pp. 7938–7954, Dec. 2007, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2007.05.018.
- [47] P. Yu, X. Yao, Q. Han, S. Zang, and Y. Gu, “A visco-elastoplastic constitutive model for large deformation response of polycarbonate over a wide range of strain rates and temperatures,” *Polymer (Guildf)*, vol. 55, no. 25, pp. 6577–6593, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.polymer.2014.09.071.

- [48] "ISO 527-1, Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles," 2012.
- [49] "IEC 60068-2-14, Environmental testing - Part 2-14: Tests - Test N: Change of temperature," 2009. [Online]. Available: [www.iec.ch/searchpub/cur\\_fut-f.htm](http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm)
- [50] K. Cao, Y. Wang, and Y. Wang, "Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates," *Int J Solids Struct*, vol. 51, no. 13, pp. 2539–2548, Jun. 2014, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2014.03.026.
- [51] T. Krausz, D. A. Serban, R. M. Negru, A. G. Radu, and L. Marsavina, "The effect of strain rate and temperature on the mechanical properties of polycarbonate composites," *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 4211–4215, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.12.121.
- [52] S. Redjala, R. Ferhoum, N. Aït Hocine, and S. Azem, "Degradation of Polycarbonate Properties Under Thermal Aging," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 19, no. 2, pp. 536–542, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11668-019-00630-0.
- [53] G. R. Strobl, *The Physics of Polymers*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. doi: 10.1007/978-3-662-03243-5.
- [54] D. A. Şerban, G. Weber, L. Marşavina, V. V. Silberschmidt, and W. Hufenbach, "Tensile properties of semi-crystalline thermoplastic polymers: Effects of temperature and strain rates," *Polym Test*, vol. 32, no. 2, pp. 413–425, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2012.12.002.
- [55] V. V. Vasiliev and E. V. Morozov, "MECHANICS OF A UNIDIRECTIONAL PLY," *Advanced Mechanics of Composite Materials*, pp. 57–132, Jan. 2007, doi: 10.1016/B978-008045372-9/50003-8.
- [56] "Fracture toughness properties of aerospace materials," *Introduction to Aerospace Materials*, pp. 454–468, Jan. 2012, doi: 10.1533/9780857095152.454.
- [57] J. Karger-kocsis, "Microstructure and Fracture Mechanical Performance of Short-Fibre Reinforced Thermoplastics," *Composite Materials Series*, vol. 6, no. C, pp. 189–247, Jan. 1989, doi: 10.1016/B978-0-444-87286-9.50010-3.

- [58] G. Marom, "Environmental Effects on Fracture Mechanical Properties of Polymer Composites," *Composite Materials Series*, vol. 6, no. C, pp. 397–424, Jan. 1989, doi: 10.1016/B978-0-444-87286-9.50014-0.
- [59] L. Marsavina, E. Linul, T. Voiconi, and T. Sadowski, "A comparison between dynamic and static fracture toughness of polyurethane foams," *Polym Test*, vol. 32, no. 4, pp. 673–680, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2013.03.013.
- [60] W. Hufenbach, F. M. Ibrahim, A. Langkamp, R. Böhm, and A. Hornig, "Charpy impact tests on composite structures – An experimental and numerical investigation," *Compos Sci Technol*, vol. 68, no. 12, pp. 2391–2400, Sep. 2008, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2007.10.008.
- [61] H. Hirose, T. Kobayashi, and Y. Kohmo, "Charpy impact and dart drop impact," *Polym Test*, vol. 4, no. 1, pp. 31–44, Jan. 1984, doi: 10.1016/0142-9418(84)90031-X.
- [62] W. L. Server, "Instrumented Charpy test review and application to structural integrity," *European Structural Integrity Society*, vol. 30, no. C, pp. 205–212, Jan. 2002, doi: 10.1016/S1566-1369(02)80022-X.
- [63] "ISO 527-2, Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics," 2012.
- [64] "ASTM D5045 - 14, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials," 2014, doi: 10.1520/D5045-14.
- [65] M. R. Piggott, "Theoretical estimation of fracture toughness of fibrous composites," *J Mater Sci*, vol. 5, no. 8, pp. 669–675, Aug. 1970, doi: 10.1007/BF00549751.
- [66] N. Saba, M. Jawaid, and M. T. H. Sultan, "An overview of mechanical and physical testing of composite materials," *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, pp. 1–12, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1.
- [67] C. Chandrasekaran, "Testing of Rubber Lining," in *Anticorrosive Rubber Lining*, Elsevier, 2017, pp. 165–172. doi: 10.1016/B978-0-323-44371-5.00019-0.

- [68] J. Tanks, S. Sharp, and D. Harris, "Charpy impact testing to assess the quality and durability of unidirectional CFRP rods," *Polym Test*, vol. 51, pp. 63–68, May 2016, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2016.02.009.
- [69] E. Lucon, "Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data," *Mater Des*, vol. 97, pp. 437–443, May 2016, doi: 10.1016/J.MATDES.2016.02.116.
- [70] W. L. Server, "General Yielding of Charpy V-Notch and Precracked Charpy Specimens," *J Eng Mater Technol*, vol. 100, no. 2, pp. 183–188, Apr. 1978, doi: 10.1115/1.3443469.
- [71] "ISO 179-1, Plastics - Determination of Charpy impact properties - Part 1: Non-instrumented impact test," 2010.
- [72] C. Soutis, "Fibre reinforced composites in aircraft construction," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 41, no. 2, pp. 143–151, Feb. 2005, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2005.02.004.
- [73] B. Yang, L. Lu, X. Liu, Y. Xie, J. Li, and Y. Tang, "Uniaxial tensile and impact investigation of carbon-fabric/polycarbonate composites with different weave tow widths," *Mater Des*, vol. 131, pp. 470–480, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.MATDES.2017.06.048.
- [74] Dumitru Ion and Faur Nicolae, "Elemente de calcul și aplicații în rezistența materialelor," Timișoara, Sep. 1997.
- [75] R. Marissen *et al.*, "The effect of material defects on the fatigue behaviour and the fracture strain of ABS," *J Mater Sci*, vol. 36, no. 17, pp. 4167–4180, 2001, doi: 10.1023/A:1017960704248.
- [76] M. J. W. Kanters, T. Kurokawa, and L. E. Govaert, "Competition between plasticity-controlled and crack-growth controlled failure in static and cyclic fatigue of thermoplastic polymer systems," *Polym Test*, vol. 50, pp. 101–110, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2016.01.008.
- [77] S. Holopainen, T. Barriere, G. Cheng, and R. Kouhia, "Continuum approach for modeling fatigue in amorphous glassy polymers. Applications to the investigation of damage-ratcheting interaction in polycarbonate," *Int J Plast*, vol. 91, pp. 109–133, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.IJPLAS.2016.12.001.

- [78] R. O. Ritchie, "Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids," *Int J Fract*, vol. 100, no. 1, pp. 55–83, 1999, doi: 10.1023/A:1018655917051.
- [79] J. Lemaitre and R. Desmorat, *Engineering Damage Mechanics*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. doi: 10.1007/b138882.
- [80] A. P. Mouritz, "Mechanical and durability testing of aerospace materials," *Introduction to Aerospace Materials*, pp. 91–127, Jan. 2012, doi: 10.1533/9780857095152.91.
- [81] S. Holopainen, "Modeling of the mechanical behavior of amorphous glassy polymers under variable loadings and comparison with state-of-the-art model predictions," *Mechanics of Materials*, vol. 66, pp. 35–58, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.MECHMAT.2013.06.009.
- [82] S. Holopainen and T. Barriere, "Modeling of mechanical behavior of amorphous solids undergoing fatigue loadings, with application to polymers," *Comput Struct*, vol. 199, pp. 57–73, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSTRUC.2018.01.010.
- [83] A. J. Lesser, "Fatigue Behavior of Polymers," in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002. doi: 10.1002/0471440264.pst127.
- [84] J. L. Chaboche, "Thermodynamic formulation of constitutive equations and application to the viscoplasticity and viscoelasticity of metals and polymers," *Int J Solids Struct*, vol. 34, no. 18, pp. 2239–2254, Jun. 1997, doi: 10.1016/S0020-7683(96)00162-X.
- [85] C. Dreistadt, A. S. Bonnet, P. Chevrier, and P. Lipinski, "Experimental study of the polycarbonate behaviour during complex loadings and comparison with the Boyce, Parks and Argon model predictions," *Mater Des*, vol. 30, no. 8, pp. 3126–3140, Sep. 2009, doi: 10.1016/J.MATDES.2008.11.028.
- [86] S.-H. Park, C.-M. Park, J.-H. Kim, T. Kim, and S. Electronics, "Derivation of Fatigue Properties of Plastics and Life Prediction for Plastic Parts."
- [87] A. Jain, J. M. Veas, S. Straesser, W. Van Paepegem, I. Verpoest, and S. V. Lomov, "The Master SN curve approach – A hybrid multi-scale fatigue simulation of short fiber reinforced composites," *Compos Part A Appl Sci*

- Manuf*, vol. 91, pp. 510–518, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2015.11.038.
- [88] P. K. Mallick and Y. Zhou, “Effect of mean stress on the stress-controlled fatigue of a short E-glass fiber reinforced polyamide-6,6,” *Int J Fatigue*, vol. 26, no. 9, pp. 941–946, Sep. 2004, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2004.02.003.
- [89] M. Kawai and Y. Matsuda, “Anisomorphic constant fatigue life diagrams for a woven fabric carbon/epoxy laminate at different temperatures,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 43, no. 4, pp. 647–657, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2012.01.009.
- [90] M. Kawai, “A phenomenological model for off-axis fatigue behavior of unidirectional polymer matrix composites under different stress ratios,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 35, no. 7–8, pp. 955–963, Jul. 2004, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2004.01.004.
- [91] M. De Monte, E. Moosbrugger, and M. Quaresimin, “Influence of temperature and thickness on the off-axis behaviour of short glass fibre reinforced polyamide 6.6 – cyclic loading,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 41, no. 10, pp. 1368–1379, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2010.02.004.
- [92] J. A. Epaarachchi and P. D. Clausen, “An empirical model for fatigue behavior prediction of glass fibre-reinforced plastic composites for various stress ratios and test frequencies,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 34, no. 4, pp. 313–326, Apr. 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(03)00052-6.
- [93] S. Mortazavian and A. Fatemi, “Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites: A literature review,” *Int J Fatigue*, vol. 70, pp. 297–321, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2014.10.005.
- [94] Q. C. P. Bourgogne, V. Bouchart, and P. Chevrier, “Prediction of the Wöhler curves of short fibre reinforced composites considering temperature and water absorption,” *Mater Today Commun*, vol. 33, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104655.
- [95] M. Kawai and M. Koizumi, “Nonlinear constant fatigue life diagrams for carbon/epoxy laminates at room temperature,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 38, no. 11, pp. 2342–2353, Nov. 2007, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2007.01.016.



- [96] J. S. Bergström and J. E. Bischoff, "An Advanced Thermomechanical Constitutive Model for UHMWPE," *International Journal of Structural Changes in Solids*, vol. 2, no. 1, pp. 31–39, 2010.
- [97] A. Pineau, "Practical Application of Local Approach Methods," *Comprehensive Structural Integrity*, vol. 7, pp. 177–225, 2003.