



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI  
PROTECȚIEI SOCIALE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
CERCETĂRII  
TÎNERETULUI  
ȘI SPORTULUI

OIPOS DRU



Universitatea  
"POLITEHNICA"  
din Timișoara

Titlul proiectului: „**Racordarea programelor de studii doctorale la studiile doctorale europene**”  
POSDRU/6/1.5/S/13; ID proiect 6998

Ing. **Emanoil LINUL**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **STUDIUL FACTORILOR CARE INFLUENȚEAZĂ PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE SPUMELOR POLIURETANICE RIGIDE**

**Conducator stiintific**  
Prof.dr.ing. **Liviu MARȘAVINA**

**UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MECANICĂ**

**2011**

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MECANICĂ  
CATEDRA DE REZISTENȚA MATERIALELOR

# TEZĂ DE DOCTORAT

ING. EMANOIL LINUL

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:  
PROF. UNIV. DR. ING. LIVIU MARȘAVINA

TIMIȘOARA, 2011

# **STUDIUL FACTORILOR CARE INFLUENȚEAZĂ PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE SPUMELOR POLIURETANICE RIGIDE**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul "INGINERIE MECANICĂ"  
de către

**ing. Emanoil LINUL**

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Liviu MARȘAVINA  
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Mihail HĂRDĂU  
prof.univ.dr.ing. Dan Mihai CONSTANTINESCU  
prof.univ.dr.ing. Nicolae FAUR

Ziua susținerii tezei: 09.09.2011

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2011

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Facultății de Mecanică, Departamentul de Mecanică și Rezistența Materialelor din Universitatea „Politehnica” Timișoara.

Lucrarea de față abordează un subiect de mare actualitate și a fost concepută și realizată cu scopul rezolvării unor probleme ce privesc comportarea mecanică a materialelor celulare. Studiile elaborate pe parcursul tezei s-au concentrat pe caracterizarea mecanică a spumelor poliuretanică rigide și a materialelor de tip sandwich cu miez din spuma, utilizându-se cele mai noi teorii și procedee de calcul.

Prin prezenta teză se deschid noi posibilități de aplicare a materialelor celulare și consider că lucrarea este un suport științific de luat în seamă pentru cercetările viitoare care vor avea ca subiect de pornire tematică proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanică.

Sunt conștient că finalizarea unei teze de doctorat, prin care se încheie o etapă importantă din pregătirea mea profesională, nu reprezintă doar munca și efortul meu, ci se datorează și celor care m-au ajutat și mi-au fost alături, cu care, pot să spun că am format o echipă, o familie pe plan profesional.

Acestor oameni minunați care mi-au dăruit informație și afecțiune, care și-au rupt din timpul lor pentru a-mi fi de ajutor mie, doresc să le aduc recunoștința mea și mă tem că-mi vor fi sărace cuvintele în raport cu efortul domnilor lor.

Distinse mulțumiri și profundă recunoștință se cuvin adresate Domnului Profesor Doctor Inginer **Liviu MARȘAVINA** inițiatorul acestei teze, pentru consilierea permanentă, sprijinul necondiționat și îndrumarea atentă de-a lungul celor trei ani a stagiului de doctorat.

Adresez mulțumiri deosebite Domnului Profesor Doctor Inginer **Tomasz SADOWSKI** șeful Departamentului de Construcții și Arhitectură cât și Domnului Inginer **Marcin KNEĆ** șeful de laborator al aceluiași departament pentru ajutorul competent și susținerea constantă pe parcursul stagiului de cercetare desfășurat la Universitatea Tehnică din Lublin, Polonia.

Mulțumesc, de asemenea membrilor comisiei de doctorat, în persoanele domnilor prof. dr. ing. **Mihail HĂRDĂU**, prof. dr. ing. **Dan CONSTANTINESCU** și **prof. dr. ing. Nicolae FAUR** în calitate de referenți ai lucrării și domnului decan prof. dr. ing. **Liviu BERETEU** în calitate de președinte al comisiei.

De asemenea, îmi manifest cu drag recunoștința față de **familia mea** atât pentru suportul moral și spiritual, cât și pentru răbdarea și înțelegerea acordată în toți acești ani, când de multe ori am fost nevoit să acord prioritate muncii mele profesionale, familia căzând pe locul doi.

De aceea pot să spun că succesul meu este și succesul dumneavoastră.

Vă mulțumesc !

Timișoara, septembrie 2011

Autorul

„Provocarea mea a fost, nu să fac  
imposibilul ci să învăț să  
trăiesc cu posibilul”

Sue Bender

Lucrarea de față o dedic părinților mei **LINUL Ioan și Saveta** pentru încrederea și răbdarea de care au dat dovadă ori de câte ori a fost nevoie cât și pentru faptul că mi-au fost alături în tot acest timp și fără de care, cu siguranță nu aș fi avut tăria să finalizez lucrarea.

În tot acest timp am învățat că lucrurile complicate sunt întotdeauna simple, iar cele simple sunt complicate numai atunci când nu le ști.

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din grantul strategic POSDRU/6/1.5/S/13, ID6998, cofinanțat din Fondul Social European "Investește în oameni", în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltare Resurse Umane 2007-2013".

Linul, Emanoil

**Studiul factorilor care influențează proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanic rigide**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 97, Editura Politehnica, 2011, 312 pagini, 199 figuri, 60 tabele.

ISSN:1842-4937

ISBN: 978-606-554-326-3

Cuvinte cheie:

materiale celulare, densitate, tenacitate la rupere, viteză și temperatură de încercare, plan de formare, efect de scară, încercări experimentale, metoda elementului finit, modele micromecanice, grinzi de tip sandwich, diagramă de degradare.

Rezumat:

Teza de doctorat cu titlul „*Studiul factorilor care influențează proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanic rigide*”, abordează un subiect de mare actualitate și a fost concepută și realizată cu scopul rezolvării unor probleme ce privesc comportarea mecanică a materialelor celulare. Studiile elaborate pe parcursul tezei de doctorat s-au concentrat pe caracterizarea mecanică a spumelor poliuretanic rigide și a materialelor de tip sandwich cu miez din spuma, utilizându-se cele mai noi teorii și procedee de calcul.

## CUPRINS

<b>Prefață .....</b>	<b>10</b>
<b>Listă figuri .....</b>	<b>18</b>
<b>Listă tabele.....</b>	<b>28</b>
<b>Notații, abrevieri, acronime.....</b>	<b>31</b>
<b>Cuprinsul comentat .....</b>	<b>38</b>
<b>1. Stadiul actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare ...</b>	<b>47</b>
<b>1.1. Prezentarea materialelor celulare .....</b>	<b>47</b>
<b>1.2. Tehnologia de fabricare a spumelor .....</b>	<b>48</b>
1.2.1. Noțiuni generale.....	49
1.2.2. Clasificarea spumelor poliuretanică .....	51
1.2.3. Procesele de realizare a spumelor poliuretanică .....	52
<b>1.3. Structura solidelor celulare .....</b>	<b>54</b>
1.3.1. Noțiuni generale.....	54
1.3.2. Structura celulară a materialelor celulare .....	55
1.3.3. Forma, mărimea și topologia celulelor .....	58
1.3.4. Calculul densității relative.....	62
<b>1.4. Proprietățile materialelor celulare de tipul spumelor poliuretanică rigide .....</b>	<b>65</b>
1.4.1. Noțiuni generale.....	65
1.4.2. Prezentarea și definirea proprietăților .....	66
1.4.2.1. Proprietăți generale.....	67
1.4.2.2. Proprietăți mecanice.....	67
1.4.2.3. Proprietăți termice .....	70
<b>1.5. Aplicații ale materialelor celulare.....</b>	<b>71</b>
1.5.1. Izolarea termică.....	72
1.5.2. Ambalarea .....	73
1.5.3. Utilizarea în construcții.....	74
1.5.4. Utilizarea pentru plutire.....	76
1.5.5. Alte aplicații .....	76
1.5.6. Avantajele utilizării spumei poliuretanică rigide.....	77
<b>2. Modele micromecanice pentru caracterizarea materialelor celulare</b>	<b>79</b>
<b>2.1. Introducere.....</b>	<b>79</b>
<b>2.2. Mecanismele de deformare în spume .....</b>	<b>80</b>
<b>2.3. Proprietățile mecanice ale spumelor: Compresiunea.....</b>	<b>82</b>
2.3.1. Zona liniar-elastică .....	82

2.3.1.1. Spume cu celule deschise .....	83
2.3.1.2. Spume cu celule închise.....	86
2.3.2. Zona neliniară - elastică și densificarea .....	90
2.3.2.1. Spumele cu celule deschise .....	90
2.3.2.2. Spume cu celule închise.....	91
2.3.2.3. Densificarea .....	93
2.3.3. Colapsul plastic și densificarea .....	93
2.3.3.1. Spume cu celule deschise .....	93
2.3.3.2. Spume cu celule închise.....	94
2.3.3.3. Densificarea .....	96
<b>2.4. Proprietățile mecanice ale spumelor: Întinderea .....</b>	<b>96</b>
2.4.1. Zona liniară-elastică .....	96
2.4.2. Zona neliniară - elastică.....	96
2.4.3. Colapsul plastic.....	97
2.4.4. Ruperea fragilă a spumelor .....	97
2.4.4.1. Noțiuni de bază despre mecanica rupei liniară elastică .....	97
2.4.4.2. Modele micromecanice.....	102
<b>3. Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanic.....</b>	<b>107</b>
<b>3.1. Considerații generale .....</b>	<b>107</b>
<b>3.2. Identificarea tipului de spumă .....</b>	<b>109</b>
3.2.1. Determinarea densității .....	109
3.2.2. Analiza microstructurală a spumelor înainte de efectuarea testelor.....	110
<b>3.3. Determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune .....</b>	<b>113</b>
3.3.1. Determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune în regim static.....	114
3.3.1.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate.....	114
3.3.1.2. Definierea proprietăților și determinarea lor experimentală .....	115
3.3.1.3. Rezultate experimentale obținute .....	118
3.3.2. Determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune în regim dinamic .....	127
3.3.2.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate.....	127
3.3.2.2. Rezultate experimentale obținute .....	128
3.3.3. Compararea între parametrii statici și cei dinamici la solicitarea de compresiune.....	132
<b>3.4. Determinarea caracteristicilor mecanice la tracțiune .....</b>	<b>135</b>
3.4.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate .....	136
3.4.2. Rezultate experimentale obținute .....	137
<b>3.5. Determinarea tenacității la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte pe epruvete crestate .....</b>	<b>140</b>
3.5.1. Determinarea tenacității la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte în regim static .....	142
3.5.1.1. Descrierea mașinii de încercat .....	143
3.5.1.2. Rezultate experimentale obținute .....	146
3.5.1.3. Compararea între rezultatele obținute ale tenacității la rupere și bibliografie .....	155
3.5.2. Determinarea tenacității la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte în regim dinamic .....	156



3.5.2.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate.....	156
3.5.2.2. Rezultate experimentale obținute .....	157
3.5.3. Comparație între tenacitatea la rupere statică și cea dinamică .....	160
<b>3.6. Analiza microstructurală a suprafețelor de rupere rezultate în urma încercărilor de compresiune și încovoiere în trei puncte .....</b>	<b>160</b>
3.6.1. Analiza microstructurală rezultată în urma testelor de compresiune ....	160
3.6.2. Analiza microstructurală rezultată în urma testelor de încovoiere în trei puncte .....	164
<b>4. Estimarea proprietăților mecanice ale materialelor celulare folosind metode analitice și numerice.....</b>	<b>173</b>
<b>4.1. Analiza proprietăților mecanice ale materialelor celulare la compresiune folosind metode analitice .....</b>	<b>173</b>
4.1.1. Noțiuni generale.....	173
4.1.2. Modele micromecanice .....	174
4.1.2.1. Modelul Gibson-Ashby .....	174
4.1.2.2. Modelul Gibson-Ashby modificat.....	175
4.1.2.3. Modelul Rusch .....	176
4.1.2.4. Modelul Avalle .....	177
4.1.3. Obținerea curbelor tensiune-deformație cu ajutorul modelelor micromecanice.....	178
<b>4.2. Analiza cu elemente finite pentru determinarea tenacității la rupere a materialelor celulare .....</b>	<b>180</b>
4.2.1. Noțiuni generale.....	180
4.2.2. Modele micromecanice cu elemente finite pentru determinarea tenacității la rupere.....	183
4.2.2.1. Prezentarea modelelor micromecanice utilizate .....	183
4.2.2.2. Studiul de convergență și influența lungimii fisurii.....	187
4.2.2.3. Determinarea tenacității la rupere prin Modul I de încărcare .....	189
4.2.2.4. Determinarea tenacității la rupere prin Modul II de încărcare.....	191
4.2.3. Rezultate și discuții.....	193
<b>4.3. Comparație între modelele micromecanice și rezultatele experimentale.....</b>	<b>195</b>
4.3.1. Comparație între modelele micromecanice și rezultatele experimentale obținute la compresiune .....	195
4.3.2. Comparație între modelele micromecanice și rezultatele experimentale privind tenacitatea la rupere .....	198
<b>5. Absorbția de energie în materialele celulare .....</b>	<b>200</b>
<b>5.1. Noțiuni generale .....</b>	<b>200</b>
<b>5.2. Mecanismele energiei de absorbție .....</b>	<b>201</b>
5.2.1. Platoul de absorbție în spumele cu celule deschise .....	203
5.2.2. Disiparea vâscoasă în spumele cu celule deschise .....	203
5.2.3. Comprimarea fluidului din porii spumelor cu celule închise.....	204
<b>5.3. Metode în caracterizarea energiei de absorbție în spume .....</b>	<b>204</b>
5.3.1. Coeficientul lui Janssen, $J$ .....	205
5.3.2. Coeficientul de amortizare .....	205
5.3.3. Curba lui Rusch.....	207

<b>5.4. Diagramele de absorbție a energiei.....</b>	<b>207</b>
5.4.1. Construcția diagramelor .....	207
5.4.2. Modelarea diagramelor de absorbție a energiei .....	209
5.4.2.1. Spume elastomerice cu celule deschise .....	209
5.4.2.2. Spume elastomerice cu celule închise .....	212
<b>5.5. Rezultate experimentale obținute .....</b>	<b>214</b>
<b>6. Caracterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare .....</b>	<b>220</b>
<b>6.1. Noțiuni generale .....</b>	<b>220</b>
<b>6.2. Aplicații ale construcțiilor de tip sandwich .....</b>	<b>221</b>
<b>6.3. Rigiditatea structurilor de tip sandwich .....</b>	<b>224</b>
6.3.1. Rigiditatea echivalentă la încovoiere.....	226
6.3.2. Rigiditatea echivalentă la forfecare .....	227
6.3.2.1. Metoda Clasică .....	227
6.3.2.2. Metoda Exactă.....	228
6.3.2.3. Metoda Aproximativă.....	229
<b>6.4. Rezistența structurilor de tip sandwich.....</b>	<b>230</b>
6.4.1. Teoria rezistenței sandwich-urilor .....	230
6.4.2. Modurile de rupere în materialele de tip sandwich .....	233
6.4.2.1. Curgerea feței .....	233
6.4.2.2. Încrêțirea feței .....	233
6.4.2.3. Forfecarea miezului .....	234
6.4.2.4. Delaminarea .....	235
6.4.2.5. Identarea miezului .....	236
<b>6.5. Analiza experimentală a grinzilor de tip sandwich solicitate la încovoiere în trei puncte .....</b>	<b>236</b>
6.5.1. Descrierea procedurii experimentale și prezentarea epruvetelor pentru teste .....	236
6.5.2. Rezultate obținute în cadrul încercărilor experimentale .....	238
6.5.3. Analiza datelor.....	241
<b>6.6. Diagramele de degradare.....</b>	<b>245</b>
6.6.1. Principii de bază în descrierea diagramelor de rupere.....	245
6.6.2. Obținerea diagramelor de rupere .....	247
<b>6.7. Comparație între analiza experimentală și analitică a grinzilor de tip sandwich.....</b>	<b>251</b>
6.7.1. Prezentarea detaliată a mecanismului de rupere .....	251
6.7.2. Comparație experimental-analitic privind estimarea rigidității echivalente a grinzilor tip sandwich .....	252
<b>7. Concluzii, contribuții personale .....</b>	<b>255</b>
<b>7.1. Concluzii .....</b>	<b>255</b>
<b>7.2. Contribuții personale.....</b>	<b>263</b>
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>264</b>
<b>ANEXE .....</b>	<b>278</b>

---

<b>A.I. Rezultatele încercărilor experimentale de compresiune statică.....</b>	<b>278</b>
<b>A.II. Rezultatele încercărilor experimentale de compresiune dinamică</b>	<b>282</b>
<b>A.III. Rezultatele încercărilor experimentale de tracțiune .....</b>	<b>288</b>
<b>A.IV. Determinarea experimentală a tenacității la rupere în regim static .....</b>	<b>289</b>
<b>A.V. Determinarea experimentală a tenacității la rupere în regim dinamic .....</b>	<b>295</b>
<b>A.VI. Determinarea numerică a tenacității la rupere cu ajutorul modelelor micromecanice.....</b>	<b>296</b>
<b>A.VII. Caracterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare .....</b>	<b>301</b>

## Prefață

### Actualitatea și importanța temei de cercetare abordată în teza de doctorat

La ora actuală materialele celulare sunt tot mai utilizate în industrii de vârf ca aeronautică, auto (de exemplu companiile Spumotim, TRW, ContiTech din zona de Vest a țării). Materialele celulare au capacitate ridicată de deformare la compresiune prezentând un palier de curgere și fenomenul de densificare pe când la tracțiune au o comportare fragilă.

Tendențele actuale în studiul comportării materialelor celulare sunt:

- o găsirea unor metode micromecanice de predicție a proprietăților mecanice a materialelor celulare.

- o identificarea experimentală a proprietăților mecanice a spumelor și materialelor celulare prin încercări la compresiune, tracțiune, încovoiere, forfecare cu sarcinile aplicate static sau dinamic prin șoc sau variabil.

- o investigarea factorilor ce influențează proprietățile mecanice ale materialelor celulare densitatea, morfologia celulelor, viteza de încărcare, direcția de formare, temperatura, mărimea epruvetelor, etc.

- o extinderea conceptelor de Mecanica Ruperii la materialele celulare. Aceasta a cunoscut o dezvoltare rapidă după catastrofa aviatică a navetei Columbia, petrecută în Texas în Februarie 2003, atunci când la reintrarea în atmosferă s-a dezintegrat, cauza principală fiind desprinderea unei porțiuni din învelișul termic al rezervorului, realizat din spumă.

Importanța și actualitatea temei este reliefată și de numărul mare de articole științifice publicate și indexate în bazele de date ale editurilor de prestigiu: ScienceDirect - Elsevier peste 40000, respectiv SpringerLink 7600 de articole pentru o căutare după "foam behavior".

Conferințele internaționale în domeniul Mecanicii ruperii: International Conference on Fracture: ICF 11 Torino, Italia 2005 și ICF 12 Ottawa, Canada 2009, precum și cele europene European Conference on Fracture 16 Alexandropoulis, Grecia 2006, ECF 17 Brno, Republica Cehă, 2008 și ECF 18 Dresda, Germania la care am participat au avut secțiuni speciale dedicate comportării la rupere a materialelor celulare.

În acest context teza intitulată *STUDIUL FACTORILOR CARE INFLUENȚEAZĂ PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE SPUMELOR POLIURETANICE RIGIDE* se înscrie în tendințele actuale privind investigarea factorilor ce influențează proprietățile mecanice ale materialelor celulare.

### Aprecieri asupra conținutului tezei

Teza este structurată pe 7 capitole, împreună cu o bogată bibliografie ce include 261 titluri bibliografice. De asemenea, mai conține 199 figuri, 60 tabele, 207 ecuații și relații de calcul. În ceea ce urmează este prezentată o succintă analiză a conținutului capitolelor tezei, împreună cu aprecieri asupra rezultatelor principale, respective asupra contribuțiilor personale ale doctorandului.

**Capitolul 1** intitulat **Stadiul actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare** este organizat pe 5 subcapitole. În subcapitolul 1.1 se face o prezentare a materialelor celulare. Subcapitolul 1.2 intitulat tehnologia de fabricare a spumelor, o clasificare a spumelor poliuretanică și procedeele de elaborare a acestora.

Subcapitolul 1.3 prezintă structura solidelor celulare, forma, mărimea și topologia celulelor și tratează modul de calcul a densității relative. În subcapitolul 1.4 se prezintă principalele proprietăți mecanice ale materialelor celulare de tipul spumelor poliuretanică evidențiind importanța densității asupra modulului de elasticitate longitudinal, a rezistenței la rupere și a tenacității la rupere. În subcapitolul 1.5 sunt prezentate principalele aplicații în care se utilizează materialele celulare și avantajele spumelor poliuretanică rigide.

**Capitolul 2** intitulat **Modele micromecanice pentru caracterizarea materialelor celulare** este dedicat metodelor micromecanice pentru predicția proprietăților mecanice. Sunt prezentate în subcapitolul 2.2 mecanismele de deformare în spume, apoi se prezintă stadiul actual al utilizării modelelor micromecanice pentru compresiunea, tracțiunea și ruperea materialelor celulare.

Determinărilor experimentale ale caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanică le este dedicat **Capitolul 3**. S-au realizat încercări experimentale pe 11 tipuri de spume poliuretanică rigide având diferite densități. Spumele au fost obținute din diferite surse, sub forma de plăci sau panouri de tip sandwich. O parte dintre acestea au fost furnizate de firmele Spumotim S.A. și TRW Automotive

Timișoara, care produc spume pentru industria auto. Trebuie menționat faptul că pentru cele 11 densități ale spumelor nu se cunosc tenacitatea la rupere și nici influența temperaturii, vitezei de încărcare, direcția planului de formare sau efectul de scară asupra comportării mecanice. Spumele au fost analizate după un program de încercări complet și bine elaborat. Încercările statice s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor "Ștefan Nădășan" din cadrul Universității POLITEHNICA din Timișoara, pe când încercările dinamice au avut loc în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității Tehnice din Lublin, Polonia.

Încercările mecanice de compresiune ale spumelor s-au realizat în două regimuri: static și dinamic, determinându-se caracteristicile mecanice la compresiune (modulul de elasticitate, limita de curgere, tensiunea de platou și valoarea deformației corespunzătoare densificării) și curbele tensiune-deformație. Odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice. S-au investigat și efectul altor factori asupra comportării la compresiune. Astfel, s-a constatat că viteza de încărcare prezintă o influență scăzută asupra proprietăților la compresiune. Direcția de încărcare are o influență semnificativă asupra proprietăților mecanice la compresiune, acest lucru punând în evidență aspectul anizotrop al spumei. Efectul de scară are o influență relativ mică asupra caracteristicilor mecanice la compresiune. La temperatura ambiantă, (20 și 60°C), comportamentul spumei este aproximativ același, în timp ce la temperaturi ridicate, (100°C), spumele prezintă o schimbare semnificativă a proprietăților.

Încercările la tracțiune, prezentate în subcapitolul 3.4 au reliefat importanța densității spumelor asupra modulului de elasticitate longitudinal și a rezistenței la rupere.

În subcapitolul 3.5 se prezintă determinarea tenacității la rupere la sollicitarea de încovoiere în trei puncte pe epruvete cu creștături. Odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a tenacității la rupere. Spumele poliuretanică rigide prezintă o rupere fragilă, fără deformații plastice. Viteza de încărcare și planul de formare nu au prezentat influențe majore asupra tenacității la rupere. Studiul efectului de scară, important pentru extrapolarea datelor din laborator la structuri reale de dimensiuni mari, reprezintă o contribuție originală. S-a constatat că modificarea dimensiunilor epruvetelor influențează tenacitatea la rupere a spumei. Toate epruvetele au avut aceeași grosime  $B=20$  mm, variind raportul lungime/lățime de 5:2. Lățimile probelor au fost  $W=5.33$ ,  $36.89$  și  $256$  mm,

iar tenacitatea la rupere crește odata cu creșterea dimensiunilor probei astfel: 0.048, 0.093 respectiv 0.165 MPa m<sup>0.5</sup>.

De asemenea s-au efectuat încercări dinamice de încovoiere în trei puncte pe epruvete cu crestături.

În finalul capitolului se face o analiză microscopică interesantă a suprafețelor de rupere după încercările de compresiune și încovoiere în trei puncte, indicând modurile de degradare a celulelor sub acțiunea diferitelor solicitări.

**Capitolul 4** intitulat **Estimarea proprietăților mecanice ale materialelor celulare folosind metode analitice și numerice** prezintă metode micromecanice analitice și numerice pentru predicția proprietăților mecanice.

În Subcapitolul 4.1 s-au prezentat principalele modele micromecanice folosite pentru descrierea comportării la compresiune a spumelor poliuretanică: modelul Gibson-Ashby, Rusch, Avallé și modelul Gibson-Ashby modificat.

Subcapitolul 4.2 introduce modele solide 2D pentru determinarea tenacității la rupere folosind metoda elementelor finite. Utilizând programul Franc 2D s-a realizat o predicție a tenacității la rupere pentru modurile I și II de rupere punând condiția ca ruperea fragilă a spumei se produce atunci când tensiunea în peretele primei celule nefisurate atinge valoarea rezistenței la rupere a materialului solid. S-a realizat un studiu de convergență în scopul găsirii numărului optim de celule al modelului, respectiv s-a studiat influența lungimii fisurii.

Subcapitolul 4.3 prezintă o comparație a parametrilor mecanici obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei obținuți în urma programului experimental.

Teoretic, plecând de la proprietățile solidului și densitatea spumei, se pot obține caracteristicile spumei studiate (modulul de elasticitate, tensiunea de curgere, tensiunea de platou și densificarea). Pentru aceeași densitate a spumei, s-a constatat că odată cu schimbarea direcției de încărcare se obține un comportament diferit, rezultând totodată proprietăți diferite. Valorile estimate ale parametrilor obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice sunt validate de către rezultatele obținute în urma încercărilor experimentale.

De asemenea, s-a prezentat o comparație între rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I estimate cu ajutorul modelelor micromecanice prin analiză cu elemente finite și rezultatele experimentale proprii și din bibliografie, obținându-se o corelare foarte bună, ceea ce validează estimările numerice.

În **Capitolul 5** intitulat **Absorbția de energie în materialele celulare** s-a realizat un studiu al absorbției de energie în materialele celulare pe baza diagramele de absorbție. Sunt prezentate mecanismele absorbției de energie (subcapitolul 5.2) și metodele de caracterizare a absorbției de energie în spume (subcapitolul 5.3): coeficientul lui Janssen, coeficientul de amortizare, curba lui Rusch și apoi diagramele de absorbție a energiei (subcapitolul 5.4). Subcapitolul 5.5 prezintă contribuții originale ale autorului privind evaluarea absorbției de energie a unor spume poliuretactice rigide pe baza încercărilor experimentale realizate la Universitatea Tehnică din Lublin, Polonia. Utilizând o instalație Dynatup – Instron s-au realizat încercări de compresiune dinamică pe spume rigide de diferite densități (40, 80 și 140 kg/m<sup>3</sup>) la diferite temperaturi. Rezultatele experimentale arată că spuma având densitatea de 80 kg/m<sup>3</sup> are capacitatea cea mai ridicată de a absorbi energie, respectiv cea mai mare eficiență energetică.

Ca și aplicație a utilizării materialelor celulare în **capitolul 6** se face caracterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare.

S-au prezentat ecuațiile clasice de determinare a rigidității echivalente la încovoiere și forfecare, iar pe lângă aceste ecuații s-au introdus noi relații de calcul a parametrilor amintiți. O comparație între rezultatele experimentale și analitice a acestor grinzi atât pe baza ecuațiilor clasice cât și pe baza noilor relații de calcul, este prezentată în subcapitolul 6.7. Se poate observa că noile relații sunt în concordanță atât cu rezultatele experimentale cât și cu cele analitice, ceea ce înseamnă ca noile relații de calcul sunt verificate și validate.

Evaluarea tipului de degradare a structurilor tip sandwich s-a realizat pe baza diagramelor de degradare pentru șase tipuri de compozite tip sandwich: fețe de aluminiu și miez de plută, fețe de aluminiu și miez de spumă, fețe din Stratimat și miez de spumă, fețe din epoxi și miez de spumă, respectiv fețe din poliester și miez de spumă. Construirea diagramelor de degradare s-a realizat luând în considerare diferite moduri de rupere (încrêțirea fețelor, forfecarea miezului și ruperea feței), diferite grosimi ale fețelor și diferite densități ale miezului. Testele experimentale realizate prin încovoiere în trei puncte confirmă mecanismele de rupere estimate pe baza diagramelor de degradare.

**Capitolul 7** este dedicat concluziilor și contribuțiilor originale dintre care remarcăm:



- Elaborarea unei sinteze documentare pe baza celor mai noi cercetări în domeniu cu referire la stadiul actual în analiza comportamentului mecanic al materialelor celulare de tipul spumelor poliuretanică rigide și a materialelor de tip sandwich cu miez de spumă.
- Realizarea unor epruvete din spumă poliuretanică de diferite densități prin alegerea concentrației celor două componente, (poliol și poliisocianat).
- În Capitolului 2 este prezentat comportamentul spumelor la diferite solicitări, respectiv mecanismele de deformare în spume și modelele micromecanice utilizate pentru caracterizarea materialelor celulare.
- Elaborarea unui program experimental pentru determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune și tracțiune, respectiv a tenacității la rupere pe epruvete crestate, atât în regim static cât și în regim dinamic.
- Încercările experimentale efectuate la solicitarea de compresiune statică și dinamică au permis studierea influenței densității, vitezei de încărcare, planului de formare, efectului de scară și influența temperaturii asupra proprietăților mecanice ale spumelor poliuretanică.
- Pentru solicitarea la tracțiune a spumelor poliuretanică s-a determinat experimental modulul de elasticitate longitudinal, rezistența la rupere cât și o valoare medie a coeficientului lui Poisson.
- În cadrul solicitării de încovoiere în trei puncte pe epruvete cu creștătură laterală s-a studiat influența densității, vitezei de încărcare, planului de formare și efectul de scară asupra tenacității la rupere atât la solicitări statice cât și la solicitări dinamice.
- Determinarea curbelor tensiune-deformație la compresiune a spumelor poliuretanică cu ajutorul modelor micromecanice Gibson-Ashby și Gibson-Ashby Modificat.
- Cu ajutorul programului de analiză cu elemente finite Franc 2D, s-au propus două modele micromecanice solide cu elemente finite bidimensionale pentru estimarea tenacității la rupere pentru Modul I, respectiv Modul II de rupere.
- S-a realizat un studiu al absorbției de energie în materialele celulare privind mecanismele de absorbție și metodele de caracterizare a energiei de absorbție, iar în cele din urmă s-au trasat diagramele de absorbție.
- Realizarea unui program de calcul analitic pentru proiectarea materialelor compozite de tip sandwich.

- Aplicarea conceptului de "*diagramă a degradării*" pentru stabilirea modului de rupere în vederea proiectării și optimizării structurilor compozite de tip sandwich.
- S-au propus două ecuații de estimare a rigidității echivalente la forfecare, respectiv o comparație analitico-experimentală a rezultatelor

### Aprecieri asupra activității doctorandului

Pentru elaborarea tezei de doctorat dl. ing. Emanoil Linul a efectuat un stagiul de cercetare de trei luni la Lublin University of Technology, POLONIA (2011). Lucrul alături de cercetători cu experiență precum Prof.dr.ing. Tomasz Sadowski, antrenarea cu entuziasm necondiționat în proiectele și contractile derulate în cadrul colectivului, lucrul în echipă cu alți doctoranzi sau cercetători post-doctorali, reprezintă în opinia subsemnatului cheia succesului unui program comprimat practice în trei ani. În primul rând este de remarcat seriozitatea și tenacitatea de care a dat dovadă atât în anii de studenție cât și ca doctorand. Ambiția lucrului bine făcut, și dorința continuă de completare a cunoștințelor dublată de aplicarea lor în diversele etape ale programului de cercetare îl caracterizează și îl definesc pe Dl. Linul. În al doilea rând, trebuie menționat mediul de cercetare extrem de favorabil în care și-a desfășurat activitatea drd.ing. Emanoil Linul. Încă din studenție s-a integrat în colectivul Catedrei de Rezistența Materialelor din cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara, participând faza națională a Concursului Profesional Studențesc „C.C. Teodorescu” la disciplina „Rezistența Materialelor” desfășurată la Târgu – Mureș, 2005.

În cadrul tezei de doctorat s-au efectuat încercări experimentale în regim static și dinamic (compresiune, tracțiune, tenacitate de rupere) pe 11 tipuri de spume poliuretanică rigide, respectiv pe 6 combinații de materiale compozite tip sandwich.

De asemenea s-au investigat numeric pentru estimarea tenacității la rupere peste 200 de modele micromecanice 2D solide pentru diferite densități, lungimi de fisuri, număr de celele și materiale. Doctorandul arată o bună cunoaștere a metodelor experimentale de testare a materialelor celulare și a metodelor numerice de analiză cu elemente finite.

În final apreciez că teza de doctorat elaborată de domnul ing. Emanoil LINUL intitulată *STUDIUL FACTORILOR CE INFLUENȚEAZĂ PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE SPUMELOR POLIURETANICE RIGIDE*, face dovada unei bune pregătiri în domeniile:

---

rezistența materialelor, încercarea materialelor, mecanica ruperii și analiza numerică a tensiunilor. Pe parcursul perioadei de stagiul la doctorat, a reușit să ajungă la un înalt nivel de pregătire științifică, care i-a permis să îmbine în mod creator domeniile enumerate mai sus pentru a studia factorii ce influențează comportarea mecanică a materialelor celulare. Autorul propune corelații originale privind factorii ce influențează proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanică rigide.

Principalele rezultate obținute au fost diseminate în două jurnale din circuitul ISI (Materiale Plastice și Iranian Polymer Journal), în ISI proceedings (Key Engineering Materials și Solid State Phenomena), respectiv la conferințe internaționale (European Conference on Fracture, Dresda 2010, International Conference on Computer Methods in Mechanics, Varsovia, 2011, International Conference on Composite Structures, Porto 2011) dar și la conferințe naționale în domeniu ARTENS 2010 (Cluj – Napoca) și Simpozionul Național de Mecanica Ruperii (Sibiu 2009 și Ploiești 2010).

Prof.dr.ing. Liviu MARȘAVINA  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara

## Listă figuri

### Cap. 1-Stadiul actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
1.1.	Exemple de solide celulare: a) formă bidimensională tip fagure de miere; b) formă tridimensională de spumă cu celule deschise; c) formă tridimensională de spumă cu celule închise.	48
1.2.	Comparația între un solid cu pori izolați (a) și un solid celular (b)	48
1.3.	Tehnici de fabricare a spumei: a) spumă bloc prin turnare, b) pulverizarea spumei c) compozite din spumă	50
1.4.	Mecanismul de realizare al spumei	50
1.5.	Clasificarea spumelor poliuretanic	51
1.6.	Schematizarea diagramelor proceselor de formare a spumei. Procesul simplu.	52
1.7.	Schematizarea diagramelor proceselor de formare a spumei. Procesul semi-prepolimer (cvasi-prepolimer)	53
1.8.	Schematizarea diagramelor proceselor de formare a spumei. Procesul prepolimer	53
1.9.	Modul de obținere al spumei	54
1.10.	Structura de tip fagure de miere	55
1.11.	Materiale celulare bidimensionale: a) fagure din aluminiu, b) fagure din hârtie (rășină fenolică pe suport de hârtie), c) fagure din ceramică cu celule triunghiulare, d) fagure din ceramică cu celule pătrate, e) fagure din ceramică cu celule hexagonale, f) tipuri de faguri din ceramică.	56
1.12.	Tipuri de celule unitare: a) Tetraicaedraedrul lui Kelvin,; b) Forma celulei obținută de Weaire și Phelean	56
1.13.	Materiale celulare realizate de om: a) poliuretan cu celule deschise, b) polietilenă cu celule închise, c) nichel, d) cupru, e) zirconiu, f) multă, g) sticlă, h) o spumă polieterică atât cu celule închise cât și cu celule deschise	57
1.14.	Materiale celulare naturale: a) plută, b) balsa, c) burete, d) os spongios, e) frunză de iris, f) os de sepie, g) coral, h) tulpina unei plante	57
1.15.	Alimente de tipul spumelor: a) pâine, b) bezele, c) ciocolata, d) alimente crocante	58
1.16.	Forma celulelor în plan bidimensional: a) triunghi echilateral, b) triunghi isoscel, c) pătrat, d) paralelogram, e) hexagon regulat, f) hexagon neregulat	59
1.17.	Modul de aranjare al celulelor în plan bidimensional, utilizând triunghiuri echilaterale, (a, b); pătrare, (c, d); forma Kagom, (e); hexagoane regulate, (f); hexagoane neregulate, (g).	59

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
1.18.	Forma celulelor în plan tridimensional: a) tetraedru, b) prismă triunghiulară, c) prismă dreptunghiulară, d) prismă hexagonală, e) octaedru, f) dodecaedru rombic, g) dodecaedru pentagonal, h) tetracaidecaedru, i) icosaedru	60
1.19.	Modul de aranjare al celulelor în plan tridimensional: a) prisme triunghiulare, b) prisme dreptunghiulare, c) prisme hexagonale, d) dodecaedru rombic, f) tetracaidecaedru	61
1.20.	Evoluția în timp a materialelor ingineresti	65
1.21.	Clasificarea materialelor ingineresti	66
1.22.	Harta modulului de elasticitate longitudinal funcție de densitate pentru materialele ingineresti, ( $E=f(\rho)$ ).	68
1.23.	Harta rezistenței la rupere funcție de densitate pentru materialele ingineresti, ( $\sigma_f=f(\rho)$ ).	69
1.24.	Harta tenacității la rupere funcție de densitate pentru materialele ingineresti, ( $K_{IC}=f(\rho)$ ).	70
1.25.	Harta conductivității termice pentru materialele ingineresti	71
1.26.	Domenii de aplicație ale spumelor	72
1.27.	Echivalența rezistenței termice la diferite materiale de construcție	73
1.28.	Sistem de transport (container frigorific)	73
1.29.	Conducte preizolate cu spumă poliuretanică	73
1.30.	Privire de ansamblu asupra aplicațiilor spumei poliuretanică pentru o locuință	74
1.31.	Clădire portabilă	75
1.32.	Iaht de curse	75
1.33.	Părți din mașină realizate din spumă poliuretanică	75
1.34.	Echipamente sportive realizate din spumă poliuretanică	75
1.35.	Aplicații ale materialelor celulare : a) dopuri de sticlă, b) mese, c) pereți despărțitori	77

## **Cap. 2-Modele micromecanice pentru caracterizarea materialelor celulare**

2.1.	Curbele tensiune-deformație la compresiune, pentru: a) o spumă elastomerică, b) o spumă elasto-plastică, c) o spumă elasto-fragilă, după [Gibson și Ashby (1997)].	80
2.2.	Curbele tensiune-deformație la compresiune pentru spume: a) poliuretanică flexibile, b) polietilenă, c) polimetacrilat, d) mulită, după [Gibson și Ashby (1997)].	82
2.3.	Curbele tensiune-deformație la tracțiune, pentru o spumă: a) elastomerică, b) elasto-plastică, c) elasto-fragilă, după [Gibson și Ashby (1997)].	82

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
2.4.	Mecanismul de deformare în spume: a) spume cu celule deschise- încovoierea pereților celulei + deformare axială a pereților + curgerea fluidului dintre celule, b) spumă cu celule închise- încovoierea pereților celulei + contracția muchiilor și întinderea membranelor + presiunea gazului din celulă	83
2.5.	Modelul cubic pentru spume cu celule deschise prezentând lungimea, $l$ și grosimea, $t$ a muchiei.	84
2.6.	Celula deformată la încovoiere pe zona liniar-elastică	84
2.7.	Modelul cubic pentru spume cu celule închise prezentând lungimea celulei, $l$ ; grosimea muchiei, $t_e$ și grosimea feței, $t_f$ .	87
2.8.	Deformarea fețelor unei spume cu celule închise la o solicitare de tracțiune respectiv compresiune.	88
2.9.	Încovoierea elastică a pereților unei celule pentru o spumă cu celule deschise	90
2.10.	Formarea articulațiilor plastice în spumele cu celule deschise	93
2.11.	Întinderea plastică a fețelor unei celule pentru o spumă cu celule închise	95
2.12.	Modul de aliniere a muchiilor celulei pe durata solicitării la tracțiune	97
2.13.	Fisura cu lungimea $2a$ într-o placă solicitată la o tensiune $\sigma$	98
2.14.	Componentele tensiunii din vecinătatea fisurii	98
2.15.	Valabilitatea câmpului de tensiuni liniar elastic	99
2.16.	Variația tenacității la rupere funcție de grosimea normalizată a epruvetei	101
2.17.	Criteriul de proiectare din Rezistența Materialelor	101
2.18.	Criteriul de proiectare din Mecanica Ruperii	101
2.19.	Propagarea unei fisuri printr-o spumă fragilă cu celule deschise	102
2.20.	Forțele și momentele fisurii din spumă, după Choi și Sankar (2005).	104
<b>Cap. 3-Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanic</b>		
3.1.	Schema de principiu a programului experimental	108
3.2.	Cântar de laborator pentru determinarea greutateii probelor	110
3.3.	Microscopul electronic cu baleiaj pentru analiza microstructurală	111
3.4.	Analiza microstructurală (SEM) a spumelor poliuretanic rigide utilizate în cadrul programului experimental	113
3.5.	Forma și dimensiunile probelor pentru încercările de compresiune	113
3.6.	Imagine de ansamblu a mașinii de încercat, Walter Bay de 10 kN	114
3.7.	Epruvetele utilizate în cadrul încercărilor experimentale de compresiune	115

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
3.8.	Tipuri de curbe tensiune-deformație la compresiune pentru materialele celulare: a) curba cu caracteristica de întărire; b) curba cu caracteristica de înmuiere; c) pentru probe cu palier orizontal.	116
3.9.	Curba tensiune-deformație pentru o spumă poliuretanică prezentată în detaliu pentru definirea parametrilor studiați	116
3.10.	Spumă poliuretanică (40, 80 și 200 kg/m <sup>3</sup> ): a) Curbele uniaxiale tensiune-deformație la compresiune; b) Curbele eficiența energetică - deformație.	120
3.11.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența densității	121
3.12.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența vitezei de încărcare	122
3.13.	Modul de prelevare al epruvetelor cubice dintr-o placă	123
3.14.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența direcției de încărcare	123
3.15.	Forma și dimensiunile probelor utilizate pentru studiul secțiunii transversale	125
3.16.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența secțiunii transversale.	125
3.17.	Variația modulului de elasticitate longitudinal la compresiune funcție de densitate	126
3.18.	Variația tensiunii de curgere și a tensiunii de platou funcție de densitate	126
3.19.	Variația densificării funcție de densitate	126
3.20.	Imagine de ansamblu a mașinii de impact, Instron-Dynatup	127
3.21.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune dinamică. Influența densității	129
3.22.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune dinamică. Influența vitezei de încărcare	130
3.23.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune dinamică. Influența direcției de încărcare	131
3.24.	Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența temperaturii.	131
3.25.	Curbele tensiune-deformație. Comparație între rezultatele obținute la solicitarea statică și cea dinamică	133
3.26.	Variația modulului de elasticitate funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic	133
3.27.	Variația tensiunii de curgere funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic	134
3.28.	Variația tensiunii de platou funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic	134
3.29.	Variația densificării funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic	135
3.30.	Forma și dimensiunile probelor pentru încercările de tracțiune: a) Proba tip "1"; b) Proba tip "2"	135
3.31.	Imagine de ansamblu a mașinii de încercat MTS de 25 kN	136

## 22 Listă figuri

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
3.32.	Extensometru multiaxial MTS de tipul 632.85F-05	136
3.33.	Epruvetele utilizate în cadrul încercărilor experimentale de tracțiune: a) Proba tip "1"; b) Proba tip "2"	137
3.34.	Curba forță-deplasare înregistrată pe durata testului de tracțiune	138
3.35.	Curbele forță-deplasare înregistrate pe durata testului de tracțiune	138
3.36.	Proprietățile la tracțiune ale spumei. Influența densității: a) Rezistența la rupere la tracțiune, b) Modulul de elasticitate la tracțiune	139
3.37.	Prezentarea probelor rupte după solicitarea de tracțiune	140
3.38.	Comportamentul la rupere al diferitelor tipuri de materiale	142
3.39.	Forma și dimensiunile probelor pentru încercările de încovoiere în trei puncte	142
3.40.	Curba forță-deplasare. Determinarea forței critice	143
3.41.	Imaginea de ansamblu a mașinii universale pentru încercări de tracțiune-compresiune Zwick Roell 005 de 5 kN	144
3.42.	Imaginea de ansamblu a mașinii universale pentru încercări de tracțiune-compresiune MTS de 2kN	144
3.43.	Epruvetele utilizate în cadrul încercărilor experimentale de încovoiere în trei puncte pentru: influența densității (a-k); influența vitezei de încărcare, (d); influența planului de formare (a); efectul de scară (m).	145
3.44.	Mașina de tăiat Secotom 10	146
3.45.	Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența densității	148
3.46.	Variația tenacității la rupere funcție de densitate	148
3.47.	Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența vitezei de încărcare	149
3.48.	Variația tenacității la rupere funcție de viteza de încărcare	150
3.49.	Modul de prelevare al epruvetelor dintr-o placă pentru testele 3PB	150
3.50.	Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența direcției de încărcare	151
3.51.	Rezistența nominală funcție de parametrul geometric W. Efectul de scară rezultat în urma solicitării de încovoiere în trei puncte pentru o spumă	153
3.52.	Forma și dimensiunile probelor utilizate pentru studiul efectului de scară	154
3.53.	Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Efectul de scară.	154
3.54.	Variația tenacității la rupere funcție de lungimea fisurii	155
3.55.	Tenacitatea la rupere funcție de densitate. Comparație cu rezultate din literatura	156
3.56.	Ciocanul Charpy	157
3.57.	Probele utilizate în cadrul solicitării de impact	157



<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
3.58.	Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența densității	158
3.59.	Variația tenacității la rupere funcție de densitate	159
3.60.	Variația energiei în timp funcție de densitate	159
3.61.	Variația tenacității la rupere în regim static și dinamic	160
3.62.	Structura celulară a spumelor rezultată în urma testelor de compresiune pentru cele două plane de încărcare (paralel și perpendicular)	163
3.63.	Forma inițială respectiv finală a celulelor (după compresiune) pentru spuma analizată cu densitatea de 140 kg/m <sup>3</sup>	164
3.64.	Suprafață de rupere și structura spumelor poliuretanică utilizate în cadrul încercărilor de încovoiere în trei puncte	170
3.65.	Structura celulară a spumelor poliuretanică rigide la diferite magnitudini.	171
<b>Cap. 4-Estimarea proprietăților mecanice ale materialelor celulare folosind metode analitice și numerice</b>		
4.1.	Domeniile curbei tensiune-deformație tipică pentru o spumă poliuretanică rigidă sollicitată la compresiune	176
4.2.	Curba tensiune-deformație obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby	178
4.3.	Curba tensiune-deformație obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby modificat	179
4.4.	Comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și Gibson-Ashby modificat	179
4.5.	Modelul cu elemente finite de tip grindă: a) Încărcat în Modul I; b) Încărcat în Modul II	182
4.6.	Tipuri de încărcări: a) Modul I, b) Modul II, c) Modul III	183
4.7.	Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul I de încărcare. Celule pătrate	185
4.8.	Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul I de încărcare. Celule hexagonale	185
4.9.	Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul II de încărcare. Celule pătrate	187
4.10.	Influența numărului de celule asupra tenacității la rupere	187
4.11.	Influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere	188
4.12.	Deformata modelului micromecanic încărcat prin Modul I de rupere pentru o lungime a fisurii $a=0.85$ mm	188
4.13.	Modelul deformat pentru Modul I de încărcare	189
4.14.	Distribuția tensiunilor $\sigma_y$ în primul perete nerupt pentru Modul I de rupere: a) model cu celule pătrate; b) model cu celule hexagonale;	190
4.15.	Variația tensiunilor $\sigma_y$ în primul perete nerupt pentru Modul I de rupere	190

## 24 Listă figuri

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
4.16.	Tenacitatea la rupere obținută prin Modul I de rupere funcție de densitatea relativă pentru cele două cazuri studiate (lungime cvasi-constantă, grosime constantă)	191
4.17.	Deformarea spumei pentru Modul II de rupere pentru $a=0.85$ mm	191
4.18.	Distribuția tensiunilor $\sigma_y$ în peretele primei celule nefisurate pentru Modul II de rupere	192
4.19.	Variația tensiunilor $\sigma_y$ în peretele primei celule nefisurate pentru Modul I de rupere	192
4.20.	Tenacitatea la rupere obținută prin Modul II de rupere funcție de densitatea relativă pentru cele două cazuri studiate (lungime cvasi-constantă, grosime constantă)	192
4.21.	Tenacitatea la rupere normalizată funcție de densitatea relativă pentru Modul I de rupere	193
4.22.	Tenacitatea la rupere normalizată funcție de densitatea relativă pentru Modul II de rupere	194
4.23.	Comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și rezultatele experimentale	195
4.24.	Comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și rezultatele experimentale	196
4.25.	Comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei rezultați în urma testelor. Modulul de elasticitate	196
4.26.	Comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei rezultați în urma testelor. Tensiunea de curgere	197
4.27.	Comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei rezultați în urma testelor. Tensiunea de platou	197
4.28.	Comparație între valorile estimate cu ajutorul modelelor micromecanice și cele obținute experimental ale tenacității la rupere pentru Modul I de rupere	198

### **Cap. 5 - Absorbția de energie în materialele celulare**

5.1.	a) Curbele tensiune-deformație pentru un solid elastic și pentru o spumă realizată din același solid, prezentând energia pe unitatea de volum; b) Energia absorbită pe unitatea de volum funcție de tensiunea de vârf, la impact, atât pentru solid cât și pentru spuma realizată din el	200
5.2.	Tensiunile de vârf [ $(\sigma_p)_1$ , $(\sigma_p)_2$ și $(\sigma_p)_3$ ], generate într-o spumă cu trei densități diferite, absorbind aceeași cantitate de energie W.	201
5.3.	Diagramele de caracterizare a energiei de absorbție în spume: a) coeficientul lui Janssen, J; b) curbele construite din ecuațiile tensiune-deplasare ale lui Rusch; c) factorul de amortizare, C.	206
5.4.	Construcția diagramelor de absorbție a energiei	208
5.5.	Diagrama de modelare a energiei de absorbție pentru o spumă elastomerică cu celule deschise	210

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
5.6.	Diagrama de modelare a energiei de absorbție pentru o spumă elastomerică cu celule închise,	213
5.7.	Curbele energie-timp rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică. Studiul energiei de absorbție	215
5.8.	Curbele tensiune de vârf funcție de energia de absorbție normalizată	215
5.9.	Curbele tensiune-deformație rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică utilizate pentru studiul energiei de absorbție	216
5.10.	Diagrama energiei rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică: a) Curbele detaliate tensiune-deformație; b) Variația tensiunilor de vârf funcție de densitate	216
5.11.	Curbele energie de absorbție-tensiune rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică	217
5.12.	Diagrama energiei rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică: a) Curbele detaliate energie de absorbție-tensiune; b) Variația energie-densitate; c) Variația tensiunilor de vârf funcție de densitate	218
5.13.	Curbele eficiență-tensiune rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică	219
<b>Cap. 6-Characterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare</b>		
6.1.	Realizarea simetrică a grinzilor de tip sandwich	220
6.2.	Secțiune printr-un ski pentru identificarea elementelor componente	221
6.3.	Utilizarea materialelor de tip sandwich în domeniul medical: a) incubator medical; b) container materiale biologice; c) cutie depozitare mostre medicale.	222
6.4.	Exemple de construcții de tip sandwich în natură: a) secțiune prin craniul unui om ; b) aripa unei păsări ; c) frunză de iris	223
6.5.	Diagrama costului funcție de domeniul de utilizate al materialelor de tip sandwich	223
6.6.	Geometria structurilor de tip sandwich: a) grindă dreptunghiulară; b) placă circulară; c) coloană circulară; d) coloană pătrată; e) element tip pânză	225
6.7.	Grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară solicitată la încovoiere în trei puncte	225
6.8.	Secțiune printr-o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară	226
6.9.	Modurile de rupere pentru o grindă de tip sandwich: a) geometria încărcării; b) curgerea feței; c) încrețirea feței; d) forfecarea miezului; e) ruperea legăturilor dintre miez și față.	231
6.10.	Distribuția tensiunilor pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară: a) secțiunea transversală a grinzii; b) distribuția tensiunilor normale; c) distribuția aproximativă a tensiunilor normale; d) distribuția tensiunilor tangențiale; e) distribuția aproximativă a tensiunilor tangențiale	232

26 Listă figuri

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
6.11.	Testele de încovoiere în trei puncte: a) Mașina de încercat Zwick/Roell 005; b) proba inițială înainte de testare; c) proba deformată după testare	237
6.12.	Curbele forță-deplasare pentru grinzile de tip sandwich solicitate la încovoiere în trei puncte	238
6.13.	Comparație între curbele forță-deplasare pentru valori diferite ale distanței dintre reazeme	238
6.14.	Curba forță-deplasare pentru o grindă de tip sandwich pentru determinarea forței critice	239
6.15.	Comparație între forța critică, $F_{cr}$ , și forța maximă, $F_{max}$ , pentru grinzile de tip sandwich studiate	239
6.16.	Influența distanței dintre reazeme, $l$ , asupra forței pentru grinzile de tip sandwich	241
6.17.	Influența grosimii feței, $t$ , asupra forței pentru grinzile de tip sandwich	241
6.18.	Variația tensiunii tangențiale, $\tau$ , funcție de distanța dintre reazeme, $l$ , pentru o grindă de tipul AL - PUR 40.	243
6.19.	Variația tensiunii normale, $\sigma$ , funcție de distanța dintre reazeme, $l$ , pentru o grindă de tipul AL - PUR 40.	243
6.20.	Diagrama tensiunii tangențiale, $\tau$ , pentru diferite tipuri de grinzi	244
6.21.	Diagrama tensiunii normale, $\sigma$ , pentru diferite tipuri de grinzi	244
6.22.	Diagrama modului de rupere pentru o grindă dreptunghiulară tip sandwich cu fețe de aluminiu și miez din spumă poliuretanică supusă la încovoiere în trei puncte.	245
6.23.	Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de $40 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte	248
6.24.	Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din poliester și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte	249
6.25.	Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din epoxi și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte	249
6.26.	Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din aluminiu și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de $40 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte	250
6.27.	Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte	250
6.28.	Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din aluminiu și miez din plută cu densitatea de $170 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte	251

---

<u>Figura</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
6.29.	Curba forță-deplasare pentru o grindă de tip sandwich solicitată la încovoiere în trei puncte, prezentând identificarea zonelor de rupere	252
6.30.	Comparație între rezultatele experimentale și metodele analitice pentru o grindă sandwich cu fețe din epoxi și miez din spumă poliuretanică	253
6.31.	Comparație între rezultatele experimentale și metodele analitice pentru o grindă sandwich cu fețe din poliester și miez din spumă poliuretanică	253

## Listă tabele

### Cap. 1-Stadiul actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare

<u>Tabel</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
1.1.	Clasificarea spumelor poliuretanic	52
1.2.	Proprietățile geometrice ale celulelor izolate	60
1.3.	Formulele de calcul a densităților relative	63
1.4.	Proprietățile materialelor celulare	67

### Cap. 2-Modele micromecanice pentru caracterizarea materialelor celulare

2.1.	Proprietățile peretelui celulei (solidului din care este realizată spuma)	86
2.2.	Funcțiile non-dimensionale	99

### Cap. 3-Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanic

3.1.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de densitate	121
3.2.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de viteza de încărcare	122
3.3.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de planul de formare	124
3.4.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică funcție de secțiunea transversală	124
3.5.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de densitate și direcția de încărcare	128
3.6.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de planul de formare	130
3.7.	Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de temperatură	132
3.8.	Rezultatele medii ale modulului de elasticitate și a rezistenței la rupere la tracțiune	139
3.9.	Parametrii ce exprimă tenacitatea la rupere, în funcție de tipul materialului	141
3.10.	Valorile medii ale tenacității la rupere în funcție de densitate	147
3.11.	Valorile medii ale tenacității la rupere în funcție de viteza de încărcare	149
3.12.	Valorile medii ale tenacității la rupere funcție de planul de formare	151

<u>Tabel</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
3.13.	Parametrii geometrici și rezultatele medii ale tenacității la rupere. Efectul de scară	152
3.14.	Valorile medii ale tenacității la rupere în regim dinamic în funcție de densitate	158
<b>Cap. 4-Estimarea proprietăților mecanice ale materialelor celulare folosind metode analitice și numerice</b>		
4.1.	Parametrii la compresiune obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice	180
4.2.	Caracteristicile mecanice ale solidelor	184
4.3.	Dimensiunile modelului micromecanic cu celule pătrare	186
4.4.	Valorile tenacității la rupere pentru Modul I de rupere	194
4.5.	Valorile tenacității la rupere pentru Modul II de rupere	195
<b>Cap. 5 - Absorbția de energie în materialele celulare</b>		
5.1.	Valorile energiei, tensiunii de vârf și eficienței funcție de densitate	217
<b>Cap. 6-Caracterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare</b>		
6.1.	Parametrii geometrici ai grinzilor de tip sandwich	224
6.2.	Constante pentru grinzile de tip sandwich funcție de geometria încărcării	229
6.3.	Parametrii geometrici și valorile medii ale forței de rupere (critică și maximă), pentru grinzile sandwich	240
6.4.	Valorile medii ale tensiunii normale și tangențiale pentru grinzile de tip sandwich studiate	242
6.5.	Ecuțiile diagramei de rupere pentru o grindă de tip sandwich	246
6.6.	Ecuțiile de tranziție pentru diagrama modului rupere	247
6.7.	Proprietățile de material ale grinzilor de tip sandwich	248
<b>Anexe</b>		
A.1.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de densitate	278
A.2.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de viteza de încărcare	279
A.3.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de planul de formare	280
A.4.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică funcție de secțiunea transversală	281

## 30 Listă tabele

<u>Tabel</u>	<u>Denumire</u>	<u>Pag.</u>
A.5.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de densitate și direcția de încărcare – direcția (2), T= 20 <sup>0</sup> C (1)	282
A.6.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de densitate și direcția de încărcare – direcția (2), T= 20 <sup>0</sup> C (2)	283
A.7.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de planul de formare – direcția (3), T= 20 <sup>0</sup> C (1)	284
A.8.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de planul de formare – direcția (3), T= 20 <sup>0</sup> C (2)	285
A.9.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de temperatură, T= 60 <sup>0</sup> C	286
A.10.	Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de temperatură, T= 100 <sup>0</sup> C	287
A.11.	Rezultatele modului de elasticitate și a rezistenței la rupere la tracțiune	288
A.12.	Valorile tenacității la rupere în funcție de densitate (1)	289
A.13.	Valorile tenacității la rupere în funcție de densitate (2)	290
A.14.	Valorile tenacității la rupere în funcție de densitate (3)	291
A.15.	Valorile tenacității la rupere în funcție de viteza de încărcare	292
A.16.	Valorile tenacității la rupere funcție de planul de formare	293
A.17.	Parametrii geometrici și rezultatele tenacității la rupere. Efectul de scară	294
A.18.	Valorile tenacității la rupere în regim dinamic în funcție de densitate	295
A.19.	Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare. Densitatea relativă=0.333; l=0.6 mm; t= 0.1 mm	296
A.20.	Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare. Densitate relativă=0.182; l=0.55 mm; t= 0.05 mm	297
A.21.	Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare. Densitatea relativă=0.077; l=0.52 mm; t= 0.02 mm	298
A.22.	Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare. Densitatea relativă=0.133; l=0.75 mm; t= 0.05 mm	299
A.23.	Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare. Densitatea relativă=0.105; l=0.955 mm; t= 0.05 mm	300
A.24.	Parametrii geometrici și forțele de rupere pentru grinzile sandwich (1)	301
A.25.	Parametrii geometrici și forțele de rupere pentru grinzile sandwich (2)	302
A.26.	Parametrii geometrici și forțele de rupere pentru grinzile sandwich (3)	303



## Notății, abrevieri, acronime

$a$	=	lungimea fisurii, [mm].
$a_t$	=	lățimea unei grinzi tubulare de secțiune pătrată, [mm].
$a_p$	=	decelerația de vârf produsă de o spumă, [m/s <sup>2</sup> ].
$a_i$	=	decelerația cauzată de o spumă ideală pentru o energie de impact dată, [m/s <sup>2</sup> ].
$A, B$	=	parametrii dependenți de densitate (cap. 4), [-].
$(AG)_{ech}$	=	rigiditatea echivalentă la forfecare, [N].
$b$	=	lățimea unei grinzi de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară, [mm].
$b_1$	=	lățimea epruvetei de compresiune, [mm].
$b_2$	=	grosimea epruvetei de compresiune, [mm].
$B$	=	lățimea epruvetei de încovoiere, [mm].
$B_p$	=	factor de plutire, [-].
$B_1$	=	lățimea epruvetei de tracțiune de tipul "1" și "2", (cap. 3), [mm].
$B_2$	=	grosimea epruvetei de tracțiune de tipul "1", (cap. 3), [mm].
$B_3$	=	grosimea epruvetei de tracțiune de tipul "2", (cap. 3) [mm].
$B_1, B_2, B_3, B_4$	=	constante care depind de geometria încărcării (cap. 6), [-].
$c$	=	grosimea miezului pentru o grindă dreptunghiulară, placă sau pânză, [mm].
$C$	=	o constantă funcție de geometria corpului fisurat și de solicitare, cu o valoare aproximativ egală cu unitatea (pentru corpuri infinite - cap. 1), [-].
$C_1, C_2, C_3$	=	constante numerice, egale aproape cu unitatea, acestea depinzând de detaliile legate de forma celulei, [-].
$C_4, C_5, C_8$	=	constante legate de volumul celulei, [-].
$C'_4, C'_5, C''_5$	=	constante de proporționalitate, [-].
$C_p$	=	căldura specifică, [J/kgK].
$C_m$	=	prețul unui produs, [\$(€)/kg].
$d$	=	distanța dintre centrele fețelor pentru o grindă de tip sandwich, [mm].
$D_1, D_2, D_3, D_4$	=	constante legate de forma celulei, [-].
$\Delta L$	=	alungirea epruvetei, [mm].
$D, m, n$	=	constante de material în funcție de tipul spumei utilizate, [-].

## 32 Notății, abrevieri, acronime

---

$E$	=	modulul de elasticitate longitudinal, [MPa].
$E_1, E_2, E_3$	=	eficiențele obținute funcție de densitate (cap. 5).
$(EI)_{ech}$	=	rigiditatea echivalentă la încovoiere, [N mm <sup>2</sup> ].
$E_f$	=	modulul de elasticitate longitudinal al fețelor pentru o grindă de tip sandwich, [MPa].
$E_s$	=	modulul de elasticitate longitudinal al solidului din care este realizată spuma, [MPa].
$E^*$	=	modulul de elasticitate longitudinal al spumei, [MPa].
$E_t$	=	modulul de elasticitate transversal la tracțiune obținut de pe panta liniar-elastică a curbei tensiune-deformație, [MPa].
$E_C^*$	=	modulul de elasticitate longitudinal al miezului pentru o grindă de tip sandwich, [MPa].
$f$	=	este numărul de fețe pentru o singură celulă, [-].
$F$	=	forța care produce încovoierea muchiilor celulei (cap. 2), [N].
$F_{sh}$	=	forța tăietoare pe o distanță efectivă (cap. 2), [N].
$F_{cr}$	=	forța critică la rupere pentru o grindă de tip sandwich, [N].
$F_{max}$	=	forța maximă la rupere pentru o grindă de tip sandwich, [N].
$G$	=	modulul de elasticitate transversal, [MPa].
$G^*$	=	modulul de elasticitate transversal al spumei, [MPa].
$G_C^*$	=	modulul de elasticitate transversal al miezului pentru o grindă de tip sandwich, [MPa].
$h$	=	înălțimea epruvetei de compresiune, (cap. 3), [mm].
$h_p$	=	panta zonei de platou din curba tensiune-deformație obținută la compresiune (cap. 4), [-].
$H$	=	înălțimea modelului micromecanic utilizat, [mm].
$I$	=	moment de inerție, [mm <sup>4</sup> ].
$J$	=	coeficientul lui Janssen (eficacitatea spumei).
$k$	=	factorul de corecție la forfecare, (cap. 6), [-].
$K$	=	modulul volumic, [MPa].
$K^*$	=	modulul volumic al spumei, [MPa].
$K_Q$	=	tenacitatea la rupere calculată, [MPa·m <sup>0.5</sup> ].
$K_{IC}$	=	tenacitatea la rupere pentru Modul I de încărcare, [MPa·m <sup>0.5</sup> ].
$K_{IIC}$	=	tenacitatea la rupere pentru Modul II de încărcare, [MPa·m <sup>0.5</sup> ].
$K_I, K_{II}, K_{III}$	=	factorii de intensitate ai tensiunii corespunzători celor trei moduri de încărcare, [MPa·m <sup>0.5</sup> ].
$l$	=	lungimea muchiei unei celule, [mm].
$l$	=	lungimea utilă a grinzii sau înălțimea coloanei, (cap. 6), [mm].
$l^*$	=	lungimea celulei, [mm].

L	=	lungimea totală a epruvetei de tracțiune tipul "1", [mm].
L <sub>1</sub>	=	lungimea totală a epruvetei de tracțiune tipul "2", [mm].
L <sub>0</sub>	=	lungimea inițială a epruvetei de tracțiune, [mm].
m	=	masa unui corp, [kg].
m,n,r,s	=	constante de material funcție de tipul spumei utilizate, determinate empiric, (cap. 5), [-].
M <sub>i</sub>	=	momentul aplicat grinzii, [N·mm].
M	=	momentul de încovoiere care acționează asupra muchiilor celulei, (cap. 2), [N·mm].
M <sub>f</sub>	=	momentul de rupere în fețele celulei, [N·mm].
$\bar{n}$	=	este numărul mediu de muchii pe fața unei singure celule.
n <sup>2</sup>	=	descrie gradul de constrângere la sfârșitul coloanei, (ec. 2.22).
n <sub>s</sub> , ε <sub>0s</sub> , σ <sub>0</sub>	=	parametrii de fluaj ai solidului.
P	=	forța aplicată asupra grinzii, [N].
p	=	presiunea finală a gazului dintr-o celulă rezultată în urma deplasării ε, [atm].
p <sub>0</sub>	=	presiunea inițială a gazului (fluidului) dintr-o celulă, (de obicei presiunea atmosferică), [atm].
p <sub>at</sub>	=	presiunea atmosferică, [atm].
p'	=	presiunea din celulă care trebuie învinsă de către tensiunea aplicată, [atm].
P <sub>Q</sub>	=	forța critică determinată în urma testelor de încovoiere în trei puncte, [N].
P <sub>max</sub>	=	forța maximă rezultată în urma testelor de încovoiere în trei puncte, [N].
q	=	sarcina uniform distribuită, [N/m <sup>2</sup> ].
Q	=	energia de activare a curgerii vâscoase (cap. 4), [J].
r	=	distanța până la vârful fisurii (cap. 2), [mm].
r	=	raza miezului pentru un tub de tip sandwich, [mm].
R	=	raza pentru o placă circulară de tip sandwich (cap. 6), [mm].
R	=	constanta gazelor, [J/mol·K].
R <sub>12</sub> , R <sub>13</sub>	=	rapoartele de anizotropie a formei, [-].
r <sub>p</sub>	=	mărimea zonei plastice de la vârful fisurii, [mm <sup>2</sup> ].
r, θ	=	coordonatele polare care definesc poziția unui element având originea în vârful fisurii.
r <sub>tip</sub>	=	raza la vârful fisurii la distanța r > r <sub>tip</sub> , [mm].
S	=	rigiditatea muchiei celulei unei spume (cap. 2), [N/m].
S	=	distanța dintre punctele de rezemare la încovoiere în trei puncte (cap. 3), [mm].

### 34 Notății, abrevieri, acronime

---

$t$	=	grosimea peretelui celulei, [mm];
$T_m$	=	punctul de topire, [C] sau [K].
$T$	=	temperatura la care s-au efectuat testele experimentale, [°C].
$f$	=	grosimea feței pentru o grindă de tip sandwich (cap. 6), [mm].
$t_e$	=	grosimea muchiei celulei, [mm].
$t_f$	=	grosimea feței celulei, [mm].
$t_f$	=	grosimea fețelor pentru o grindă de tip sandwich, [mm].
$U$	=	energia stocată în grindă, [J].
$v$	=	viteza de testare, reprezentând viteza de separare a bacurilor mașinii de încercat pe durata încărcării, [mm/min] sau [m/s]
$V$	=	volumul final al unui eșantion de spumă (cap. 2), [mm <sup>3</sup> ].
$V_0$	=	volumul inițial al unui eșantion de spumă, [mm <sup>3</sup> ].
$V_f$	=	volumul de solid din fața unei celule, [mm <sup>3</sup> ].
$V_g$	=	volumul final rezultat în urma comprimării unui celule de spumă umplută cu gaz, [mm <sup>3</sup> ].
$V_g^0$	=	volumul inițial al unui celule de spumă umplută cu gaz, [mm <sup>3</sup> ].
$W$	=	înălțimea epruvetei de încovoiere în trei puncte (cap. 3), [mm].
$W$	=	energia de impact absorbită pe unitatea de volum, [J/m <sup>3</sup> ].
$W$	=	lățimea modelului micromecanic utilizat, (cap. 4), [mm].
$W_{max}$	=	valoarea maximă a energiei de absorbție utilă pe unitatea de volum, [J/m <sup>3</sup> ].
$W_1, W_2, W_3$	=	valorile obținute ale energiei de absorbție funcție de densitate (cap. 5), [J/m <sup>3</sup> ].
$y$	=	distanța până la axa neutră, [mm].
$Z_f$	=	numărul de fețe care se întâlnesc la o muchie [-].
$\alpha$	=	coeficientul de expansiune termică, (cap. 1), [K <sup>-1</sup> ].
$\alpha, \beta, \alpha', \beta'$	=	constante de proporționalitate, [-].
$\beta$	=	coeficient care ține seama de geometria corpului fisurat (dimensiuni finite, caracteristici geometrice) și de tipul încărcării (tracțiune, încovoiere, torsiune), (cap. 2), [-].
$\delta$	=	săgeata unei grinzi solicitată la încovoiere în trei puncte, [mm].
$\Delta l$	=	alungire, [mm].
$\varepsilon$	=	deformația la tracțiune, reprezentând creșterea în lungime, ( $\Delta L_0$ ) pe unitatea inițială a lungimii calibrate, ( $L_0$ ), [mm/mm] sau [%].
$\varepsilon_D$	=	densificarea obținută la o creștere semnificativă a curbei tensiune-deformație la o deformație aproape constantă, (deformație critică), [%].

$\varepsilon_y$	=	deformația la curgere, [mm/mm] sau [%].
$\varepsilon_M$	=	deformația la tracțiune corespunzătoare rezistenței la rupere, [mm/mm] sau [%].
$\dot{\varepsilon}$	=	viteza de deformație, [mm/min] sau [m/s].
$\dot{\varepsilon}_f$	=	viteza de deformație care duce la comprimarea fluidului, [mm/min] sau [m/s].
$\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$	=	viteze de deformație fixe, [mm/min] sau [m/s].
$\varphi$	=	volumul (fracțiunea) de solid conținut în muchiile celulei.
$\eta (\varepsilon)$	=	eficiența energiei de absorbție, [-].
$\lambda$	=	conductivitatea termică, [W/mK].
$\mu$	=	vâscozitatea dinamică a fluidului, (cap. 5), [Pa·s].
$\nu$	=	coeficientul lui Poisson la deformația $\varepsilon_n$ , [-].
$\nu^*$	=	coeficientul lui Poisson pentru spumă, [-].
$\nu_b$	=	coeficientul lui Poisson pe direcția lățimii, [-].
$\nu_h$	=	coeficientul lui Poisson pe direcția grosimii, [-].
$\theta$	=	unghiul la care se realizează încovoierea, [°]
$\rho$	=	densitatea, [Kg/m <sup>3</sup> ].
$\rho^*$	=	densitatea spumei, [Kg/m <sup>3</sup> ].
$\rho_s$	=	densitatea solidului din care este realizată spuma, [Kg/m <sup>3</sup> ].
$\rho_{apă}$	=	densitatea apei, [Kg/m <sup>3</sup> ].
$\rho^*/\rho_s$	=	densitatea relativă a spumei, [-].
$\rho_f$	=	densitatea fețelor pentru o grindă de tip sandwich, [kg/m <sup>3</sup> ].
$\rho_c^*$	=	densitatea miezului pentru o grindă de tip sandwich, [kg/m <sup>3</sup> ].
$1 - \rho^*/\rho_s$	=	fracțiunea dintre volumul de goluri și volumul total al spumei (porozitatea), [-].
$\sigma$	=	tensiunea aplicată asupra unui corp fisurat, [MPa].
$\sigma_u$	=	rezistența maximă, [MPa].
$\sigma_c$	=	rezistența la compresiune, [MPa].
$\sigma_y$	=	tensiunea de curgere, [MPa].
$\sigma_{ys}$	=	rezistența la curgere a solidului din care s-a format spuma, [MPa].
$\sigma_f, \sigma_{fs}$	=	rezistența la rupere a materialului (rezistența la rupere a peretilor celulei unei spume), [MPa].
$\sigma_L$	=	tensiunea limită, [MPa].
$\sigma_i$	=	tensiunea maximă la încovoiere, [MPa].
$\sigma_p, \sigma_{pl}$	=	tensiunea de platou, [MPa].

### 36 Notății, abrevieri, acronime

$\sigma_M$	= tensiunea maximă la tracțiune suportată de epruvetă pe durata încercării, [MPa].
$\sigma_t$	= rezistența la rupere la tracțiune, [MPa].
$\sigma_N$	= tensiunea nominală la încovoiere privind efectul de scară, [MPa].
$\sigma_f, \sigma_c$	= tensiunea normală în fețe, respectiv miez pentru o grindă de tip sandwich, (cap. 6), [MPa].
$\sigma_1, \sigma_2$	= tensiunile principale din grinda de tip sandwich, [MPa].
$\sigma_{yf}$	= rezistența la curgere a materialului feței pentru o grindă de tip sandwich, [MPa].
$\sigma_{yc}^*$	= rezistența la curgere a materialului miezului pentru o grindă de tip sandwich, [MPa].
$\sigma_{ys}$	= rezistența la curgere a solidului pentru o grindă sandwich, [MPa].
$\sigma_c^*$	= rezistența la compresiune a miezului unei grinzi sandwich, [MPa].
$\sigma_g^*$	= rezistența unei spume cu celule deschise care conține gaz, [MPa].
$\sigma_{pl}^*$	= tensiunea colapsului plastic, [MPa].
$\sigma_{el}^*$	= tensiunea colapsului elastic, [MPa].
$(\sigma_p)_1, (\sigma_p)_2, (\sigma_p)_3$	= valorile tensiunilor de vârf funcție de densitate, [MPa].
$\tau$	= tensiunea tangențială, [MPa].
$\tau_{max}$	= tensiunea tangențială maximă, [MPa].
$\tau_{xy}$	= tensiunea tangențială pentru Modul II dinaintea vârfului fisurii, [MPa].
$\tau_f, \tau_c$	= tensiunea tangențială în fețe, respectiv miez pentru o grindă de tip sandwich, [MPa].
$\psi(\varepsilon)$	= coeficient empiric de formă, [-].
AL-PLUTA 170	= sandwich cu fețe de aluminiu și miez din plută cu densitatea de 170 kg/m <sup>3</sup> .
AL-PUR 40	= sandwich cu fețe de aluminiu și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de 40 kg/m <sup>3</sup> .
CFRP	= polimer armat cu fibră de carbon.
Direcția (2)	= încărcarea este realizată într-un plan paralel cu planul de formare.
Direcția (3)	= încărcarea este realizată într-un plan perpendicular pe planul de formare.
EPX-PUR 200	= sandwich cu fețe de epoxi și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de 200 kg/m <sup>3</sup> .
EVA	= etilenă acetat de vinil.
FEM	= Metoda Elementului Finit.
FIT	= factorul de intensitate al tensiunii.
G-A	= Modelul micromecanic Gibson-Ashby.
G-AM	= Modelul micromecanic Gibson-Ashby Modificat.

LEFM	=	Mecanica Ruperii Liniar Elastică.
MRT	=	Mecanică și Rezistența Materialelor.
PA	=	poliamidă.
PC	=	policarbonat.
PE	=	polietilenă.
PEEK	=	polieter eten cetonă.
PET	=	polietilen tereftalat.
PMMA	=	polimetil metacrilat.
PP	=	polipropilenă.
PUR	=	poliuretan.
PS	=	polistiren.
PTFE	=	politetrafluoretilenă.
PVC	=	policlorură de vinil.

## CUPRINSUL COMENTAT

Lucrarea este structurată pe șapte capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 intitulat Stadiul actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare este organizat pe 5 subcapitole. În acest capitol se încearcă o punere în temă asupra studiului dezvoltat pe parcursul tezei de doctorat, evidențiind o prezentare generală a stadiului actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare.

*Subcapitolul 1.1* începe cu o scurtă trecere în revistă a materialelor celulare prin prezentarea tipurilor de solide celulare (figura 1). Un solid celular este confecționat dintr-o rețea interconectată de straturi solide cu forma muchiilor și fețelor celulelor bine definite.

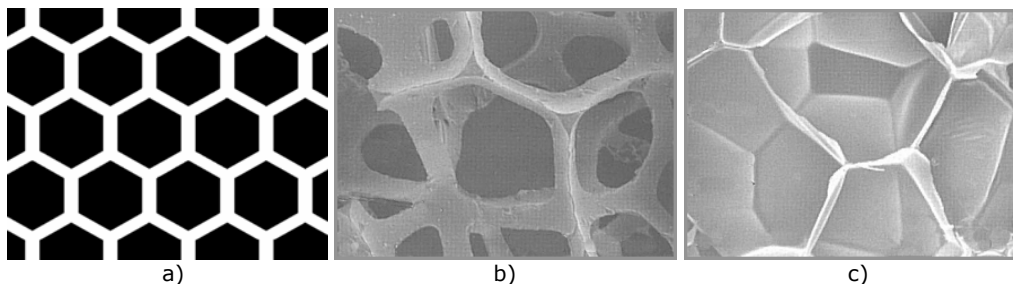


Fig. 1. Exemple de solide celulare: a) formă bidimensională tip figure de miere; b) formă tridimensională de spumă cu celule deschise; c) formă tridimensională de spumă cu celule închise

Prezentarea continuă cu *Subcapitolul 1.2* intitulat *Tehnologia de fabricare a spumelor*, care prezintă o clasificare a spumelor poliuretanică și procedeele de elaborare a acestora. În *Subcapitolul 1.3* se prezintă structura solidelor celulare, forma, mărimea și topologia celulelor. *Subcapitolul 1.4* prezintă principalele proprietăți mecanice ale spumelor poliuretanică, evidențiind importanța densității asupra modului de elasticitate longitudinal, a rezistenței la rupere și a tenacității la rupere. *Subcapitolul 1.5* tratează problema legată de principalele aplicații ale materialelor celulare (izolare termică, ambalare, utilizarea în construcții, pentru plutire, alte aplicații). În cele din urmă s-au prezentat avantajele utilizării materialelor celulare de tipul spumelor poliuretanică rigide.

**Capitolul 2** intitulat **Modele micromecanice pentru caracterizarea materialelor celulare** este dedicat metodelor micromecanice pentru predicția proprietăților mecanice.

În *Subcapitolul 2.2* s-au prezentat mecanismele de deformare în spume prin prezentarea curbelor tensiune-deformație atât la compresiune cât și la tracțiune.

*Subcapitolul 2.3* prezintă proprietățile mecanice ale spumelor la compresiune. În cele mai multe aplicații spumele sunt utilizate sub sarcini de compresiune. În acest subcapitol se prezintă comportamentul spumelor la solicitarea de compresiune prin prezentarea modelelor micromecanice utilizate. Studiul este realizat pentru fiecare zonă în parte din curba tensiune-deformație, (zona liniar-elastică, de platou și



densificarea), respectiv pentru fiecare tip de spumă în parte, (spumă cu celule deschise, spumă cu celule închise).

La densități relative mici, spumele cu celule deschise se deformează prima dată prin încovoierea peretelui celulei. Dacă densitatea relativă crește ( $\rho^*/\rho_s > 0.1$ ), contribuția întinderii sau comprimării pereților celulei devine mai semnificativă. Spumele cu celule închise sunt mult mai complicate decât cele cu celule deschise. În momentul în care spumele sunt fabricate din componente lichide (cum de altfel sunt cele mai multe), tensiunile de suprafață pot trage materialul în muchiile celulei, lăsând doar un strat subțire de material în fețele celulei ceea ce duce la ruperea foarte ușoară a feței. În cazul spumelor cu celule închise muchiile celulei se încovoie și se întind sau comprimă, în timp ce membranele care formează fețele celulei se alungesc, crescând contribuția rigidității peretelui celulei asupra proprietăților mecanice. Dacă membranele nu se rup, comprimarea celulelor crește rigiditatea.

*Subcapitolul 2.4* prezintă proprietățile mecanice ale spumelor la solicitarea de tracțiune. Ruperea fragilă la tracțiune este destul de diferită față de cea la compresiune. În compresiune spuma se strivește progresiv, iar în cazul tracțiunii spuma se rupe după propagarea unei singure fisuri. Spumele fragile, (aici fiind incluse cele mai rigide spume polimerice), în cazul tracțiunii se comportă liniar-elastic până la rupere, deci ruperea prin tracțiune poate fi tratată cu ajutorul metodelor din Mecanica Ruperii Liniar Elastică. Prin urmare, vom căuta o expresie pentru tenacitatea la rupere a spumelor,  $K_{IC}$ , din punct de vedere al rezistenței la rupere a pereților celulei  $\sigma_{fs}$  și a densității relative  $\rho^*/\rho_s$ .

În ultima parte a Capitolului 2 se prezintă atât noțiunile de bază despre Mecanica Ruperii Liniar Elastică cât și modelele micromecanice utilizate pentru prezicerea tenacității la rupere. În acest sens s-au utilizat patru modele, după cum urmează:

- Modelul micromecanic Gibson – Ashby

Gibson și Ashby (1997) au considerat că la scara dimensiunii celulelor, o fisură se poate extinde într-un mod discret. De fiecare dată rândul de celule de-a lungul frontului fisurii se rupe și fisura se extinde pe lungimea unei celule, astfel frontul fisurii avansează cu lungimea unei celule. Relația între tenacitatea la rupere și densitatea relativă este urmatoarea:

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_{fs} \sqrt{nl}} = 0.65 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (1)$$

- Modelul micromecanic Choi – Shankar

Un alt model micromecanic a fost propus de către Choi și Shankar (2005), care au considerat că pentru Modul I în primul strat dinaintea fisurii apare atât încovoiere cât și tracțiune, iar pentru Modul II apare doar forfecare. Ei au propus o expresie semi-empirică pentru tenacitatea la rupere funcție de rezistența la tracțiune a materialului, dimensiunile celulelor (lungime și grosime) și lungimea fisurii. Ei au considerat două cazuri:

- Pentru lungimea constantă a celulei,  $l = 200 \mu m$

$$K_{IC} = 1.961 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.045} \quad \text{și} \quad K_{IIC} = 6.95 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.32} \quad (2)$$

- Pentru grosimea stratului constantă,  $h = 20 \mu m$

$$K_{IC} = 7.82 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{0.788} \quad \text{și} \quad K_{IIC} = 2.76 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.07} \quad (3)$$

- Modelul micromecanic Choi – Lakes

Un alt model a fost propus de către Choi și Lakes (1996). Pentru un tetraedru regulat, cu celulele aranjate, relația de calcul a tenacității la rupere este dată de relația :

$$\frac{K_I}{\sigma_{fs} \sqrt{\pi l}} = 0.19 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4)$$

- Modelul micromecanic Green

O corelare similară a fost propusa de către Green (1985):

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_{fs} \sqrt{\pi l}} = 0.28 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.3} \quad (5)$$

Modelele micromecanice prezentate mai sus se referă la tenacitatea la rupere a spumelor poliuretanică rigide  $K_{IC}$ , la rezistența la rupere a pereților celulei  $\sigma_{fs}$  și la densitatea relativă  $\rho^*/\rho_s$ .

**Capitolul 3** intitulat **Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanică** este dedicat în totalitate determinărilor experimentale.

Caracterizarea experimentală a materialelor celulare este un subiect evaziv, datorită faptului că s-a aflat într-o continuă evoluție. Odată cu dezvoltarea de noi materiale celulare și apariția de noi aplicații, și tehnicile de testare a acestor materiale au înregistrat o continuă evoluție. Această evoluție a metodelor de testare pentru a răspunde noilor cerințe, a continuat de-a lungul timpului cu aspecte suplimentare și totodată au crescut în importanță, de exemplu, influența densității, temperaturii, vitezei de încărcare, planului de formare, umidității și a altor factori care afectează durabilitatea.

Analiza experimentală prezentată în acest capitol s-a realizat pe spume poliuretanică rigide. Pentru determinarea comportamentului acestor spume s-au folosit 11 tipuri diferite de spume, ceea ce înseamnă totodată și 11 densități diferite. Spumele au fost obținute din diferite surse, sub forma de plăci sau panouri de tip sandwich. O parte dintre acestea au fost furnizate de firmele Spumotim S.A. și TRW Automotive Timișoara, care produc spume pentru industria auto.

Trebuie menționat faptul că pentru cele 11 densități obținute nu se cunosc proprietățile de Mecanica Ruperii și nici comportamentul acestora la diferite variații ale temperaturii, vitezei de încărcare, direcția planului de formare, etc. Spumele au fost analizate după un program de încercări special stabilit pentru scopul acestei lucrări și a cărei schemă de principiu este prezentată în figura 2. Încercările statice s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor Ștefan Nădăsan din cadrul Facultății de Mecanică, pe când încercările dinamice au avut loc în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universitatii Tehnice din Lublin, Polonia.

În *Subcapitolul 3.2* s-a realizat identificarea tipului de spumă atât prin determinarea densității cât și printr-o analiză microstructurală. Pe baza celor prezentate, din materialele studiate, (plăci din spumă poliuretanică), s-au prelevat probe în vederea stabilirii densității. Densitatea s-a determinat conform ASTM D 1622-03 (Metode Standard de Testare a Densității Aparente a Plasticelor Celulare Rigide), iar analiza microstructurală a materialelor utilizate s-a realizat în Laboratorul Universitatii Tehnice din Lublin cu ajutorul unui microscop electronic cu baleiaj. *Subcapitolul 3.3* prezintă determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune atât în regim static cât și în regim dinamic, prezentându-se totodată o comparație a curbelor tensiune-deformație și a parametrilor obținuți în urma prelucrării datelor experimentale.

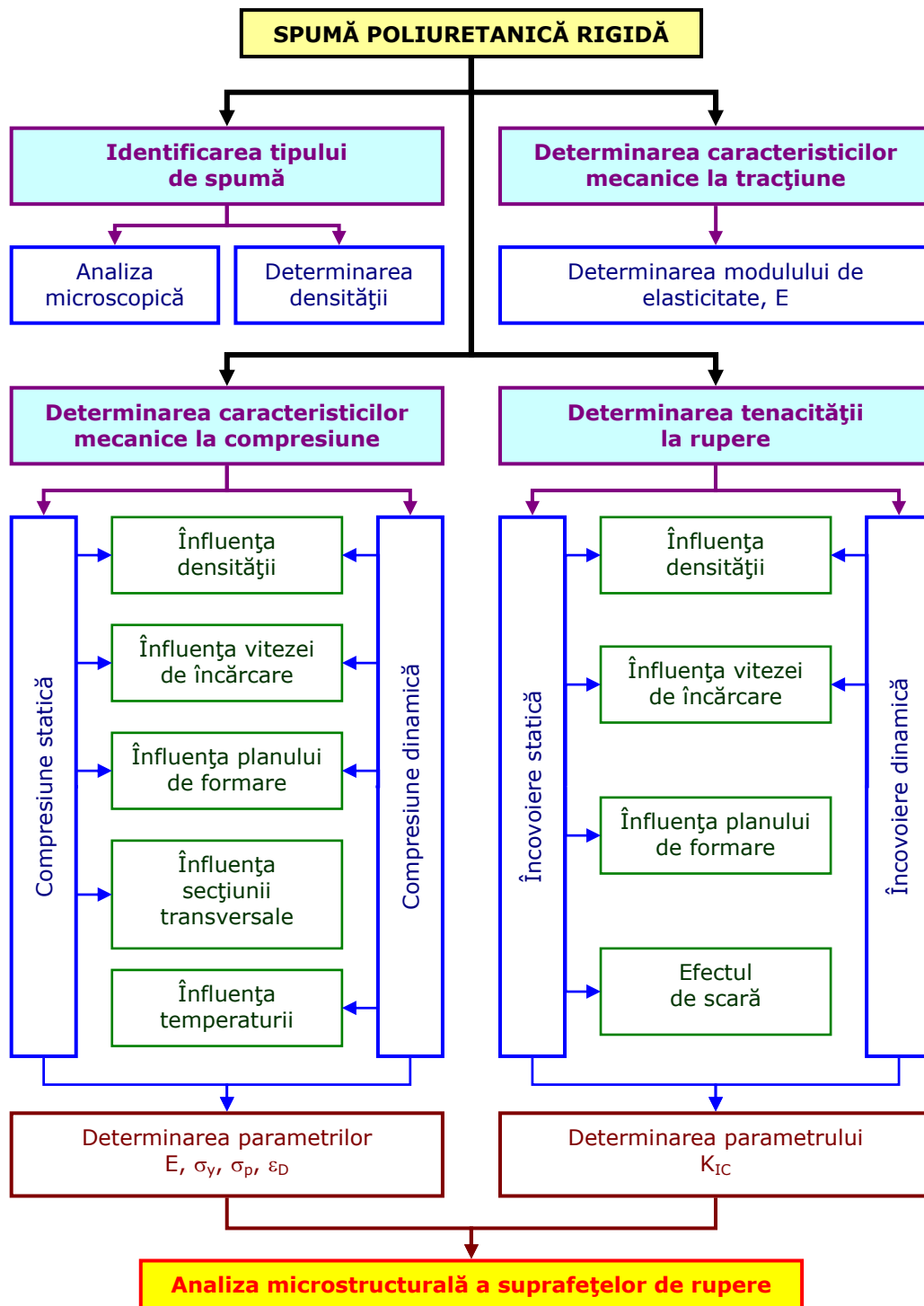


Fig. 2. Schema de principiu a programului experimental

S-a realizat un studiu al influenței densității și s-a constatat că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților de material (figura 3), ceea ce înseamnă că densitatea are un rol important în determinarea comportamentului mecanic la compresiune al spumelor

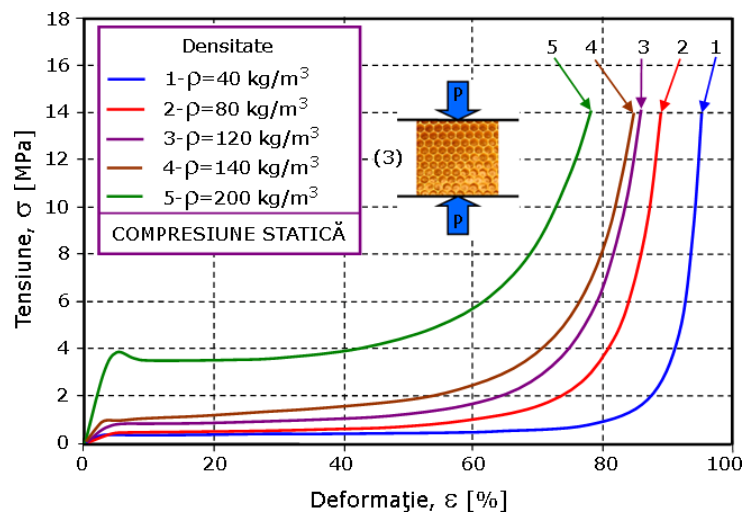


Fig. 3. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența densității

De asemenea, s-a mai investigat și efectul altor factori asupra comportării la compresiune. Astfel, s-a constatat că viteza de încărcare prezintă o influență scăzută asupra proprietăților la compresiune. Direcția de încărcare are o influență semnificativă asupra proprietăților mecanice la compresiune, acest lucru punând în evidență aspectul anizotrop al spumei. Efectul de scară are o influență relativ mică asupra parametrilor mecanici la compresiune. S-a constatat că la temperatura ambiantă, (20°C) și la temperatura de 60°C, comportamentul spumei este aproximativ la fel, pe când în zona temperaturilor înalte (100°C), spumele își modifică proprietățile. Trebuie subliniat că în cazul spumelor poliuretanică temperatura de 100°C poate fi considerată înaltă având în vedere faptul că acestea au temperatura de topire în jurul valorii de 150°C.

Subcapitolul 3.4 prezintă *Determinarea caracteristicilor mecanice la tracțiune*. În cadrul încercărilor experimentale de tracțiune s-au trasat curbele forță-deplasare, respectiv s-a determinat modulul de elasticitate și rezistența la rupere (Tabelul 1).

Tabelul 1. Rezultatele obținute în urma testelor de tracțiune

Densitate	Parametrii geometrici ai epruvetelor utilizate			Modulul de elasticitate	Rezistența la rupere la tracțiune
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	B <sub>1</sub> [mm]	B <sub>2</sub> (B <sub>3</sub> ) [mm]	L(L <sub>0</sub> ) [mm]	E [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]
40	24.8	24.8	49.0	14.07	0.44
80	26.0	25.8	50.2	28.73	0.78
200	6.0	12.0	25.0	169.70	5.28

Se poate observa foarte ușor că densitatea are un rol major asupra rezistenței la rupere, aceasta crescând de la valoarea de 0.44 MPa pentru spuma cu

densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , până la valoarea de  $5.28 \text{ MPa}$  pentru spuma cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ . Pe de altă parte, densitatea are de asemenea un rol foarte important asupra rigidității spumei. Modulul de elasticitate crește de la valoarea de  $14.07 \text{ MPa}$  pentru spuma cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , până la valoarea de  $169.7 \text{ MPa}$  pentru spuma cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ . S-a încercat de asemenea să se determine coeficientul lui Poisson cu ajutorul extensometrului multiaxial. În afară de faptul că pini extensometrului pătrund în suprafața exterioară a spumei, s-a obținut pentru densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$  o valoare medie a coeficientului lui Poisson de  $0.2474$ .

*Subcapitolul 3.5 prezintă Determinarea tenacității la rupere la sollicitarea de încovoiere în trei puncte pe epruvete crestate.* În ultimii ani s-au făcut multe cercetări pe această temă a determinării tenacității la rupere pentru spumele poliuretaneice atât în condiții statice cât și dinamice de încărcare.

Ca și în cazul compresiunii, și în acest caz s-a studiat influența densității, vitezei de încărcare, planului de formare și efectul de scară. Odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a tenacității la rupere, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în determinarea forței critice la încovoiere. Spumele poliuretaneice rigide prezintă o rupere fragilă, fără deformații plastice. Viteza de încărcare și planul de formare nu au prezentat influențe majore asupra tenacității la rupere.

Efectul de scară pentru spume este important pentru extrapolarea datelor din laboratorul de testare la structuri reale foarte mari. S-a constatat că efectul de scară prezintă influențe majore asupra tenacității la rupere. Toate epruvetele au avut aceeași grosime  $B=20 \text{ mm}$ , variind raportul lungime/latime care a fost ales de  $5:2$ . Lățimile probelor au fost  $W=5.33, 36.89$  și  $256 \text{ mm}$ , iar tenacitatea la rupere crește odată cu creșterea dimensiunilor probei astfel:  $0.048, 0.093$  respectiv  $0.165 \text{ MPa m}^{0.5}$ . De asemenea, efectul de scară mai poate fi definit și ca o dependență între rezistența nominală,  $\sigma_N = P_{\max}/bW$ , funcție de mărimea caracteristică a epruvetei (sau dimensiune)  $W$ . Astfel, rezistența nominală este un parametru legat de forța maximă, având dimensiunea de tensiune.

După sollicitarea de impact probele au prezentat o rupere completă punând în evidență aspectul fragil al spumei. Energia și forța de rupere cresc odată cu creșterea densității.

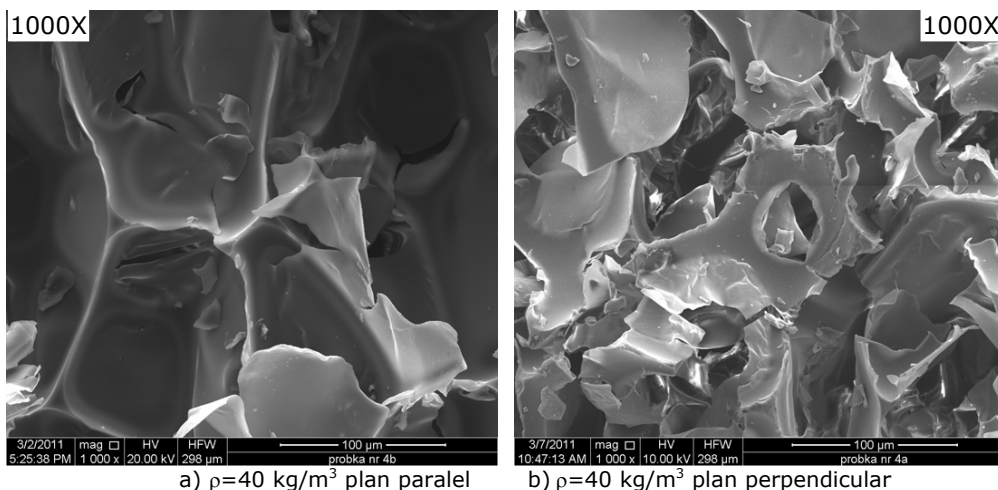


Fig. 4. Structura celulară a spumelor rezultată în urma testelor de compresiune pentru cele două plane de încărcare (paralel și perpendicular)

În Subcapitolul 3.6 este prezentată o analiză microstructurală a suprafețelor de rupere rezultate în urma încercărilor de compresiune și încovoiere în trei puncte. Analiza microstructurală a suprafețelor prezintă atât o comparație între structura inițială și cea finală, cât și o comparație între forma celulelor rezultată în urma încărcării într-un plan paralel cu planul de formare și cea rezultată în urma încărcării într-un plan perpendicular pe planul de formare al spumei, (figura 4). În acest sens se poate observa o deformare diferită a celulelor.

S-a realizat atât o prezentare a structurii celulare obținută cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj după deformare, cât și a suprafețelor de rupere (inițiale și finale) pentru spumele utilizate în cadrul programului experimental de încovoiere în trei puncte pe epruvete crestate. Suprafața de rupere arată faptul că ruperea a fost fragilă, fără deformații plastice.

**Capitolul 4** intitulat **Estimarea proprietăților mecanice ale materialelor celulare folosind metode analitice și numerice** prezintă metode micromecanice analitice și numerice pentru predicția proprietăților mecanice.

În Subcapitolul 4.1. *Analiza proprietăților mecanice ale materialelor celulare la compresiune folosind metode analitice* s-au prezentat principalele modele micromecanice folosite pentru descrierea comportării la compresiune a spumelor poliuretanică rigide: Modelul Gibson-Ashby și Modelul Gibson-Ashby modificat.

Folosind metoda elementelor finite și programul Franc 2D în Subcapitolul 4.2. intitulat *Analiza cu elemente finite pentru determinarea proprietăților mecanice ale materialelor celulare*, s-a realizat un studiu de analiză pentru determinarea tenacității la rupere a materialelor celulare. Modelul micromecanic cu celule pătrate utilizat pentru Modul I de rupere este prezentat în figura 5a, iar în figura 5b este prezentat modelul micromecanic pentru Modul II de rupere.

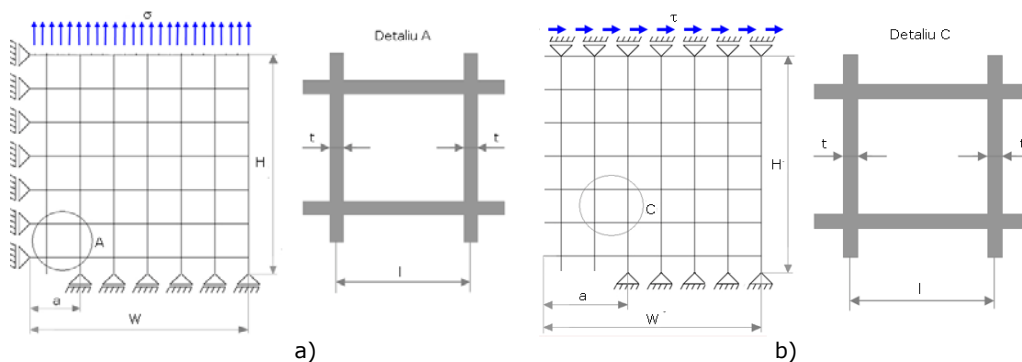


Fig. 5. Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul I (a) și Modul II (b) de încărcare. Celule pătrate

Pe baza studiului de convergență efectuat s-a estimat valoarea tenacității la rupere atât pentru Modul I cât și pentru Modul II de rupere. Diferența relativă în tenacitatea la rupere între valoarea maximă și cea minimă este 14.3 % pentru Modul I și de 7.9 % pentru Modul II. Aceasta diferență scade de la modelele cu 64 de celule la cele cu 100 de celule cu până la 5.4 % pentru Modul I și 3.3 % pentru Modul II. Cu toate acestea, în calcule influența este nesemnificativă, utilizându-se în acest caz modelul cu 100 de celule pentru evaluarea tenacității la rupere. Tenacitatea la rupere a fost obținută prin încărcări progressive ale modelului cu încărcarea aplicată  $\sigma$  până în momentul în care tensiunea maximă din primul perete nerupt atinge rezistența la rupere a solidului  $\sigma_{fs}$ .

De asemenea, s-a prezentat influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere pentru o spumă cu densitatea relativă de 0.105. În acest caz au fost luate în considerare șase lungimi ale fisurii: 1.4; 2.35; 3.3; 4.25; 5.2 și 6.15 mm, păstrând constantă mărimea modelului. Diferențele relative în tenacitatea la rupere au fost 1.3% pentru Modul I și 4.3% pentru Modul II indicând faptul că tenacitatea la rupere prezisă ar putea fi considerată independentă de lungimea fisurii.

Valorile tenacității la rupere obținute pentru Modul I de încărcare pentru o spumă s-au încadrat între  $0.051 \text{ MPa m}^{0.5}$  (pentru densitatea relativă de 0.077) și  $0.384 \text{ MPa m}^{0.5}$  (pentru densitatea relativă de 0.333). S-a constatat că pentru Modul I de rupere în primul perete dinaintea fisurii apar atât tensiuni de întindere cât și de încovoiere, iar pentru Modul II de rupere încovoierea pură apare în stratul unde tensiunea la întindere este maximă, adică în apropierea vârfului fisurii

*Subcapitolul 4.3* prezintă o comparație a parametrilor mecanici obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei obținuți în urma programului experimental. Modelele micromecanice reprezintă unelte cu ajutorul cărora se poate prezice foarte ușor comportamentul anumitor tipuri de materiale. De asemenea, modelele micromecanice pot arăta mult mai bine proprietățile multiaxiale și răspunsul materialelor celulare. Astfel, pentru a avea o credibilitate destul de mare, aceste rezultate obținute cu ajutorul modelelor micromecanice trebuie validate experimental. Teoretic, plecând de la proprietățile solidului și densitatea spumei, se pot obține caracteristicile spumei studiate (modulul de elasticitate, tensiunea de curgere, tensiunea de platou și densificarea). Pentru aceeași densitate a spumei, s-a constatat că odată cu schimbarea direcției de încărcare se obține un comportament diferit, rezultând totodată proprietăți diferite. Valorile estimate ale parametrilor obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice sunt validate de către rezultatele obținute în urma încercărilor experimentale.

De asemenea, s-a prezentat o comparație între rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I estimate cu ajutorul modelelor micromecanice prin analiză cu elemente finite și rezultatele experimentale din bibliografie, obținându-se o corelare foarte bună, ceea ce înseamnă că valorile estimate sunt validate experimental.

**În Capitolul 5 intitulat Absorbția de energie în materialele celulare** s-a realizat un studiu al absorbției de energie în materialele celulare pe baza diagramelor de absorbție.

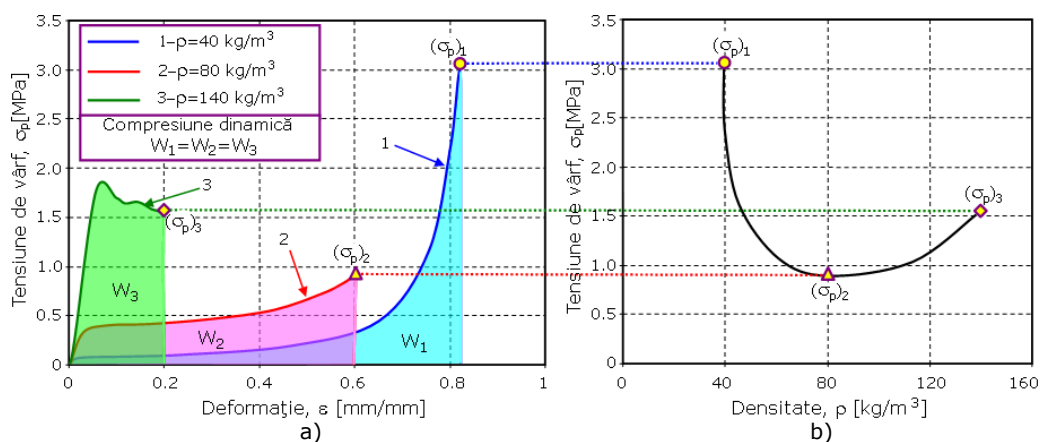


Fig. 6. Diagrama energiei rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică: a) Curbele detaliate tensiune-deformație; b) Variația tensiunilor de vârf funcție de densitate

Figura 6a prezintă în detaliu aceste curbe tensiune-deformație până în punctele amintite mai sus care poartă denumirea de tensiuni de vârf, iar figura 6b prezintă variația acestor tensiuni de vârf funcție de densitate. După cum se poate observa din figura 6, o cantitate foarte mică de energie este absorbită în zona liniar-elastică, deoarece această zonă este relativ mică. Marea parte a energiei este absorbită în zona de platou, deoarece aici are loc deformarea celulelor, acest lucru permițând o absorbție mare a energiei de impact la o încărcare aproape constantă.

Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_1$ , generează o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_1=3.054 \text{ MPa}$ . Spuma cu densitatea cea mai mare ( $140 \text{ kg/m}^3$ ), generează de asemenea o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_3=1.559 \text{ MPa}$  înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_3$ . Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $80 \text{ kg/m}^3$ ), care absoarbe aceeași energie  $W_2$ , ( $W_1=W_2=W_3=W=0.6 \text{ J}$ ), generând o tensiune de vârf de valoare mai mică,  $(\sigma_p)_2=0.914 \text{ MPa}$ .

Ca și aplicație a utilizării materialelor celulare în **Capitolul 6** se face **caracterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare**. În acest sens s-au prezentat ecuațiile clasice de determinare a rigidității echivalente la încovoiere și forfecare, iar pe lângă aceste ecuații s-au introdus noi relații de calcul a parametrilor amintiți (ec. 6 și 7).

$$(AG)_{ech}^1 = k \frac{12 cG_c + 2tG_f}{a^2 \rho_c^* + 2t\rho_f} \left( \rho_f \frac{btd^2}{2} + \rho_f \frac{bt^3}{6} + \rho_c^* \frac{bc^3}{12} \right) \quad (6)$$

$$(AG)_{ech}^2 = kb \left( cG_c^* + 2tG_f + 4tG_c^* \frac{\rho_f - \rho_c^*}{\rho_c^*} \right) \quad (7)$$

S-a realizat construirea hărților de degradare pentru mai multe tipuri de materiale de tip sandwich având fețe de aluminiu și miez de plută, fețe de aluminiu și miez de spumă, fețe din Stratimat și miez de spumă, fețe din epoxi și miez de spumă, respectiv fețe din poliester și miez de spumă. Construirea hărților de degradare s-a realizat luând în considerare diferite moduri de rupere (încrețirea fețelor, forfecarea miezului și ruperea feței), diferite grosimi ale fețelor și diferite densități ale miezului. Există un acord strans între mecanismul observat și cel așteptat al ruperii.

În Subcapitolul 6.7 s-a prezentat o comparație între analiza experimentală și analitică a acestor grinzi atât pe baza ecuațiilor clasice cât și pe baza noilor relații de calcul. Se poate observa foarte ușor că noile relații sunt în concordanță atât cu rezultatele experimentale cât și cu cele analitice, ceea ce înseamnă că noile relații de calcul sunt verificate și validate.

În **Capitolul 7** sunt enumerate principalele concluzii ce se desprind în urma studiului efectuat, precum și contribuțiile originale aduse cercetării în acest domeniu.



# 1. STADIUL ACTUAL ÎN CARACTERIZAREA MECANICĂ A MATERIALELOR CELULARE

## 1.1. Prezentarea materialelor celulare

Materialele celulare cu densitate scăzută sunt foarte des întâlnite în natură, iar în ultimul timp datorită proprietăților lor deosebite sunt fabricate de om pe scară tot mai largă. Atât aspectul lor structural cât și proprietățile mecanice, termice și alte proprietăți au fost studiate în detaliu de către matematicieni, fizicieni, ingineri și chiar tehnologi din industria alimentară, fiecare concentrându-se asupra geometriei și comportamentului materialelor celulare, [Ashby (1983), Gibson și Ashby (1997)].

Cuvântul "celulă" derivă din latinescul "cella": o despărțitură mică, într-un spațiu închis. Dintre materialele celulare cu această structură cele mai des întâlnite în natură sunt: lemnul, pluta, buretele și corali. Aceste materiale celulare naturale își au originea în aplicațiile practice încă de acum câteva mii de ani. De exemplu lemnul a fost utilizat la construcția piramidelor de către egipteni, iar pluta a fost utilizată din timpul Imperiului Roman pentru fabricarea dopurilor la sticlele cu vin [Horace (27 î.Hr.)]. În ziua de azi se produc materiale celulare la scară industrială. Aceste materiale se utilizează pe scară tot mai largă deoarece prezintă o rigiditate foarte ridicată și greutate redusă. La cel mai simplu nivel, structura celulară a acestor materiale este sub formă de fagure de miere. Cele mai reprezentative sunt spumele polimerice care se utilizează aproape în orice domeniu: de la nesemnificativele cești de cafea până la anumite componente ale navelor spațiale. Nu doar polimerii sunt utilizați pentru fabricarea materialelor celulare, de asemenea, se pot utiliza și alte materiale, cum ar fi: metalele, ceramicele și chiar sticla.

În acest capitol se vor introduce pe scurt: structura materialelor celulare, tehnologia de fabricare, proprietățile lor și domeniul de aplicabilitate al acestor materiale celulare. De asemenea, în aceasta lucrare se va studia comportamentul materialelor celulare confecționate din materiale plastice cum ar fi: spuma poliuretanică rigidă (PUR), polimetil metacrilatulul (PMMA) și policlorura de vinil (PVC). Determinarea proprietăților este necesară pentru a înțelege cum aceste materiale celulare ar putea fi folosite în aplicațiile ingineresti. Din punct de vedere economic, comparativ cu multe alte materiale, aceste materiale prezintă o clasă importantă între materialele ingineresti.

Un solid celular este confecționat dintr-o rețea interconectată de straturi solide cu forma muchiilor și fețelor celulelor bine definite [Gibson și Ashby (1997), Linul și Marșavina (2011b,d)]. În figura 1.1 sunt prezentate trei structuri caracteristice ale solidelor celulare. Figura 1.1a prezintă o vedere bidimensională cu aranjarea poligoanelor în pachete, celulele prezentând o structură hexagonală tip fagure. În mod obișnuit, celulele sunt poliedre cu legături în trei direcții; putându-le denumi de asemenea materiale celulare tridimensionale de tipul spumelor. Dacă solidul din care este concepută spuma este conținut doar în muchiile celulei, (celulele putând comunica între ele prin fețe deschise), se spune că spuma este cu celule deschise, (figura 1.1b). Dacă fețele, de asemenea, sunt solide, astfel încât fiecare celulă este închisă de celula vecina ei, se spune că celulele sunt închise ca în figura 1.1c; și bineînțeles că o anumită parte din spume pot fi cu celule parțial

închise și parțial deschise, [Gibson și Ashby (1997), Mills și alții (2003), Mills și Zhu (1999)].

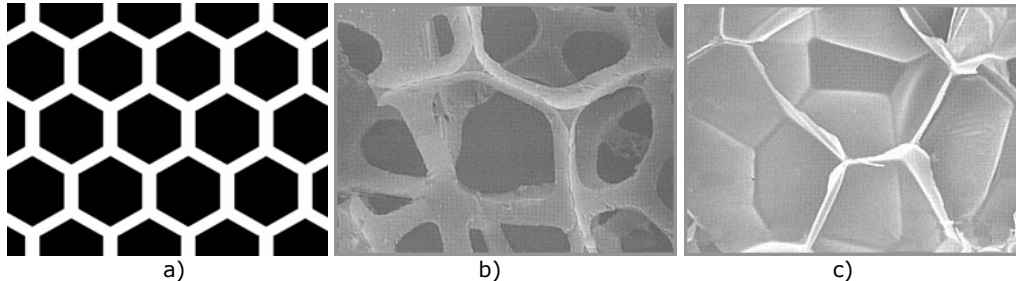


Fig. 1.1. Exemple de solide celulare: a) formă bidimensională tip fagure de miere; b) formă tridimensională de spumă cu celule deschise; c) formă tridimensională de spumă cu celule închise

Cea mai importantă caracteristică a solidelor celulare este densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ ; care este egală cu raportul dintre densitatea materialului celular,  $\rho^*$ , și densitatea solidului din care este confecționat materialul celular,  $\rho_s$ . Spumele speciale care prezintă densități foarte mici pot fi realizate cu o densitate relativă sub 0.001. Spumele polimerice utilizate pentru amortizare, împachetare și izolare au de obicei o densitate relativă cuprinsă între 0.05 și 0.2; pluta are o densitate relativă de aproximativ 0.14; iar cele mai multe rășinoase au densitatea relativă cuprinsă între 0.15 și 0.4.

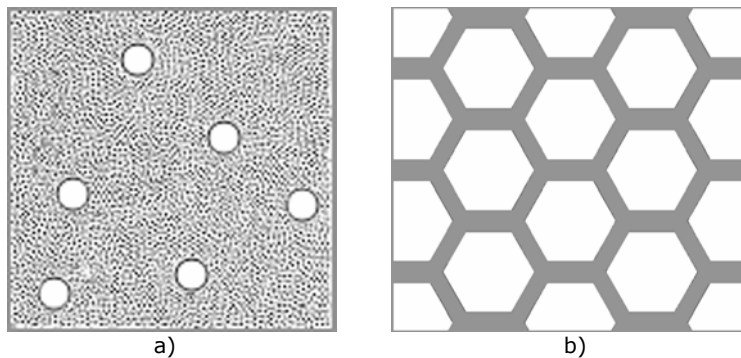


Fig. 1.2. Comparația între un solid cu pori izolați (a) și un solid celular (b)

Dacă densitatea relativă crește, peretele celulei se îngroașă iar spațiul dintre pori se micșorează, obținându-se în jurul valorii de 0.3 o tranziție de la un solid cu structură celulară la cea de solid cu pori izolați. Acest lucru este arătat în figura 1.2.

## 1.2. Tehnologia de fabricare a spumelor

Aproape orice material poate fi elaborat sub formă de spumă. Polimerii desigur, au cele mai multe caracteristici în comun. Dar, de asemenea, metalele, ceramicile, sticlele și chiar compozitele pot fi fabricate cu structură celulară. În acest subcapitol se prezintă pe scurt tehnologia de fabricare a spumelor, [Ashby (1983), Gibson și Ashby (1997)].

### 1.2.1. Noțiuni generale

Numele de poliuretan acoperă o extrem de diversificată și de eterogenă familie de polimeri pe bază de legături de uretan, cu o gamă largă de proprietăți și întrebuințări. Toți polimerii au la bază produsul reacției dintre izocianați organici și compuși conținând grupuri cu hidrogen activ (exemplu polioli). Reacția - denumită poliadiție - poate avea drept rezultat diferite materiale plastice: spume moi sau dure, flexibile sau rigide, materiale termorigide sau termoplaste.

Producerea spumelor polimerice se poate realiza atât prin mijloace mecanice, chimice cât și fizice. Sunt utilizate diferite tehnici pentru a realiza spume din diferite tipuri de materiale. Unele dintre metodele cele mai frecvent utilizate sunt următoarele, [Frisch (1976), Landrock (1995)]:

- descompunerea termică a agenților chimici de suflare, generând fie azot, fie dioxid de carbon, fie ambele, prin aplicarea de căldură sau ca urmare a căldurii de reacție exotermă rezultată în cursul polimerizării.

- spumele polimerice sunt realizate, de asemenea, prin introducerea gazului spumant în lichidul monomer sau polimer fierbinte, permițând spumelor să crească și să se stabilizeze, urmată de o solidificare, [Suh și Skochdopole (1980), Gibson și Ashby (1997)]. Gazul este introdus fie prin agitare mecanică, fie prin suflarea amestecului de agent în polimer. Amestecul fizic de gaze reprezintă gaze inerte ca: dioxid de carbon sau azot; ele fiind direcționate într-o soluție în polimerul fierbinte la presiune înaltă urmată de o expandare care reduce presiunea.

- lichidele cu punctul de fierbere scăzut cum ar fi fluorocarburile sau clorura de metilen sunt amestecate în masa polimerului și evaporate ca urmare a căldurii de reacție exotermă care rezultă sau prin aplicarea propriu-zisă a căldurii.

- volatilizarea gazelor produse de căldura exotermă de reacție pe durata polimerizării, apare în reacția isocianatului cu apa pentru a forma dioxidul de carbon.

- extinderea gazului dizolvat în masa polimerului, reduce presiunea sistemului.

- încorporarea de micro-sfere goale în masa polimerului. Micro-sferele pot consta de exemplu din bile (mărgel) goale de sticlă.

- extinderea bilelor umplute cu gaz prin aplicarea de căldură sau extinderea acestor mărgel în masa polimerului de căldura de reacție, de exemplu, extinderea bilelor de polistiren într-un sistem de poliuretan sau rășină epoxidică.

- fabricarea spumelor poate avea loc prin tehnici diferite. Acestea pot cuprinde, [Saunders (1972), Landrock (1995)]:

- producția de blocuri continue prin turnare (figura 1.3a) sau impingement, folosind mașini pentru spumă multicomponente.

- turnare prin comprimarea spumei.

- cu ajutorul reacțiilor de turnare prin injecție.

- formarea spumei în locul de turnare de la un cap dual sau multi component.

- pulverizarea spumei (figura 1.3b).

- extrudarea spumei folosind mărgel (bile) extensibile sau granule (peleți).

- turnarea rotațională a spumelor.

- spumarea spumei, fie prin introducerea de aer, fie prin introducerea unui solvent volatil cu punct de fierbere scăzut (de exemplu diclorodifluormetan, F-12).

- laminarea spumelor (pentru producerea spumelor de bord).

- realizarea sandwich-urilor din spumă (figura 1.3c).

- procesele de precipitare a spumei, în cazul în care faza polimerului este formată prin polimerizarea sau precipitarea dintr-un lichid.



Fig. 1.3. Tehnici de fabricare a spumei: a) spumă bloc prin turnare, b) pulverizarea spumei c) compozite din spumă

Este bine de știut faptul că aproape orice rășină termoplastică și termorigidă poate fi produsă astăzi în formă celulară prin metodele menționate mai sus. Proprietățile fizice ale spumelor reflectă în foarte multe cazuri proprietățile polimerilor dacă se iau în considerare densitatea și geometria celulei.

Există numeroase cărți, capitole din cărți, și recenzii publicate pe spume ce acoperă un spectru larg al materialelor celulare, [Berins (1991), Frisch (1976), Saundera și Hansen (1972), Benning (1969), Hilyard (1982), Shutov (1985), Berlin și alții (1982), Oertel (1985), Ferrigo (1967), Buist, și Gudogen (1968), Buist (1978), Bender (1965), Saunders și Frisch (1983), Woods (1982) și Landrock (1995)].

Spumele micro-celulare, cu mărimea celulelor de ordinul a  $10 \mu$ , pot fi realizate prin saturarea polimerului la presiunea și temperatura camerei, cu un gaz inert. Fiecare proces poate produce atât spume cu celule deschise cât și spume cu celule închise; structura finală depinzând de reologia și tensiunile de suprafață ale fluidului topit. Spumele cu celule închise, sunt supuse uneori unui proces numit reticulare, în care fețele sunt rupte dând o spumă cu celule deschise.

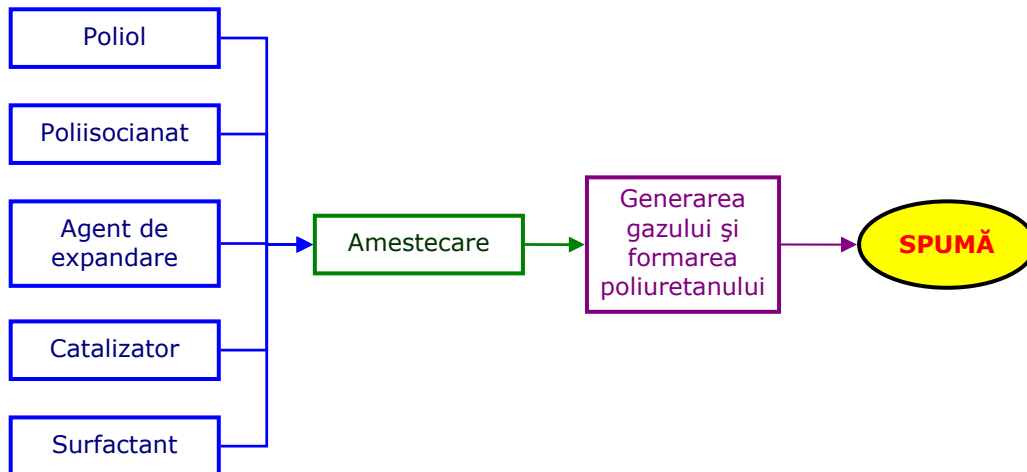


Fig. 1.4. Mecanismul de realizare al spumei [Landrock (1995)]

În cele din urmă, spumele polimerice micro-celulare cu densitate scăzută și aerogelurile cu densitatea relativă mai mică de 0.002 și mărimea celulei mai mică de  $0.1 \mu\text{m}$ , pot fi fabricate prin metodele de separare a fazelor; una dintre metode

fiind de a se precipita gelul polimeric cu densitate scăzută într-un lichid, urmat de scoaterea lichidului prin evaporare, [Le May și alții (1990)].

Spumele poliuretane, PUR (numite adesea și spume uretane), sunt preparate prin realizarea reacției dintre poliisocianat și polioliol în prezența unui agent de expandare, unui surfactant și a unui catalizator, fără încălzire exterioară a sistemului de spumare.

Principiul de preparare al spumei poliuretane se bazează pe apariția simultană a două reacții, adică, formarea poliuretanului și generarea de gaz în prezența unui catalizator și a unui surfactant, așa cum se poate observa în figura 1.4. [Landrock (1995)].

### 1.2.2. Clasificarea spumelor poliuretane

Spumele poliuretane pot fi clasificate în două categorii principale: spume rigide și spume flexibile, (figura 1.5). În unele cazuri, spumele flexibile pot fi divizate la rândul lor în spume flexibile și spume semi-flexibile (sau spume semi-rigide). În unele cazuri spumele semi-rigide și cele semi-flexibile se disting prin fenomenul de revenire rezultat în urma solicitării de compresiune. De exemplu, spumele semi-rigide, care au rigiditate mare, reziliență mică și care revin complet după o comprimare completă, pot fi clasificate ca și spume flexibile. În contrast, spumele semi-rigide, care prezintă o revenire incompletă, pot fi clasificate ca și spume rigide, [Landrock (1995), Ashyda (2007)].

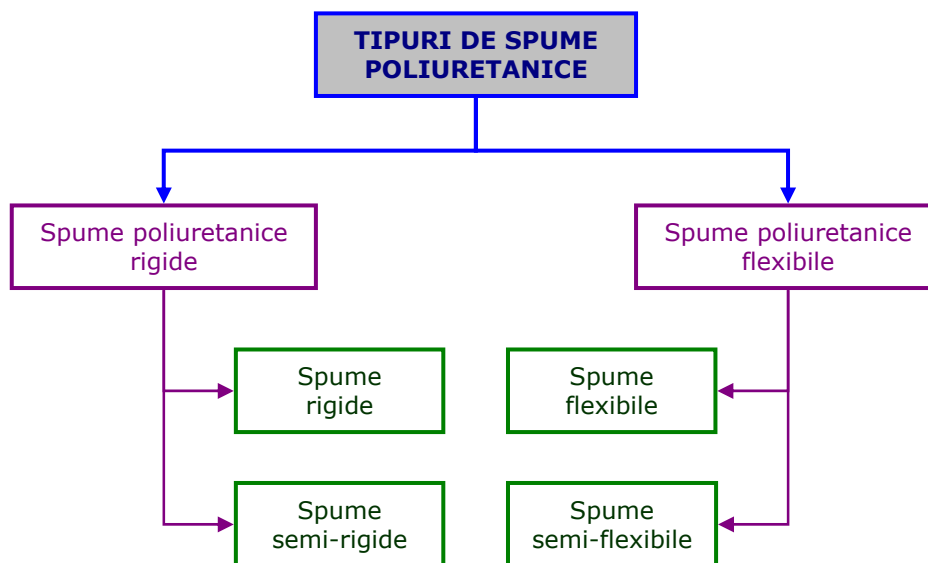


Fig. 1.5. Clasificarea spumelor poliuretane

Aceste spume pot fi realizate prin alegerea corectă a polioliolului și poliisocianatului în ceea ce privește structura chimică, greutatea echivalentă și funcționalitatea lor. Polioliolii pot fi considerați ca și un material din care se realizează spuma, iar poliisocianatul poate fi considerat agentul de îmbinare. O clasificare aproximativă a spumelor pe baza tipului de polioliol folosit este prezentată în Tabelul 1.1., [Ashida (1994), Ashida (2007), Landrock (1995)]:

Tabelul 1.1. Clasificarea spumelor poliuretanic

Poliol	Spumă Rigidă	Spumă Semi-Rigidă	Spumă Flexibilă
Nr. OH*	350-260	100-200	5.6-70
Echivalența OH**	160-100	560-280	10000-800
Funcționalitate	3.0-8.0	3.0-3.5	2.0-3.0
Modulul de elasticitate la 23°C, [MPa]	>700	700-70	<70

\*Numărul OH:  $mgKOH/g$ \*\*Echivalentul OH:  $56.110/Nr.OH$ 

### 1.2.3. Procesele de realizare a spumelor poliuretanic

Spumele poliuretane pot fi realizate prin următoarele procese, [Landrock (1995)]:

- proces simplu, (figura 1.6);
- proces semi-prepolimer (cvasi-prepolimer), (figura 1.7);
- proces prepolimer, (figura 1.8).

Procesul simplu este cel mai des utilizat. Procesul semi-prepolimer este preferat uneori datorită avantajelor sale, cum ar fi: o prelucrare ușoară, creșterea stabilității a spumei și prezența unor reacții exoterme scăzute, pe când procesul prepolimer este utilizat doar pentru scopuri limitate. Diagramele schematizate pentru cele trei tipuri de procese sunt prezentate în figurile 1.6, 1.7 și 1.8.

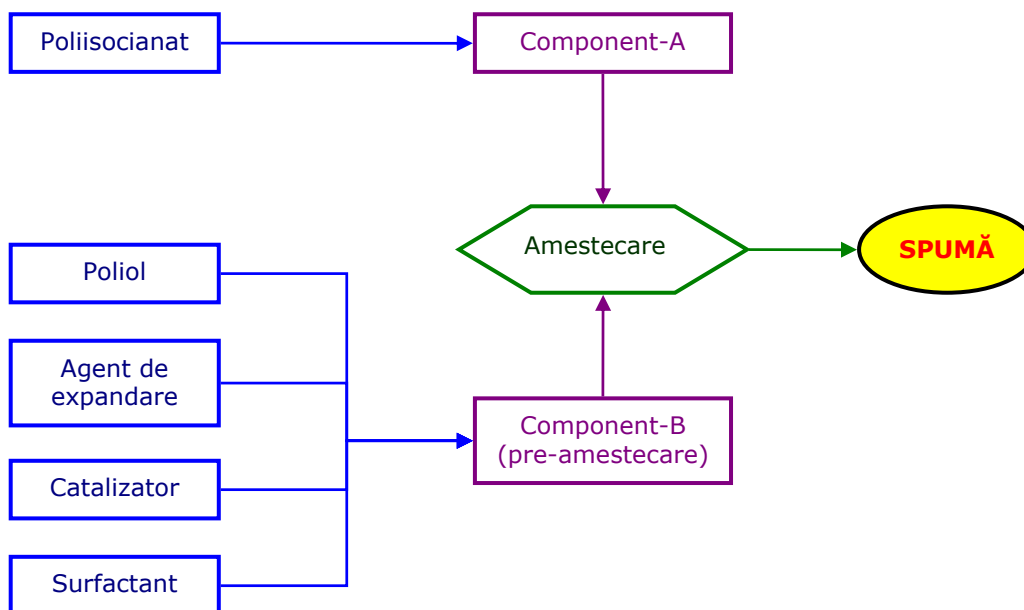


Fig. 1.6. Schematizarea diagramelor proceselor de formare a spumei.  
Procesul simplu.

Procesul simplu se utilizează atât pentru spumele flexibile cât și pentru cele rigide. Pentru cazul spumelor bloc, ingredientele sunt furnizate separat pentru

amestecare. În scopul obținerii unei amestecări cât mai precise și a reglării vâscozității, unele dintre ingrediente cum ar fi polioliul și catalizatorul, apa și aminele cu efect catalizator sunt pre-amestecate.

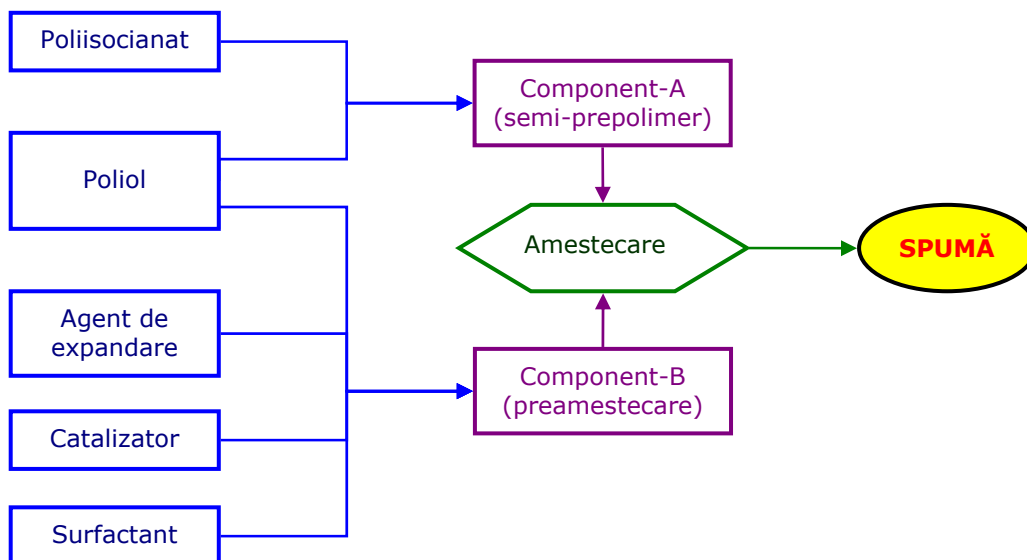


Fig. 1.7. Schematizarea diagramelor proceselor de formare a spumei.  
Procesul semi-prepolimer (cvasi-prepolimer)

Sistemele de amestecare prealabilă cu două componente sunt utilizate pe scară largă deoarece aceste componente pot fi furnizate în două recipiente separate. În plus, mașinile care se ocupă de pregătirea spumei pot avea o structură simplă, prezentând o manipulare și o întreținere foarte ușoară.

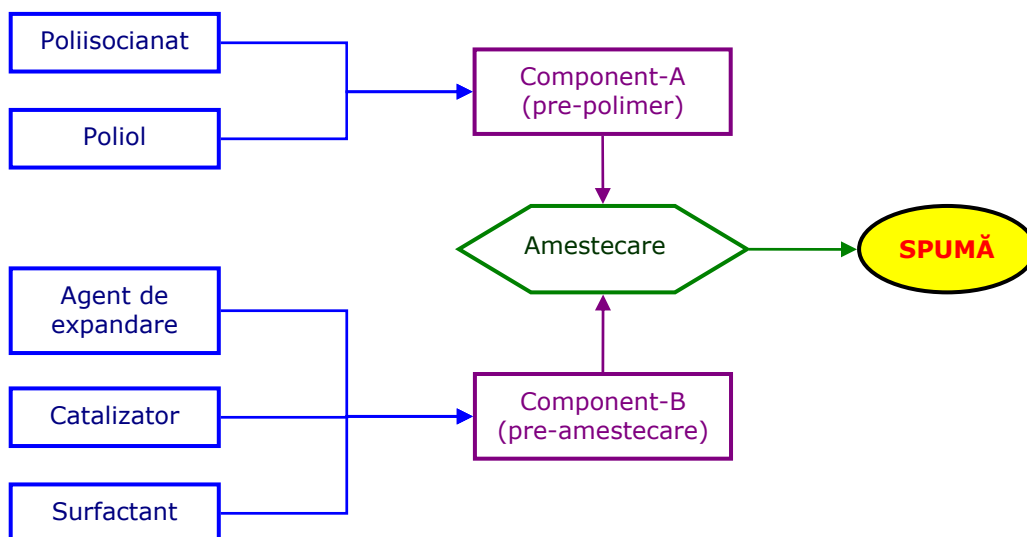


Fig. 1.8. Schematizarea diagramelor proceselor de formare a spumei.  
Procesul prepolimer

Procesul semi-prepolimer prezintă aceleași avantaje ca și procesul simplu, prezentând tot sisteme cu două componente de amestecare prealabilă. Procesele de mai sus sunt realizate prin amestecarea componentelor la temperatura ambiantă, atât pentru spumele poliuretanicе rigide cât și pentru cele flexibile.

În figura 1.9 este prezentat cel mai simplu mod de obținere a unei spume poliuretanicе rigide, prin simpla amestecare la temperatura ambiantă a celor două bicomponente de poliisocianat și polioliol (A și B).



Fig. 1.9. Modul de obținere al spumei

Primul brevet pentru realizarea unei spume poliuretanicе flexibile a fost dat lui Zaunbracher și Barth în 1942, [Zaunbracher și Barth (1945)].

### 1.3. Structura solidelor celulare

Structura celulară a acestor materiale a fascinat filosofii și oamenii de știință timp de cel puțin 300 de ani. Hooke a examinat forma lor, Kelvin a analizat împachetarea lor (aranjarea lor), iar Darwin a speculat originea și funcția lor. Subiectul este important de a fi utilizat aici deoarece proprietățile solidelor celulare depind în mod direct de forma și structura celulelor. Scopul nostru este de a caracteriza mărimea, forma și topologia lor.

#### 1.3.1. Noțiuni generale

Cea mai importantă caracteristică structurală a solidelor celulare este densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ , (densitatea spumei,  $\rho^*$ , împărțită la densitatea solidului, cea din care este confecționată spuma,  $\rho_s$ ). Frațiunea dintre volumul de goluri și volumul total al spumei poartă denumirea de porozitate și este similară cu  $(1 - \rho^*/\rho_s)$  și este cuprinsă între 0 și 1, iar ca procentaj între 0 și 100%. General vorbind, solidele celulare au densitatea relativă mai mică de 0.3 ; multe dintre ele ajungând chiar și până la 0.003.

La prima vedere s-ar presupune ca dimensiunea celulei, de asemenea ar trebui să fie un parametru important, și uneori așa și este; dar cele mai multe proprietăți mecanice și termice depind numai într-o măsură relativ mică de



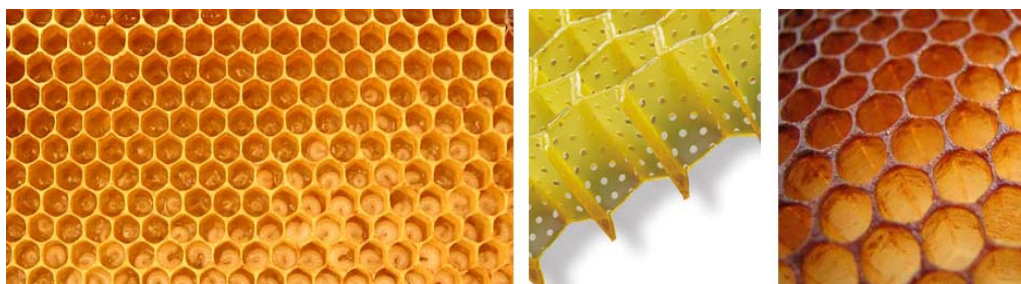
dimensiunile celulelor. Forma celulelor creează mult mai multe probleme; acolo unde celulele sunt echiaxiale proprietățile sunt izotrope, iar în cazul în care celulele sunt ușor alungite sau turtite proprietățile depind în cea mai mare măsură de direcția de formare.

De asemenea, este importantă o distincție topologică a celulelor. Prima deosebire care trebuie observată este între celulele bidimensionale, în care pereții celulei au o generator comună, (cum ar fi exemplul structurii de tip fagure de miere) și cele tridimensionale în care pereții celulei prezintă o orientare aleatoare în spațiu, (de exemplu spumele). Această distincție este utilă deoarece modelarea proprietăților celulelor bidimensionale este mult mai simplă decât în cazul celulelor tridimensionale, (Capitolul 2). În cazul tridimensional, trebuie făcută de asemenea diferența între celulele care sunt închise, (fiecare celulă este separată de cea vecină ei prin membrane, numite fețe), și cele care sunt deschise, (aceste celule fiind interconectate între ele).

### 1.3.2. Structura celulară a materialelor celulare

Structura solidelor celulare variază de la forma aproape perfectă de tip fagure de miere, până la cele mai complexe forme tridimensionale: structura bureților și a spumelor.

Dacă a fost vreodată o structură care să fascineze matematicienii, fizicienii și biologii, aceasta cu siguranță este structura de fagure, [Gibson și Ashby (1997)] (figura 1.10).



[www.fotkyfoto.ro](http://www.fotkyfoto.ro); [www.shapeshed.com](http://www.shapeshed.com)  
Fig. 1.10. Structura de tip fagure de miere

Această structură este cu siguranță cea mai studiată și cea mai frumoasă structură celulară. Euclid (Secolul 3 î.Hr.), a admirat regularitatea sa, iar Pliny (77 d.Hr.), vorbește despre oamenii care și-au dedicat viața acestui studiu. Literatura timpurie este vastă - Thompson's (1961), enumeră o listă cu peste 30 de lucrări pe această temă publicate înainte de 1860, care includ lucrările a unor autori ca: Colin Maclaurin (1742), Georges Louis Leclere Buffon (1753) și Charles Darwin (1859). Regularitatea acestor celule de tip fagure de miere este remarcabilă, deși nu este așa de perfectă cum a crezut Wyman în anul 1865, [Wyman (1965)].

Structurile de tip fagure sunt fabricate din metal și hârtie pentru miezurile panourilor de tip sandwich și din ceramică pentru suporturile catalizatorilor și componentelor schimbătoarelor de căldură, (figura 1.11).

Cele mai multe structuri celulare de tip fagure de miere au forma celulelor hexagonale, dar pot fi cu formă pătrată sau triunghiulară, acestea din urmă fiind mai puțin eficiente în sensul că acestea folosesc mai mult solid pentru a include același volum de pori.

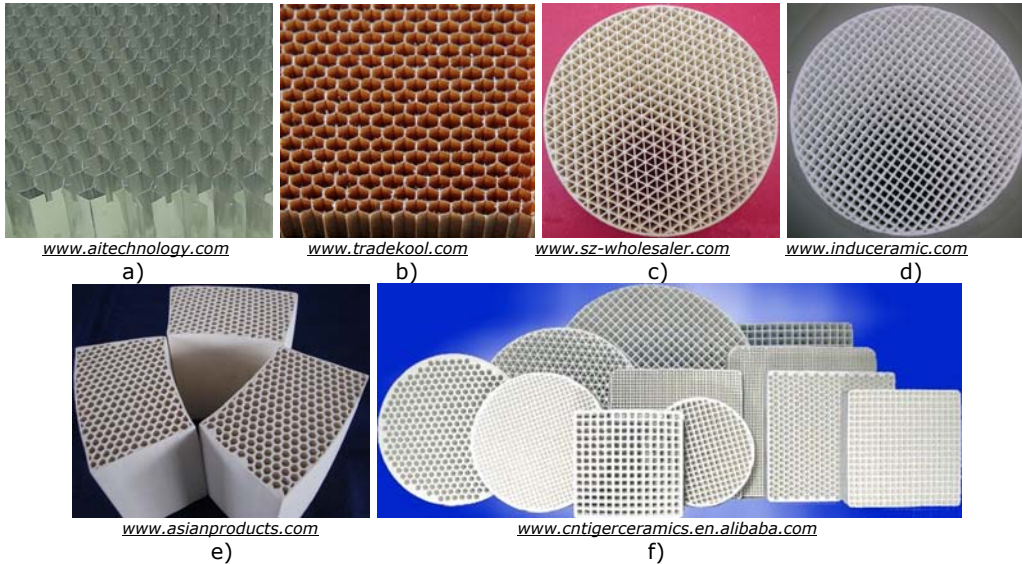


Fig. 1.11. Materiale celulare bidimensionale: a) fagure din aluminiu, b) fagure din hârtie (rășină fenolică pe suport de hârtie), c) fagure din ceramică cu celule triunghiulare, d) fagure din ceramică cu celule pătrate, e) fagure din ceramică cu celule hexagonale, f) tipuri de faguri din ceramică.

Studierea geometriei solidelor celulare tridimensionale, (la care le putem spune simplu spume), are o istorie, aproape la fel de veche ca și structurile de tip fagure de miere. Plateau (1873), în tratatul său despre geometria solidului, a identificat forma celulelor sub formă de dodecaedru rombic, (cu 12 fețe). Această formă a celulei prezentată de Plateau este cu siguranță cea mai eficientă formă pentru a umple spațiul dintre celule. Dar, pentru mai bine de un secol, s-a crezut că acest spațiu dintre celule este umplut cel mai bine de către tetracaidecaedrul lui Kelvin, [Kelvin (1887)], (figura 1.12a).

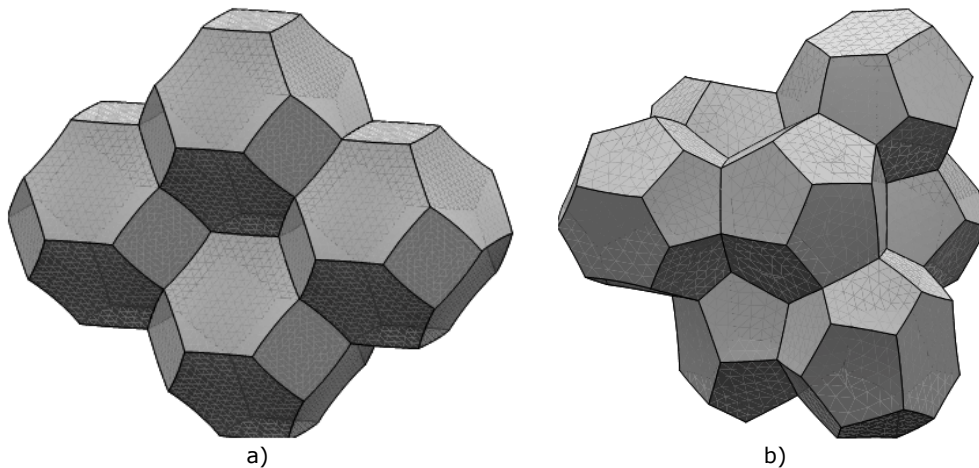


Fig. 1.12. Tipuri de celule unitare: a) Tetracaidecaedrul lui Kelvin, [Li și alții (2005), Mills (2007) și Kusner (1996)]; b) Forma celulei obținută de Weaire și Phelean, [Kusner (1996), Gibson și Ashby (1997) și Mills (2007)]

Recent, utilizând programe de calculator specializate pentru minimizarea suprafeței Brakke, (1992), Weaire și Phelan (1994) au găsit o celulă unitară cu aria suprafeței pe unitatea de volum și mai mică, (de aproximativ 0.3 %), (figura 1.12b).

Celula unitară este formată din șase celule cu 14 fețe, (având 12 fețe pentagonale și 2 fețe hexagonale) și două dodecaedre pentagonale, toate cu volume egale. Doar fețele hexagonale sunt plane, toate celelalte fețe pentagonale sunt curbate.

Dar, eficiența spațiului de umplere nu este singurul factor care influențează forma celulei. Pentru a se obține o structură cât mai bună a acestor materiale celulare este de preferat să se analizeze niște spume reale. În figura 1.13 este prezentată o gamă diversificată de spume realizate de om: 3 sunt spume polimerice, 2 sunt spume metalice, 2 sunt spume ceramice și una este o spumă realizată din sticlă, [Ashby (1983), Gibson și Ashby (1997)].

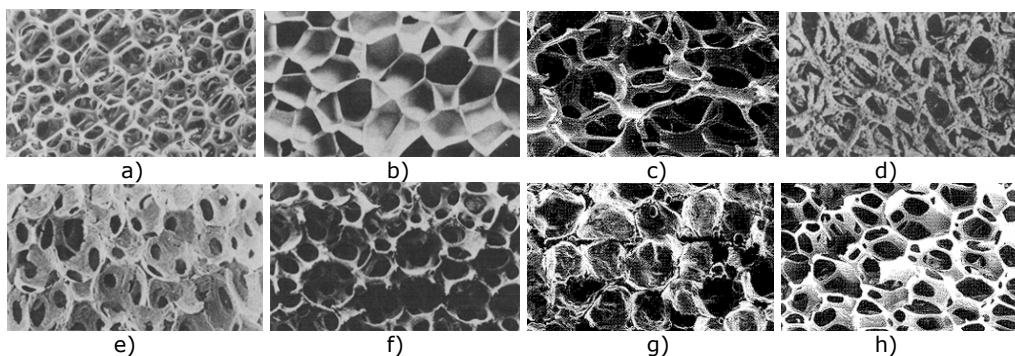


Fig. 1.13. Materiale celulare realizate de om: a) poliuretan cu celule deschise, b) polietilenă cu celule închise, c) nichel, d) cupru, e) zirconiu, f) mullită, g) sticlă, h) o spumă polieterică atăt cu celule închise cât și cu celule deschise

În figurile 1.13a și 1.13b, se poate observa diferența dintre spumele cu celule deschise și cele cu celule închise. În primul caz, (cazul spumelor cu celule deschise), materialul solid formează doar muchiile celulei, pe când în cel de-al doilea caz, (cazul spumelor cu celule închise), sunt prezente niște membrane solide care închid fețele celulei, aceste membrane de cele mai multe ori nefiind uniform distribuite pe toată fața celulei, (efectul neuniformității fiind discutat în Capitolul 2).

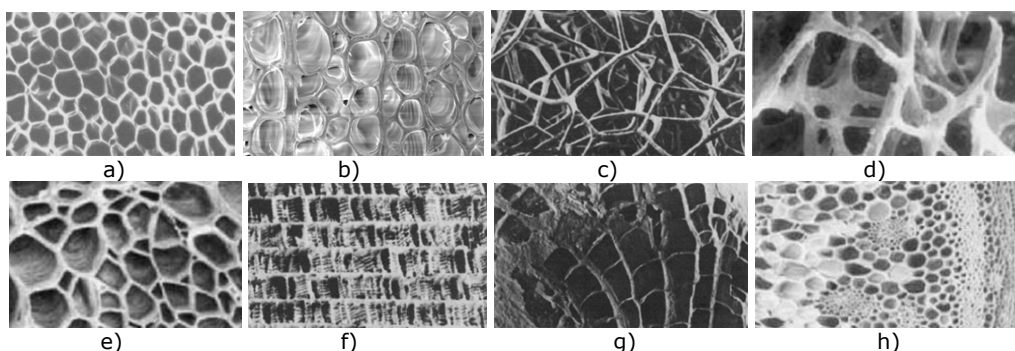


Fig. 1.14. Materiale celulare naturale: a) plută, b) balsa, c) burete, d) os spongios, e) frunză de iris, f) os de sepie, g) coral, h) tulpina unei plante

În figura 1.14 se poate observa că spumele naturale prezintă mult mai multe variații în structura lor celulară, [Ashby (1983), Gibson și Ashby (1997), Ashby (2008), Chincea (2010), Gibson și alții (1981), Motz (2001), Pflug și Vangrimde (2003)]. De exemplu, unele spume cum ar fi pluta (figura 1.14a) și balsa (figura 1.14b), prezintă celule închise care au o structură aproape regulată de fagure de miere.

Alte spume, asemenea bureților (figura 1.14c) sau oaselor spongioase (figura 1.14d), prezintă celule deschise cu conexiuni în trei, patru, cinci chiar șapte direcții. Spumele asemenea corailor (figura 1.14e) sau oaselor de sepie (figura 1.14f), prezintă structură anizotropă: celulele sunt alungite sau aliniate în anumite direcții, acestea dându-le proprietăți care depind de direcția în care sunt măsurate. Spre exemplu lemnul, frunzele de iris (figura 1.14g) și chiar tulpinile plantelor (figura 1.14h) prezintă asemenea anizotropii datorită formelor alungite ale celulelor.

De asemenea, după cum se poate vedea în figura 1.15, foarte multe alimente au structură celulară.

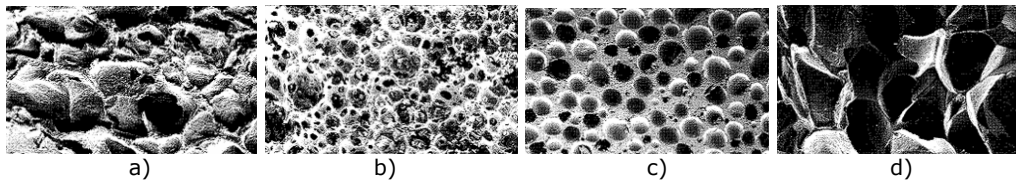


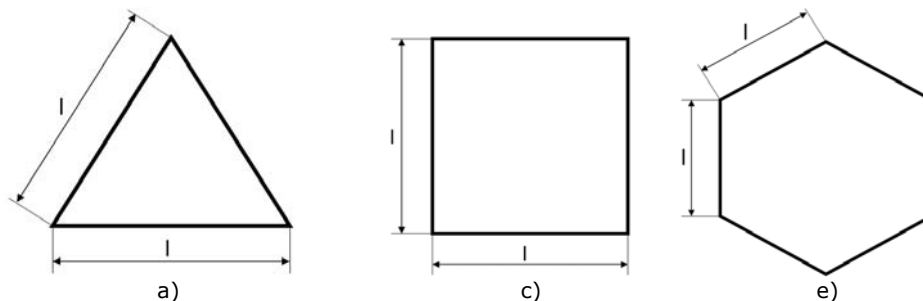
Fig. 1.15. Alimente de tipul spumelor: a) pâine, b) bezele, c) ciocolata, d) alimente crocante

Pâinea (figura 1.15a), de obicei prezintă celule închise, extinse prin fermentarea drojdiei. Bezelele, (figura 1.15b), sunt realizate din ou spumant și zahăr. Ciocolata (figura 1.15c), precum și unele tipuri de bomboane sunt adesea extinse pentru a le face mult mai atractive pentru mâncat sau mai ieftine.

Proprietățile oricărui dintre aceste solide celulare depind de modul cum este distribuit materialul solid în fețele și muchiile celulei. Astfel, primul pas în înțelegerea acestor proprietăți este de a cuantifica, pe cât posibil, structurile lor. Mai întâi se va prezenta forma și mărimea celulelor, urmând ca apoi să se determine ecuațiile privind densitatea relativă.

### 1.3.3. Forma, mărimea și topologia celulelor

Forma celulelor unitate, pentru un plan bidimensional este prezentată schematizat în figura 1.16. Aceste forme sunt valabile atât pentru celulele izotrope cât și pentru cele anizotrope, [Gibson și Ashby (1997)].



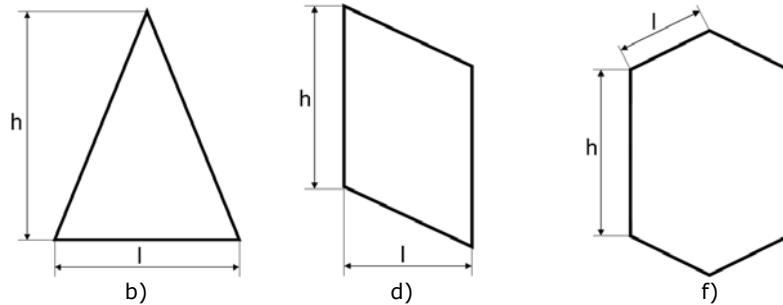


Fig. 1.16. Forma celulelor în plan bidimensional: a) triunghi echilateral, b) triunghi isoscel, c) pătrat, d) paralelogram, e) hexagon regulat, f) hexagon neregulat

Chiar și atunci când forma celulei este fixată, celulele pot fi aranjate în mai multe feluri, (figura 1.17), dând structuri care prezintă legături diferite între muchii, respectiv proprietăți diferite, [Fleck (2010), Gibson și Ashby (1997), Fleck și Qui (2007), Grenestedt (1999)].

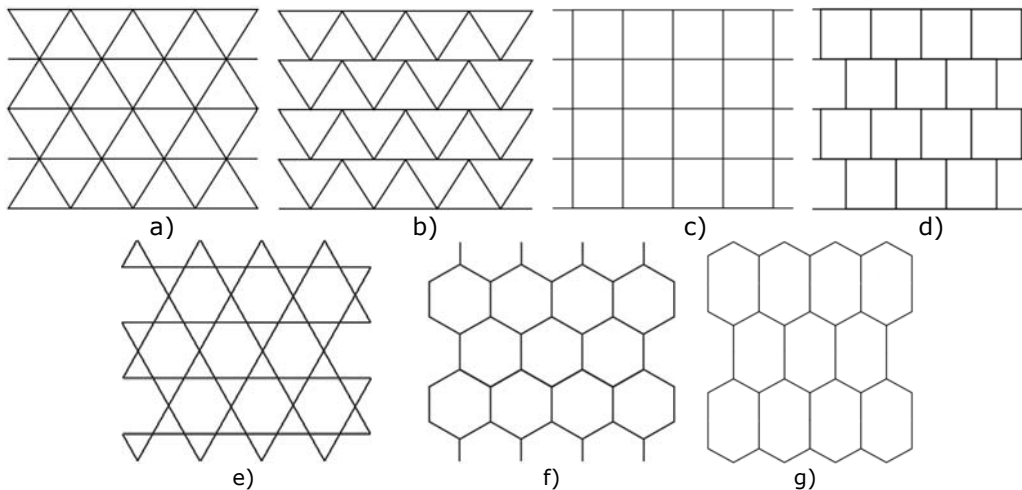
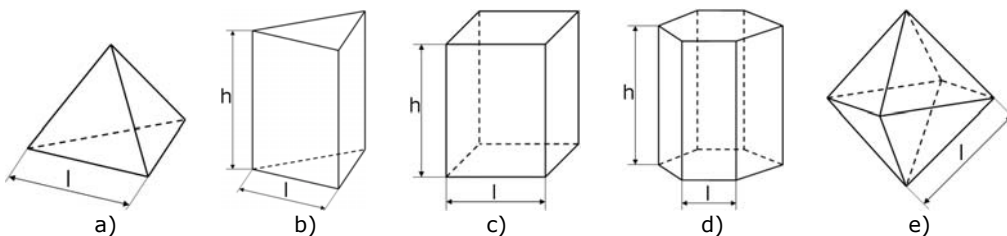


Fig. 1.17. Modul de aranjare al celulelor în plan bidimensional: utilizând triunghiuri echilaterale, (a, b), utilizând pătrare, (c, d); forma Kagom, (e); utilizând hexagoane regulate, (f); utilizând hexagoane neregulate, (g).

În plan tridimensional se întâlnesc o varietate foarte mare de forme ale celulelor. În figura 1.18 sunt prezentate formele de celule care pot fi împachetate împreună pentru a umple spațiul dintre ele; geometriile lor sunt caracterizate în Tabelul 1.2, [Gibson și Ashby (1997), Li și alții (2005), Mills (1999)].



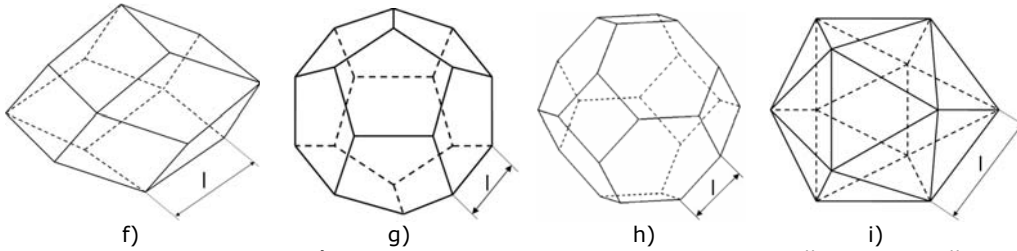


Fig. 1.18. Forma celulelor în plan tridimensional: a) tetraedru, b) prismă triunghiulară, c) prismă dreptunghiulară, d) prismă hexagonală, e) octaedru, f) dodecaedru rombic, g) dodecaedru pentagonal, h) tetracaidecaedru, i) icosaedru

Tabelul 1.2. Proprietățile geometrice ale celulelor izolate

Forma celulei	Nr. de fețe, $f$	Nr. de muchii, $n$	Nr. de noduri, $v$	Volumul celulei	Suprafața	Lungimea muchiei	Obs.
Tetraedru	4	6	4	$0.118l^3$	$l^2\sqrt{3}$	$6l$	*
Prismă triunghiulară	5	9	6	$\frac{\sqrt{3}}{4}l^3A_r$	$\frac{\sqrt{3}}{2}l^2(1+2\sqrt{3}A_r)$	$6l\left(1+\frac{A_r}{2}\right)$	**
Prismă pătrată	6	12	8	$l^3A_r$	$2l^2(1+2A_r)$	$8l\left(1+\frac{A_r}{2}\right)$	**
Prismă hexagonală	8	18	12	$\frac{3\sqrt{3}}{2}l^3A_r$	$3\sqrt{3}l^2\left(1+2\frac{A_r}{\sqrt{3}}\right)$	$12l\left(1+\frac{A_r}{2}\right)$	**
Octaedru	8	12	6	$0.471l^3$	$3.46l^2$	$12l$	*
Dodecaedru rombic	12	24	14	$2.79l^3$	$10.58l^2$	$24l$	**
Dodecaedru pentagonal	12	30	20	$7.663l^3$	$20.646l^2$	$30l$	*
Tetacai-decaedrul	12	36	24	$11.31l^3$	$26.80l^2$	$36l$	**
Icosaedrul	20	30	12	$2.182l^3$	$8.660l^2$	$30l$	*

\* Regulat.

\*\* Ambalate pentru a umple spațiul.

Asemenea celulelor bidimensionale, celulele tridimensionale trebuie aranjate astfel încât spațiul dintre ele să fie plin. Dintre spumele prezentate în figura 1.18, doar unele dintre ele îndeplinesc acest criteriu al umplerii spațiului dintre celule: prismele triunghiulare, rombice și hexagonale, dodecaedrul rombic (un corp cu 12 fețe sub formă de romb), și tetracaidecahedronul (un corp cu 4 fețe pătrate și 8 fețe hexagonale), [Plateau (1873), Kelvin (1877), Smith (1952), Thompson (1961), Ko (1965)]. Rezultatul aranjării lor este prezentat în figura 1.19.

Cele mai multe spume, desigur, nu sunt aranjate regulat ca unități identice, ci conțin celule de diferite mărimi și forme, cu un număr diferit de fețe și muchii. Dar, chiar și cele mai aleatoare spume respectă regulile topologice, ceea ce înseamnă că se pot face ușor și precis afirmații despre ele.

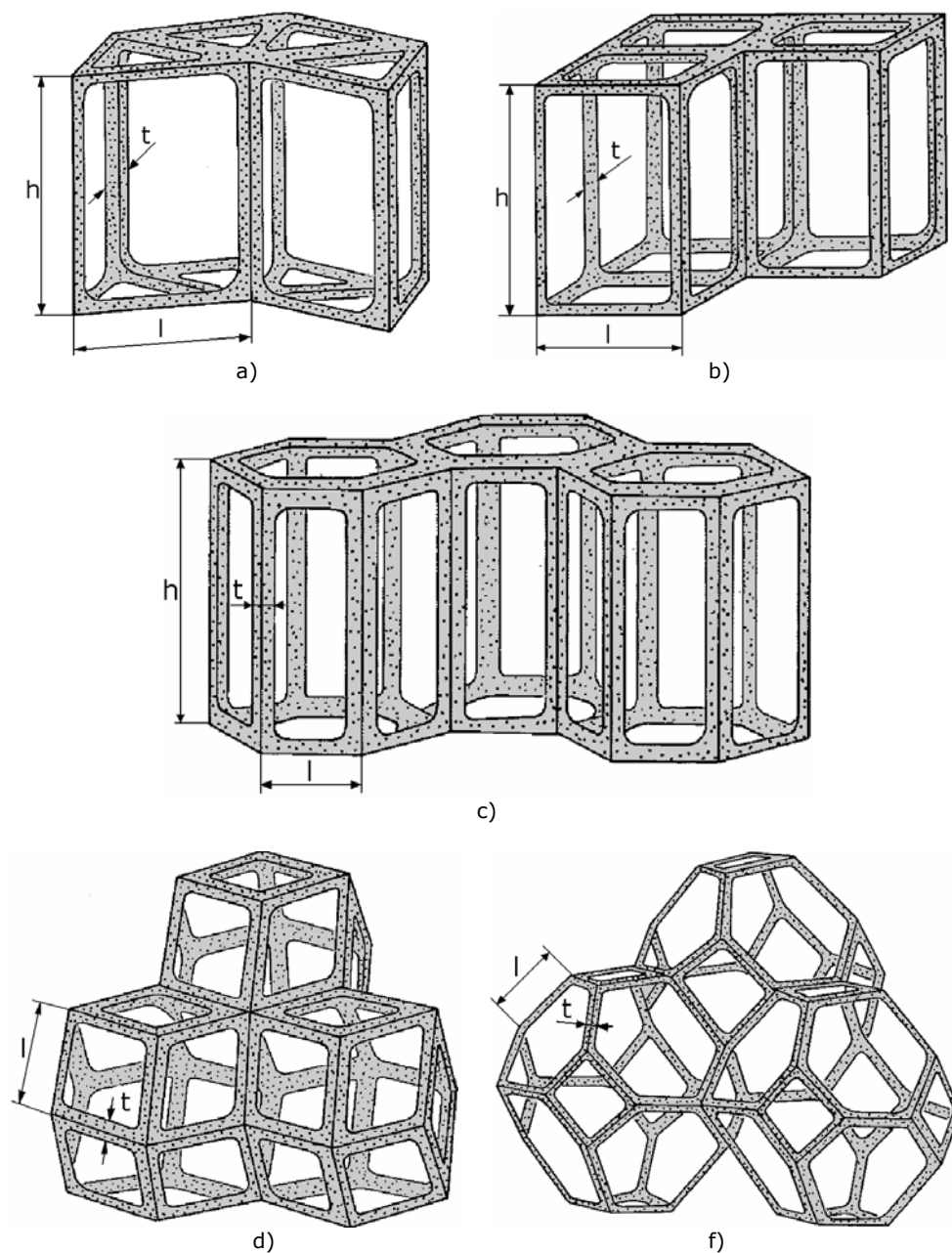


Fig. 1.19. Modul de aranjare al celulelor în plan tridimensional: a) prisme triunghiulare, b) prisme dreptunghiulare, c) prisme hexagonale, d) dodecaedru rombic, f) tetracaidecaedru, [Gibson și Ashby (1997)].

Topologia celulelor este un domeniu care a fascinat fizicienii, biologii și metalurgiștii de secole: literatura de specialitate conține considerabilele contribuții ale unor personalități ca: Robert Hooke, [Hooke (1664)], Lord Kelvin și, desigur, Leonhard Euler; și continuă să provoace oamenii de știință cu înclinație spre această

geometrie, [Lewis (1923), (1928), (1943), Rivier (1983), (1985), (1986), Weaire (1983), Weaire și Rivier (1984), Ferro și Fortes (1985), Rosa și Fortes (1986), Fortes (1986a,b)].

#### 1.3.4. Calculul densității relative

Proprietățile unei spume depind, mai presus de toate, de densitatea relativă. Alegerea cea mai bună a ecuației pentru calculul densității relative depinde de dimensionalitatea structurilor, (fagure de miere sau spumă) și de faptul dacă spuma are celule deschise sau celule închise. Dacă lungimea muchiei unei celule este  $l$ , iar grosimea peretelui celulei este  $t$ , iar dacă  $t \ll l$ , (aceasta însemnând că densitatea relativă este mică), atunci pentru materialele celulare de tip fagure de miere avem următoarea relație:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_1 \frac{t}{l} \quad (1.1a)$$

Pentru toate spumele cu celule deschise având lungimea muchiei  $l$  și grosimea  $t$ , avem:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_2 \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (1.1b)$$

Iar, de asemenea, pentru toate spumele cu celule închise având lungimea feței  $l$  și grosimea uniformă  $t$ , avem:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_3 \frac{t}{l} \quad (1.1c)$$

Unde  $C_1$ ,  $C_2$  și  $C_3$  sunt constante numerice, egale aproape cu unitatea, acestea depinzând de detaliile legate de forma celulei.

Proprietățile materialelor celulare sunt calculate funcție de dimensiunile celulei  $t$  și  $l$ , acestea fiind apoi convertite la densitatea relativă cu ajutorul ecuațiilor (1.1a-c), introducând o singură constantă numerică  $C$ . Constanta  $C$ , este determinată apoi cu ajutorul măsurărilor experimentale, "calibrând" astfel rezultatele pentru toate densitățile. Dar, atunci când densitatea relativă este mare, aceste expresii simple supraestimează densitatea din cauza dublei contabilizări; astfel, colțurile celulelor deschise, respectiv muchiile și colțurile celulelor închise sunt numărate de două ori. În acest caz, următorul ordin de aproximare ar putea fi de ajutor. Geometria materialelor celulare de tip fagure de miere, prezintă următoarea formă:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_1 \frac{t}{l} \left(1 - D_1 \frac{t}{l}\right) \quad (1.2a)$$

unde  $D_1$  este o nouă constantă. Acest termen din paranteză este important numai atunci când raportul  $t/l$ , este mare, și ar trebui să facă raportul  $\rho^*/\rho_s$  egal cu unitatea atunci când grosimea celulei are o valoare care duce la o umplere completă a celulei. Pentru un material celular de tip fagure de miere hexagonal regulat, acest lucru se întâmplă atunci când  $t = l\sqrt{3}$ , și obținem:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{t}{l}\right) \quad (1.2b)$$

În Tabelul 1.3 sunt prezentate rezultate similare pentru materialele celulare de tip fagure de miere triunghiulare și pătrate.



Tabelul 1.3. Formulele de calcul a densităților relative

Faguri de miere	
Triunghiuri echilaterale ( $Z_e=6, n=3$ sau $Z_e=4, n=4$ )*	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 2\sqrt{3} \frac{t}{l} \left( 1 - \frac{\sqrt{3} t}{2 l} \right)$
Pătrate ( $Z_e=4, n=4$ sau $Z_e=3, n=6$ )*	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 2 \frac{t}{l} \left( 1 - \frac{1 t}{2 l} \right)$
Hexagoane regulate ( $Z_e=3, n=6$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2 t}{\sqrt{3} l} \left( 1 - \frac{1 t}{2\sqrt{3} l} \right)$
Celule tridimensionale deschise ( $A_r = h/l$ )	
Prisme triunghiulare ( $Z_e=8, Z_f=4.5, \bar{n} = 3.6, \bar{f} = 5$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2 t^2}{\sqrt{3} l^2} \left( 1 + \frac{3}{A_r} \right)$
Prisme pătrate ( $Z_e=6, Z_f=4, \bar{n} = 4, \bar{f} = 6$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{t^2}{l^2} \left( 1 + \frac{2}{A_r} \right)$
Prisme hexagonale ( $Z_e=5, Z_f=3.6, \bar{n} = 4.5, \bar{f} = 8$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{4 t^2}{3\sqrt{3} l^2} \left( 1 + \frac{3}{2A_r} \right)$
Dodecaedru rombic ( $Z_e=5.33, Z_f=3, \bar{n} = 4, \bar{f} = 12$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 2.87 \frac{t^2}{l^2}$
Tetraidecaedrul ( $Z_e=4, Z_f=3, \bar{n} = 5.14, \bar{f} = 14$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1.06 \frac{t^2}{l^2}$
Celule tridimensionale închise ( $A_r = h/l$ )	
Prisme triunghiulare ( $Z_e=8, Z_f=4.5, \bar{n} = 3.6, \bar{f} = 5$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 2\sqrt{3} \frac{t}{l} \left( 1 + \frac{1}{2\sqrt{3}A_r} \right)$
Prisme pătrate ( $Z_e=6, Z_f=4, \bar{n} = 4, \bar{f} = 6$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 2 \frac{t}{l} \left( 1 + \frac{1}{2A_r} \right)$
Prisme hexagonale ( $Z_e=5, Z_f=3.6, \bar{n} = 4.5, \bar{f} = 8$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2 t}{\sqrt{3} l} \left( 1 + \frac{\sqrt{3}}{2A_r} \right)$
Dodecaedru rombic ( $Z_e=5.33, Z_f=3, \bar{n} = 4, \bar{f} = 12$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1.90 \frac{t}{l}$
Tetraidecaedrul ( $Z_e=4, Z_f=3, \bar{n} = 5.14, \bar{f} = 14$ )	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1.18 \frac{t}{l}$

\* a se vedea figura 1.15

Spumele prezintă o geometrie mult mai complexă. Din motive dimensionale densitatea corectată trebuie să aibă următoarea formă pentru o spumă cu celule deschise:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_2 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \left[ 1 - D_2 \left( \frac{t}{l} \right) \right] \quad (1.2c)$$

Pentru spumele cu celule închise obținem următoarea expresie:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_3 \frac{t}{l} \left[ 1 - D_3 \frac{t}{l} \left( 1 - D_4 \frac{t}{l} \right) \right] \quad (1.2d)$$

Pentru orice formă de celulă dată, corecția constantelor  $D_2$ ,  $D_3$  și  $D_4$ , poate fi evaluată. Dar corecția este semnificativă doar acolo unde densitatea relativă este mare: 0.2 sau mai mare. Una dintre aceste corecții este *distribuția solidului* între muchii și fețe.

În multe spume care prezintă celule închise, solidul este de obicei fixat în muchiile celulei, care sunt mai groase decât fețele, [Gibson și Ashby (1997)]. Dacă se notează cu  $\varphi$ , volumul de solid conținut în muchiile celulei, atunci fracțiunea de volum rămasă ( $1 - \varphi$ ), se află în fețe. Dacă se notează cu  $t_e$ , grosimea muchiei celulei și cu  $t_f$ , grosimea feței obținem:

$$\varphi = \frac{\frac{\bar{n}f}{2Z_f} l t_e^2}{\frac{\bar{n}f}{2Z_f} l t_e^2 + \frac{f}{2} l^2 t_f} = \frac{t_e^2}{t_e^2 + \frac{Z_f}{n} t_f l} \quad (1.3)$$

Unde  $\bar{n}$ , este numărul mediu de muchii pe fața unei singure celule,  $f$ , este numărul de fețe pentru o singură celulă, iar  $Z_f$  este numărul de fețe care se întâlnesc la o muchie. Densitatea relativă a spumei este:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\frac{\bar{n}f}{2Z_f} l t_e^2 + \frac{f}{2} l^2 t_f}{C_4 l^3} = \frac{f}{C_4} \left( \frac{\bar{n}f}{2Z_f} \frac{t_e^2}{l^2} + \frac{1}{2} \frac{t_f}{l} \right) \quad (1.4)$$

Unde  $C_4$ , este o constantă legată de volumul celulei  $l^3$  (Tabelul 1.2). Din această relație se obțin ecuațiile pentru  $t_f/l$  și  $t_e/l$ , care vor fi utilizate mai târziu:

$$\frac{t_f}{l} = \frac{2C_4}{f} (1 - \varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1.5a)$$

Și

$$\frac{t_e}{l} = \left( \frac{2Z_f}{\bar{n}} \frac{C_4}{f} \varphi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \quad (1.5b)$$

Pentru cele mai multe spume:  $Z_f = 3$ ;  $\bar{n} \approx 5$ ,  $f \approx 14$  și  $C_4 \approx 10$ , iar cu o bună aproximare obținem:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1.2 \left( \frac{t_e^2}{l^2} + 0.7 \frac{t_f}{l} \right) \quad (1.6)$$

și

$$\frac{t_f}{l} = 1.4 (1 - \varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1.7a)$$

$$\frac{t_e}{l} = 0.93\varphi^{1/2} \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \quad (1.7b)$$

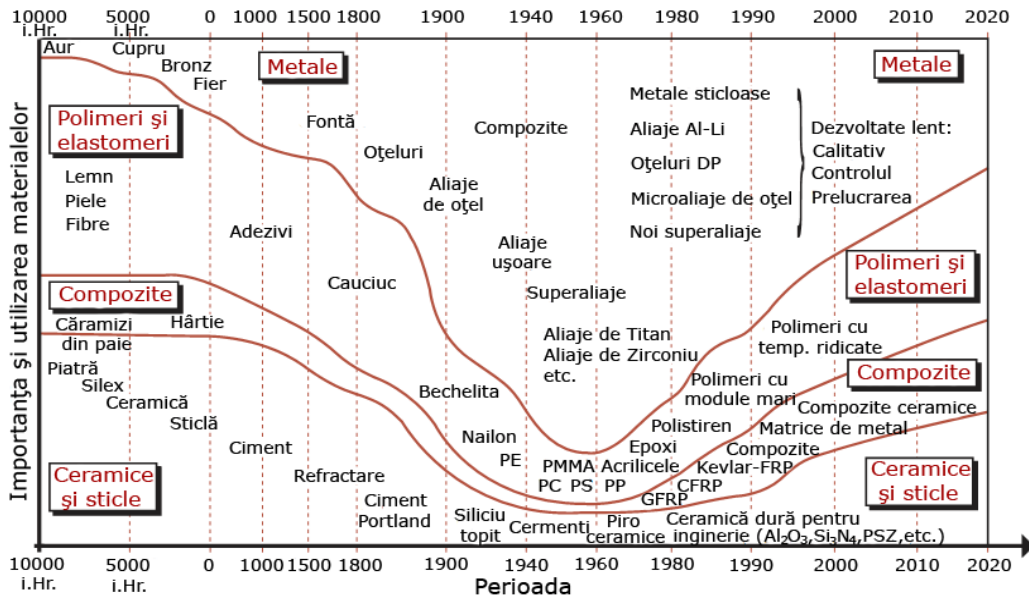
Uneori este important să cunoaștem constantele  $C_1$ ,  $C_2$  și  $C_3$ , și este util să se analizeze mărimea lor, doar pentru a ne convinge că ele sunt apropiate de unitate. Aceste constante pot fi determinate doar pentru construcțiile regulate: de exemplu pentru materialele celulare de tip fagure de miere cu celule hexagonale sau pentru spumele cu celule de tip tetracaidecahedron. Calculul densității relative pentru alte tipuri decât cele amintite mai sus este foarte greu de făcut. Pentru poliedrele care umplu spațiul dintre celule, de asemenea, se poate calcula densitatea relativă, [De Hoff și Rheines (1968)]. Relațiile obținute sunt prezentate în Tabelul 1.3.

## 1.4. Proprietățile materialelor celulare de tipul spumelor poliuretanicice rigide

### 1.4.1. Noțiuni generale

De-a lungul timpului materialele ingineresti au trecut prin mai multe etape ale importanței și utilizării lor. Fiecare epocă trăită de om a purtat numele materialului cel mai utilizat în acel moment: epoca de piatră, epoca de bronz, epoca de fier. În zilele noastre nu este epoca unui singur material, ci este epoca unei game foarte diversificate de materiale. Până în prezent nu s-a cunoscut nici o epocă în care materialele să evolueze așa de repede, prezentând totodată proprietăți foarte variate, [Ashby (1999), (2008), Fleck și alții (2010)].

Această evoluție a materialelor și importanța utilizării lor este prezentată în figura 1.20. Scara timpului prezentată în figura de mai jos este neliniară.



Materialele preistorice (>10.000 î.Hr., Epoca de Piatră), au fost ceramicile și sticlele, polimerii naturali, și compozitele. Dezvoltarea chimiei elementare a permis în primul rând extragerea cuprului și a bronzului, iar apoi a fierului, (Epoca Bronzului, 4000-1000 î.Hr. și Epoca Fierului, 1000 î.Hr.-1620 d.Hr.), stimulând avansări enorme ale tehnologiei.

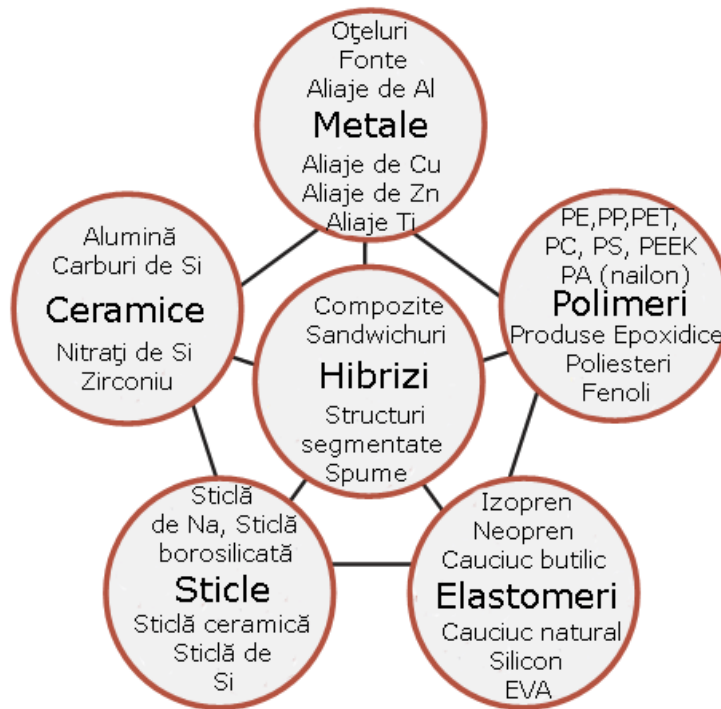


Fig. 1.21. Clasificarea materialelor ingineresti

Pentru a înțelege proprietățile materialelor celulare se prezintă mai întâi o clasificare a materialelor ingineresti în șase familii: metale, polimeri, elastomeri, ceramice, sticle și hibrizi, (figura 1.21). Materialele dintr-o anumită familie prezintă anumite caracteristici în comun, cum ar fi: proprietăți similare, procedee de prelucrare similare, și adesea aplicații similare.

Proprietățile spumelor poliuretanică rigide depind de două seturi distincte de proprietăți, [Gibson și Ashby (1997)]:

- primul este reprezentat de structura geometrică a spumelor – mărimea și forma celulelor, modul în care este distribuită materia între muchie și fețe, și densitatea relativă sau porozitatea;
- al doilea set îl reprezintă parametrii care descriu proprietățile intrinsece de material de fabricare a fiecărui perete al celulei.

#### 1.4.2. Prezentarea și definirea proprietăților

Posibilitatea obținerii unor spume cu proprietăți diferite a condus la diversificarea aplicațiilor spumelor în inginerie. Solidele celulare au proprietăți fizice, mecanice și termice care pot fi determinate utilizând aceleași metode ca și în cazul solidelor cu densitate ridicată.

Proprietățile materialelor celulare care sunt folosite cel mai frecvent în aplicațiile ingineresti sunt prezentate în Tabelul 1.4, urmând ca mai jos să fie prezentate detaliat cele mai importante dintre ele, [Ashby (1999), (2008)].

Tabelul 1.4. Proprietățile materialelor celulare

Clasa	Proprietate	Simbol	Unitatea de măsura
Generală	Densitatea	$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>
	Prețul	$C_m$	\$(€)/kg
Mecanică	Modulul de elasticitate	E, G, K	MPa
	Rezistența la rupere	$\sigma_f$	MPa
	Tenacitatea la rupere	$K_{IC}$	MPa m <sup>0.5</sup>
	Rezistența la compresiune	$\sigma_c$	MPa
	Rezistența la curgere	$\sigma_y$	MPa
	Rezistența maximă	$\sigma_u$	MPa
Termică	Conductivitatea termică	$\lambda$	W/mK
	Căldura specifică	$C_p$	J/kgK
	Coeficientul de expansiune termică	$\alpha$	K <sup>-1</sup>
	Punctul de topire	$T_m$	C sau K

#### 1.4.2.1. Proprietăți generale

Densitatea,  $\rho$ , [kg/m<sup>3</sup>], se definește ca fiind raportul dintre masa unui corp și volumul său.

Prețul,  $C_m$ , [\$(€)/kg], cuprinde o gamă largă de materiale și poate varia de la valori mai mici de 0.2 \$(€)/kg până la valori de peste 1000 \$(€)/kg.

#### 1.4.2.2. Proprietăți mecanice

1.4.2.2.1. Modulul de elasticitate, [GPa] sau [GN/m<sup>2</sup>], este definit de către panta liniar-elastică a curbei tensiune deformație. Modulul de elasticitate longitudinal,  $E$ , descrie răspunsul la solicitarea de tracțiune sau compresiune, modulul de elasticitate transversal,  $G$ , descrie solicitarea de forfecare, iar modulul volumic,  $K$ , este descris de către presiunea hidrostatică. Coeficientul lui Poisson,  $\nu$ , este un coeficient adimensional și se definește ca raportul între subțierea unitară pe direcția perpendiculară direcției efortului și alungirea unitară în direcția efortului, [Ashby (2008), Linul și Marșavina (2011a)].

În figurile 1.22, 1.23, 1.24 și 1.25 sunt prezentate hărțile cu domeniile unde se situează spumele comparativ cu alte tipuri de materiale: metale, ceramice, polimeri, compozite, etc, pentru diferite proprietăți ale spumei [Ashby (1999), (2008), Fleck și alții (2010)]. Harta proprietăților de material din figura 1.22, prezintă modulul de elasticitate longitudinal,  $E$ , [GPa] funcție de densitate,  $\rho$ , [kg/m<sup>3</sup>], [Fleck și alții (2010), Ashby (2008)].

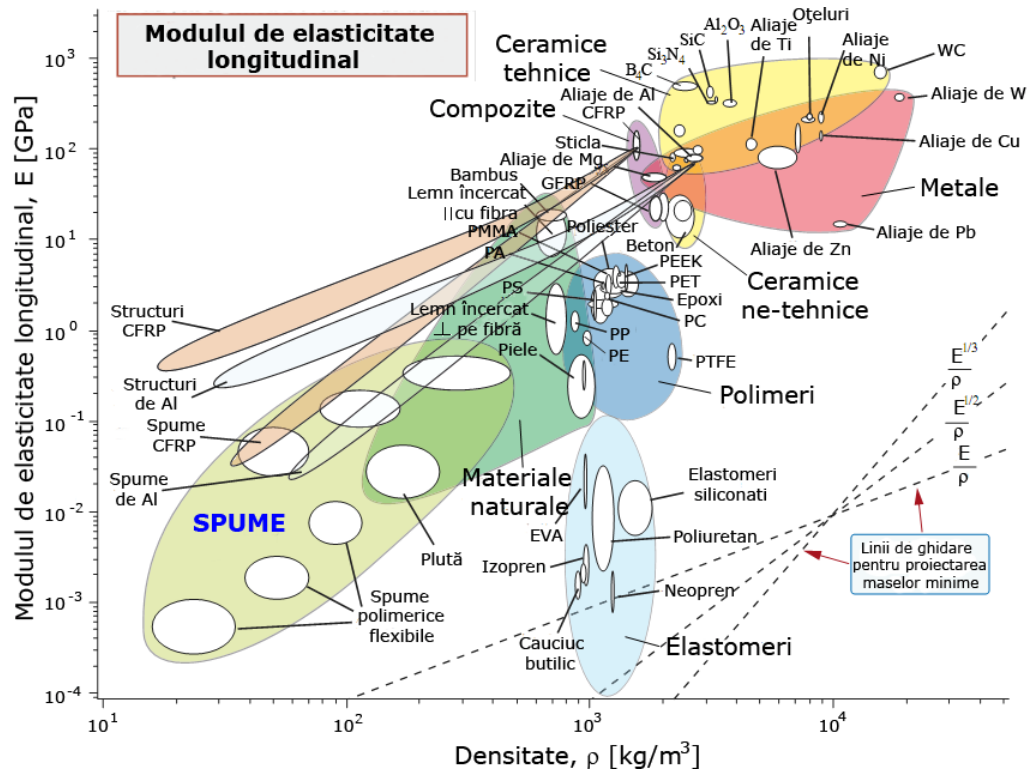


Fig.1.22. Harta modulului de elasticitate longitudinală în funcție de densitate pentru materialele ingineresti, ( $E=f(\rho)$ ).

Abrevierile din figura de mai sus reprezintă următoarele:

Nr. Crt.	Abreviere	Denumire
1	PA	poliamidă
2	PS	polistiren
3	PP	polipropilenă
4	PE	polietilenă
5	PC	policarbonat
6	PMMA	polimetil metacrilat
7	PEEK	polieter eten cetona
8	PET	polietilen tereftalat
9	PTFE	politetrafluoretilenă
10	EVA	etilenă acetat de vinil
11	CFRP	polimer armat cu fibră de carbon

1.4.2.2.2. Rezistența la rupere,  $\sigma_r$  [MPa] sau [MN/m<sup>2</sup>], necesită o definiție atentă, deoarece diferă în funcție de tipul materialului. Pentru polimeri, ea este definită ca tensiunea la care curba tensiune-deformație devine semnificativ neliniară: de obicei o deviere de 1%. Acest lucru poate fi cauzat de către alunecarea

ireversibilă a lanțurilor moleculare, sau de către microfisurile existente în material, [Ashby (2008)].

Harta proprietăților de material din figura 1.23 prezintă rezistența la rupere,  $\sigma_f$ , [MPa] funcție de densitate,  $\rho$ , [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], [Fleck și alții (2010)].

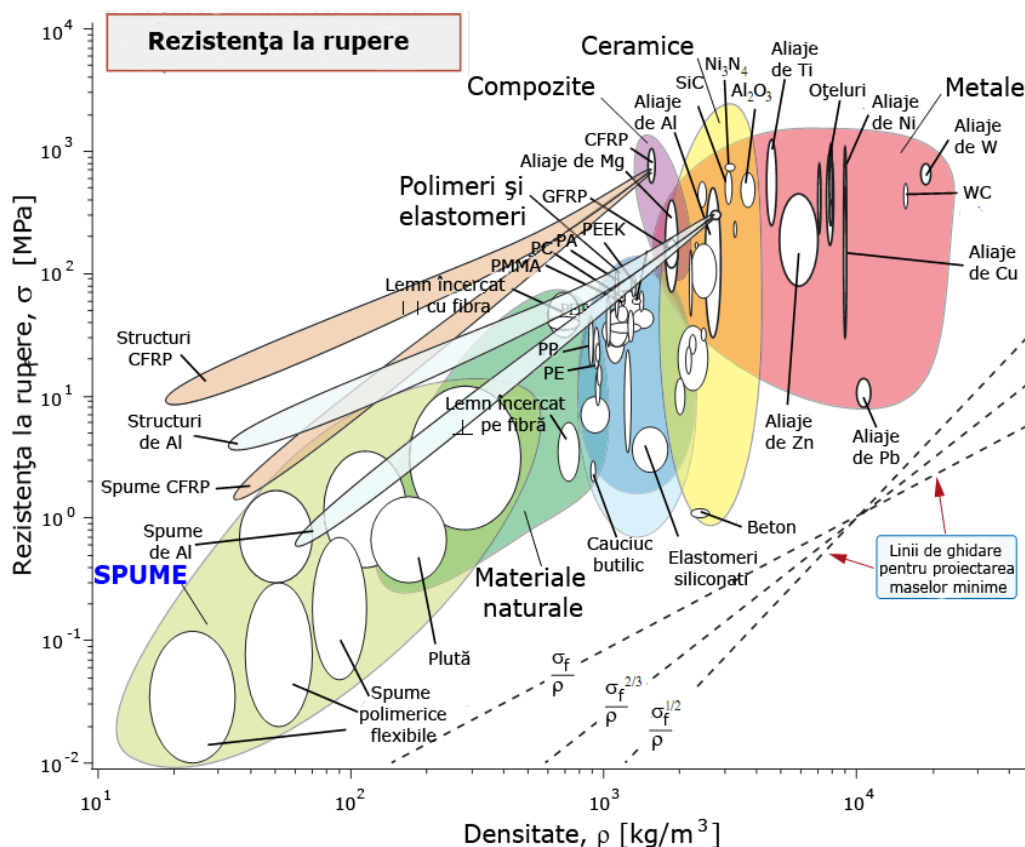


Fig. 1.23. Harta rezistenței la rupere funcție de densitate pentru materialele ingineresti, ( $\sigma_f=f(\rho)$ ).

Diferența între caracterul spumelor (care au un comportament dominat de încovoiere) și caracterul materialelor cu matrice (cu un comportament dominat de alungire) se poate observa în graficele  $E=f(\rho)$ , (modul de elasticitate în funcție de densitate) și  $\sigma_f=f(\rho)$ , (rezistența la rupere după direcția de întindere în funcție de densitate) (figura 1.20 și figura 1.21). Proprietățile materialelor cu matrice au o variație liniară cu densitatea, plecând de la materialul de bază și umplând unele din golurile graficelor sus amintite. Pe de altă parte, rigiditatea și rezistența spumelor au o scădere mai accentuată decât cea liniară odată cu scăderea densității.

**1.4.2.2.3. Tenacitatea la rupere,  $K_{IC}$ , [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]**, măsoară rezistența unui material la propagarea unei fisuri. Tenacitatea la rupere se determină prin încărcarea unei epruvete care conține o fisură inițială cu lungimea  $2a$ , înregistrând tensiunea la care fisura se propagă, [Marșavina (2010a), Gibson și Ashby (1997), Ashby (1999), (2008)].

Harta proprietăților de material din figura 1.24 prezintă tenacitate la rupere,  $K_{IC}$ , [ $MPa\sqrt{m}$ ] funcție de densitate,  $\rho$ , [ $kg/m^3$ ], [Fleck și alții (2010)].

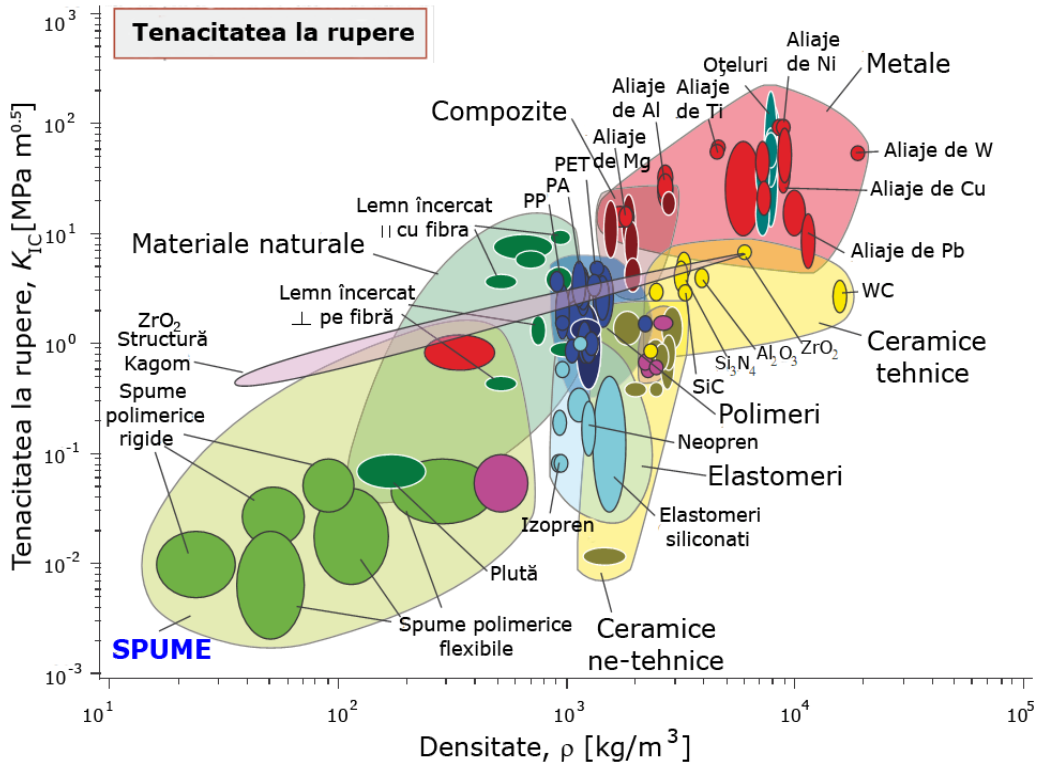


Fig. 1.24. Harta tenacității la rupere funcție de densitate pentru materialele ingineresti, ( $K_{IC}=f(\rho)$ ).

Materialele celulare atât cele naturale cât și cele fabricate de om sunt utilizate din ce în ce mai mult datorită proprietăților mecanice remarcabile, prezentând o bună capacitate portantă în structurile cu greutate mică. În multe aplicații spumele sunt utilizate sub sarcini de tracțiune și respectiv compresiune. Deoarece materialul de origine este fragil (ceramicile), modul dominant de rupere în aceste condiții este ruperea fragilă datorată propagării fisurii. Acest fenomen a fost studiat îndeaproape de foarte mulți autori, [Gibson și Ashby (1997), Ashby (1999), (2008), Wei (2008)], care au pus problema tipică de evaluare a tenacității la rupere a materialelor celulare în funcție de rezistența la rupere a materialului solid din care s-a formată spuma,  $\sigma_{fs}$ .

### 1.4.2.3. Proprietăți termice

Conductivitatea termică, [ $W/mK$ ], este mărimea fizică prin care se caracterizează capacitatea unui material de a transmite căldură atunci când este supus unei diferențe de temperatură. În figura 1.25 este prezentată harta conductivității termice pentru materialele ingineresti amintite mai sus, [Ashby (1999), (2008)].



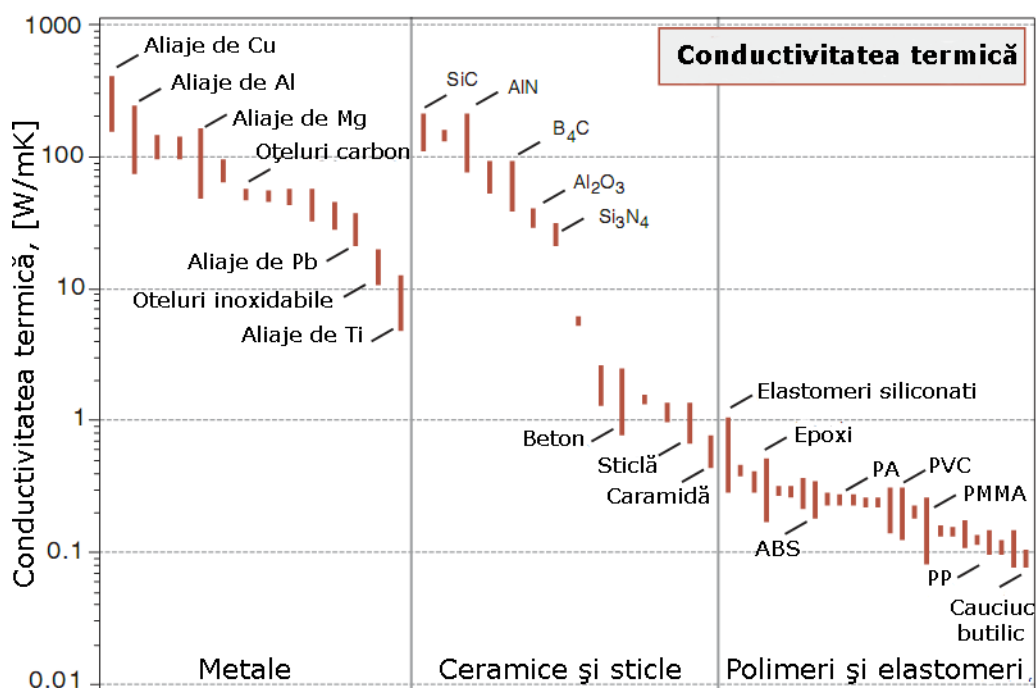


Fig. 1.25. Harta conductivității termice pentru materialele ingineresti

Fiecare material este reprezentat printr-o singură linie verticală. Lungimea unei linii verticale indică gama de conductivități pe care le poate avea un material în funcție de diferite moduri de elaborare. Materialele sunt separate pe clase, fiecare clasa reprezentând o gamă caracteristică: metalele, prezintă conductivități înalte; polimerii, prezintă conductivități joase; ceramicele prezintă o gamă largă de conductivități, (atât joase cât și înalte).

### 1.5. Aplicații ale materialelor celulare

Această extindere enormă a proprietăților creează aplicații în inginerie pentru spume, care nu pot fi prea ușor acoperite de către celelalte tipuri de materiale cu densitate ridicată. Densitatea scăzută permite o proiectare ușoară a componentelor rigide asemenea structurilor de tip sandwich și a structurilor portabile mari. Acest tip de materiale au o conductivitate termică foarte scăzută, ceea ce permite utilizarea acestora în număr tot mai mare la izolații termice. Rigiditatea scăzută face spumele ideale pentru o largă utilizare în domeniul amortizării (ciocnirilor), spumele elastomerice de exemplu, sunt materialele standard utilizate pentru scaune. Rezistența scăzută și deformabilitatea mare la compresiune face ca spumele să fie foarte utilizate în aplicațiile unde este necesară o absorbție de energie mare (ca de exemplu în protejarea calculatoarelor la transport), [Gibson și Ashby (1997)].

Poliuretani au fost dezvoltați la sfârșitul anilor 1930 de către chimistul german Otto Bayer, la început pentru aplicații militare, poliuretani au cucerit lumea. Datorită diverselor proprietăți, utilizarea lor este foarte răspândită, începând de la dispozitive pentru urechi, tălpi de pantof, tapițerie, straturi-suport pentru mochetă, saltele (spumă flexibilă) și terminând cu tablouri de bord și amortizoare pentru

autoturisme, pontoane pentru ambarcațiuni, materiale izolatoare în construcții și sisteme de refrigerare (spume rigide).

Cele patru hărți prezentate în figurile 1.22, 1.23, 1.24 și 1.25 arată direct cele patru mari domenii de aplicare a materialelor celulare: izolare termică, ambalare, utilizarea în construcții și flotabilitate, figura 1.26, [Gibson și Ashby (1997), Linul și alții (2009)].

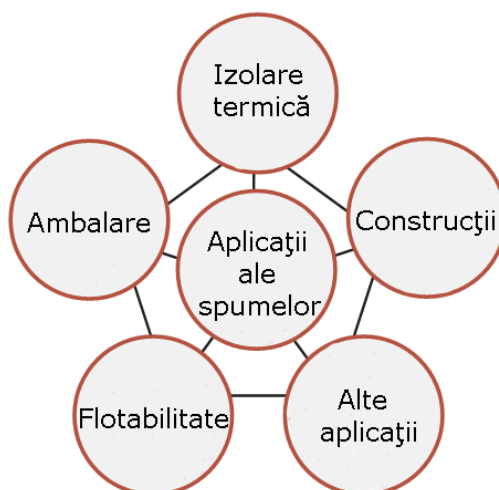


Fig. 1.26. Domenii de aplicație ale spumelor

Până în anii 1970, utilizarea poliuretanilor în aplicațiile industriale a fost limitată. O adevărată "explozie" a avut loc odată cu dezvoltarea spumei poliuretanică, care a devenit favoritul constructorilor și al antreprenorilor.

### 1.5.1. Izolarea termică

Cea mai importantă aplicație a spumelor polimerice și spumelor din sticlă este cea de izolator termic. Se utilizează pe o scară foarte largă: de la ne semnificativele cești de cafea până la materialele utilizate la construcția navelor spațiale cu reacție.

Cea mai importantă proprietate a poliuretanului este slaba sa conductivitate termică, ceea ce face din spuma poliuretanică cel mai eficient izolator dintre toate materialele de construcții. Spumele poliuretanică au înlocuit cu succes vata din sticlă, pluta izolatoare și fibrele de sticlă. În plus, spuma expandează și umple toate rosturile, crăpăturile și îmbinările, asigurând astfel o etanșare excelentă împotriva aerului și a umidității. Spre deosebire de tencuielile din gips și mortar, spuma poliuretanică flexibilă se adaptează la expansiunea și contractia părților adiacente ale construcției, care au loc în mod natural de-a lungul timpului și care pot produce crăparea pereților și a plafoanelor.

Valoarea ridicată a gradului de izolare, împreună cu rezistența la umiditate și cu greutatea mică, au făcut din spuma poliuretanică primul material pentru lucrările de acoperiș și de izolare. În figura 1.27 se poate observa eficiența spumelor poliuretanică comparativ cu materialele amintite mai sus, (grosimea comparativă pentru valori echivalente de izolare).

### Echivalența rezistenței termice la diferite materiale de construcție

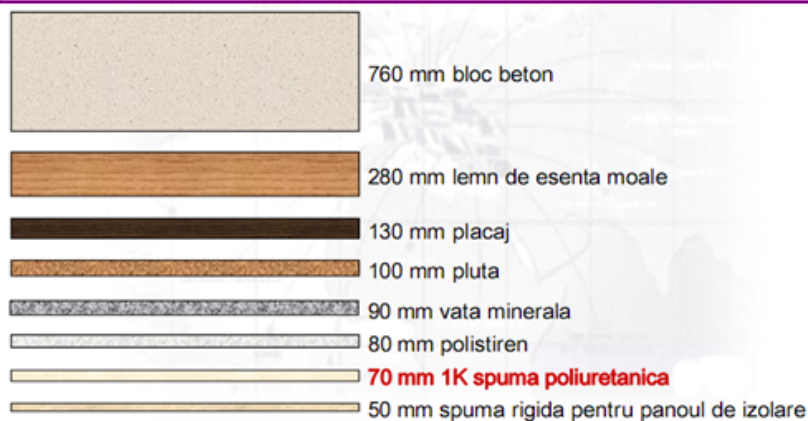
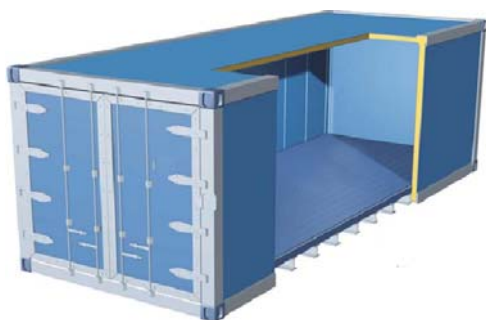


Fig. 1.27. Echivalența rezistenței termice la diferite materiale de construcție

Construcțiile moderne, și stemele de transport (camioane frigorifice - figura 1.28 și vagoanele trenurilor) și chiar bărcile, toate prezintă avantaje ale unei conductivități termice scăzute. Acolo unde riscul de foc este considerat major (unele clădiri de exemplu), se pot utiliza spume de sticlă, iar acolo unde este prevăzută o durată de viață foarte lungă (cazul conductelor - figura 1.29 sau acoperișurilor), spumele poliuretanică se pretează foarte bine, [Gibson și Ashby (1997)].



[www.pur.bayer.com](http://www.pur.bayer.com)

Fig. 1.28. Sistem de transport (container frigorific)



[www.clubafaceri.ro](http://www.clubafaceri.ro)

Fig. 1.29. Conducte preizolate cu spumă poliuretanică

Un avantaj particular al spumelor pentru temperaturi scăzute de cercetare o reprezintă masa termică scăzută. La temperaturi înalte, în proiectarea cuptoarelor și a furnalelor, o mare parte a energiei disipate în cuptor este utilizată pentru a crește temperatura la nivelul necesar funcționării optime, masa termică scăzută mărind eficiența cuptorului. Masa termică a spumelor este proporțională cu densitatea relativă, [Gibson și Ashby (1997)].

### 1.5.2. Ambalarea

A doua utilizare majoră a solidelor celulare este ambalarea, [Kieslinh (1961)]. O ambalare eficientă trebuie să absoarbă energia de impact sau forțele generate de decelerare fără a pune în pericol conținutul. Utilizate în acest scop

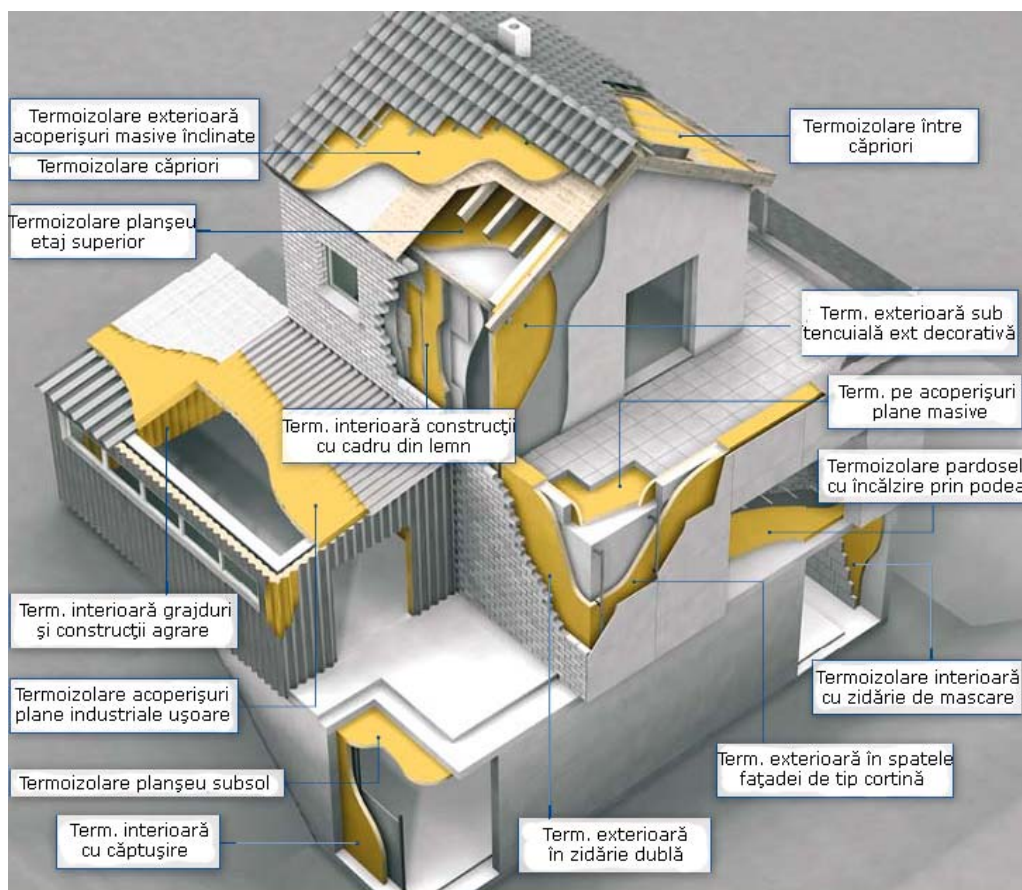
spumele sunt cele mai favorabile. Rezistența spumelor, (figura 1.23) poate fi ajustată modificând densitatea relativă. Spumele pot suporta solicitări de compresiune mari la o tensiune aproape constantă, (70% sau chiar mai mult), rezultând că aceste cantități mari de energii pot fi absorbite fără a genera tensiuni prea mari.

Aceste spume ne oferă un număr foarte mare de avantaje în ambalarea materialelor. Densitatea medie scăzută a solidelor celulare este un avantaj mare, deoarece reduce foarte mult costurile de încărcare și expediere a materialelor. Costul scăzut pe unitatea de volum și modul de fabricare relativ ușor duc la un preț total foarte mic.

Spumele cele mai recent utilizate în ambalare sunt: polistirenul, poliuretanul și polietilena, [Suh și Skochdopole (1980)].

### 1.5.3. Utilizarea în construcții

Poliuretanii joacă un rol major în industria modernă a construcțiilor. Ei au revoluționat întreaga tehnologie a sectoarelor conexe, întrucât permit formularea unor materiale de construcții și produse chimice complet noi.



[www.newdesigncomposite.ro](http://www.newdesigncomposite.ro)

Fig. 1.30. Privire de ansamblu asupra aplicațiilor spumei poliuretane pentru o locuință

Protecția mediului a marcat drastic domeniul construcțiilor, impunând economia de energie și aptitudinea clădirilor de a proteja resursele naturale. În acest context, spuma poliuretanică rigidă joacă un rol important prin faptul că garantează izolarea termică, fonică și hidroizolarea clădirii. În conformitate cu normele europene, acest material izolează interiorul față de exterior în orice condiții: climat cald sau rece, umed sau uscat, vântos sau calm.

În figura 1.30 sunt prezentate detaliat zonele unei locuințe unde pot fi utilizate spumele poliuretanică pentru o eficiență maximă.

De asemenea, spumele fabricate sunt utilizate în aplicațiile unde se observă cele mai bune performanțe structurale. Cel mai obiectiv exemplu este utilizarea acestora în panourile de tip sandwich. Astăzi, panourile de tip sandwich folosite în aviație utilizează compozite din sticla sau compozite din fibră de carbon pentru fețe, despărțite de aluminiu, rășini sau spume polimerice rigide, dând panoului bune proprietăți de rigiditate și rezistență la încovoiere. Aceeași tehnologie a fost utilizată și altor aplicații unde greutatea este critică cum ar fi: clădiri portabile (figura 1.31), iahturi de curse, [Linul și alții (2010)], (figura 1.32), părți din mașini, (figura 1.33), echipamente sportive, [Linul și alții (2011a), Mills (2007), Gibson și Ashby (1997)], (figura 1.34), și panouri decorative.



[www.conplast.ro](http://www.conplast.ro)

Fig. 1.31. Clădire portabilă



[www.luxesports.ro](http://www.luxesports.ro)

Fig. 1.32. Iaht de curse



[www.coastadeest.ro](http://www.coastadeest.ro); [www.okazii.ro](http://www.okazii.ro)

Fig. 1.33. Părți din mașină realizate din spumă poliuretanică



Fig. 1.34. Echipamente sportive realizate din spumă poliuretanică

#### 1.5.4. Utilizarea pentru plutire

Materialele celulare își găsesc, de asemenea, o mare aplicabilitate în marină. Pliny (77 î.Hr.) a descris utilizarea plutei pentru pescuit încă din cele mai vechi timpuri. Astăzi, spumele de plastic cu celule închise sunt des utilizate ca suport pentru construcțiile plutitoare și ca flotație la bărci, (figura 1.32) deoarece ele nu ruginesc și nici nu corodează. Plutirea este dată de obicei de spumele fabricate din polistiren, clorură de polivinil, polietilenă sau silicon, toate acestea prezentând celule închise cu o rezistență foarte bună la apă și la poluanții comuni.

Spumele plutitoare sunt caracterizate convenabil de un factor de plutire  $B_p$ , care este folosit pentru a calcula volumul necesar de spumă în aplicațiile date. Acest factor este definit de următoarea relație:

$$B_p = \frac{\rho_{ap\grave{a}} - \rho^*}{\rho_{ap\grave{a}}} \quad (1.8)$$

Luând densitatea apei de  $1000 \text{ kg/m}^3$  și densitatea tipică a spumei plutitoare de  $40 \text{ kg/m}^3$ , vom obține un factor de plutire de 0.96. Pentru a se obține o rigiditate și o flotabilitate foarte bună, în proiectarea modernă a bărcilor cu pânze, materialele celulare de acest tip sunt utilizate sub formă de sandwich, (pentru puntea și corpul bărcii), [Gibson și Ashby (1997)].

#### 1.5.5. Alte aplicații

Spumele și materialele celulare tip fagure de miere sunt utilizate ca *filtre* la diferite nivele. Materialele turnate pentru a avea o calitate cât mai bună trebuie să nu prezinte incluziuni; în acest scop spumele ceramice cu celule deschise constituie cea mai bună cale de a le ține afară. Cel mai interesant model de aplicare este dezvoltarea filtrelor moleculare în tehnologia membranelor pentru separarea unui anumit tip de molecule de alte tipuri din soluții. Membrana însăși este mai exact o spumă specială cu celulele deschise.

Spuma în foi poate fi folosită în transport pentru: cerneluri, vopsele, lubrifianți, chiar și pentru enzime chimice pentru prelucrare. De asemenea, este foarte important și transportul catalizatorilor. Spumele ceramice, ușor placate cu platină, sunt frecvent utilizate ca și mașină de evacuare a catalizatorilor; și aceleași tipuri de spume ceramice pot fi utilizate pentru a transporta nichelul și alți catalizatori utilizați în hidrogenare și alte aplicații legate de energie.

Spumele au unele avantaje speciale ca: *membrane impermeabile* care permit trecerea liberă a aerului. Politetrafluoroetilena (PTFE), cu celule deschise este utilizată ca și *barieră hidrofobă* pentru echipamentul sportiv de înaltă calitate. Un material similar este utilizat ca și *piele artificială*, furnizând protecție victimelor arse, permițând totuși accesul liber al aerului, [Gibson și Ashby (1997)].

Proprietățile mecanice speciale ale spumelor, menționate deja, conduc la un număr special de utilizări. Compresibilitatea lor le face de neegalat pentru dopurile de sticle, (figura 1.35a). Suprafața lor puțin aspră le dă un înalt coeficient de frecare, prin urmare ele sunt utilizate ca suprafețe non-alunecare pentru talere, mese (figura 1.35b) sau parchet. Deoarece materialele celulare prezintă o capacitate mare de amortizare (absorbție) a sunetului, ele se utilizează, la liniile de plafoane, pereții amfiteatrelor și sălilor, (figura 1.35c).

Nu trebuie uitat, de asemenea, că multe alimente sunt spume; structura celulară fiind mai ușor de mușcat, mestecat și digerat.



[www.naturo-kork.hu](http://www.naturo-kork.hu); [www.robycom.ro](http://www.robycom.ro); [www.ceerotomoulding.org](http://www.ceerotomoulding.org); [www.bizoo.ro](http://www.bizoo.ro)

a) b) c)  
Fig. 1.35. Aplicații ale materialelor celulare : a) dopuri de sticlă, b) mese,  
c) pereți despărțitori

În cele din urmă, spumele prezintă și unele proprietăți elastice. De exemplu, atenuarea undelor electromagnetice, depinde de pierderile dielectrice prin mediul prin care traversează. Densitatea scăzută a spumelor polimerice oferă un factor de pierdere extrem de scăzut pe unitatea de volum, spumele fiind recomandate, de asemenea, pentru fețele cupolelor pentru echipamentul radar și transmisiile radio.

### 1.5.6. Avantajele utilizării spumei poliuretanică rigidă

Spuma rigidă de poliuretan, prin proprietățile sale, prezintă o serie de avantaje ca, [Gibson și Ashby (1997), Mills (2007)]:

- menține valorile maxime ale coeficientului de transfer termic pentru cele mai extreme condiții oferind o protecție de durată indiferent de condițiile meteo sporind astfel confortul ambiental. Deși valoarea inițială a conductibilității termice este de 0,020 W/mk, de obicei ulterior are loc o ușoară creștere a conductibilității termice, dar în timp aceasta nu depășește valoarea indicelui Lambda de 0,026 W/mk, (indicele Lambda se declară conform normelor UE, pentru o durată medie de viață pentru un produs de aproximativ 25 de ani);
- posibilitatea realizării dintr-o singură operație atât a hidroizolației, termoizolației, fonoizolației și ignifugarea elementelor inflamabile;
- calitatea net superioară față de metodele relativ clasice de hidro și termoizolare;
  - reducerea costurilor de climatizare cu până la 60%;
  - aplicabilitate pe orice tip de suprafață;
  - rigidizarea anumitor tipuri de suport, fără a se afecta coeficientul de elasticitate a structurii;
    - aderența la nivel molecular;
    - minimizarea problemelor cu punctul de rouă și apariției condensului;
    - transfer termic foarte scăzut (sub 5 grade / 24 ore);
    - hidroizolare foarte bună;
    - absorbția de apă se face în funcție de condițiile ambientale, are loc prin umectare sau prin difuzie de vapori și se ridică până la o valoare maximă de 5 % din volumul său;
    - permeabilitate la vapori, reduce în totalitate apariția mușcării, fungurilor sau ciupercilor
    - este influidă prin densitate și structură;

➤ este ignifugă. Nu arde cu flacără deschisă; nu propagă flacără; nu se aprinde de la eventuale scânteii sau scurtcircuite produse de instalațiile electrice. Această proprietate constituie un avantaj real mai ales în cazul construcțiilor din lemn;

- compoziție ecologică - nu afectează stratul de ozon și nu este cancerigenă;
- neutră din punct de vedere chimic;
- stabilitate față de carburanți, uleiuri minerale, acizi și alcalini;
- copiază și modelează formele suprafețelor;
- greutate specifică scăzută - protejează structura și nu produce suprasolicitarea construcțiilor după izolare;
- capacitate de absorbție acustică până la 60 decibeli;
- rezistență mare la îmbătrânire în contact cu gazele de eșapament sau în atmosferă industrială foarte agresivă;
- îmbunătățește izolarea fonică - există și sisteme speciale de poliuretan, pentru zgomot la impact (podele), zgomot ambiental (pereți, acoperiș) care ajung la performanța de reducere a zgomotelor cu 72 db. Aplicații în: studiouri de înregistrări, radio, televiziune, cluburi de noapte, discotecii, săli de conferințe, etc.;
- reduce transmiterea vibrațiilor;
- este o izolație ușoară dar durabilă (minim 50 ani fără a-și schimba proprietățile), lucru care se concretizează prin stabilitate, compoziția chimică și prin natura construcției structurii sale care este formată din celule predominant închise;
- rigidizează structura unei clădiri (la clădirile din lemn 200%);
- spuma prezintă o aderență foarte bună față de materialele utilizate în construcții civile și industriale;
- este un produs ecologic 100%;
- se aplică pe orice suprafață;
- rezistă la temperaturi joase ( $-30^{\circ}\text{C}$ ) și între ( $100^{\circ}\text{C}$ );
- izolarea cu spumă se face fără să afecteze alte lucrări simultane;
- sigilează perfect orice spații, pori, etc.;
- formează un înveliș continuu fără îmbinări, eliminând punțile termice;
- rezistență la intemperii;
- se poate aplica la interior cât și la exterior;
- recuperarea rapidă în investiția efectuată;
- arie foarte largă de aplicații;
- elimină spațiile în care pot trăi insecte, rozătoare, paraziți, etc.;
- Chiar și la joasă densitate, aceasta își păstrează proprietățile mecanice, atât pentru compresiune cât și pentru forfecare; aceste proprietăți sunt esențiale pentru unele aplicații cum ar fi pardoselile, deoarece este foarte important ca structura compozită să rămână intactă fără goluri, în stratul de izolație.

-----

În acest capitol s-a făcut o trecere în revistă a stadiului actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare, prezentându-se pe scurt tehnologia de fabricare a spumelor, respectiv structura, proprietățile, (modulul de elasticitate longitudinal, tenacitatea la rupere, rezistența la rupere, conductivitatea termică), aplicațiile și avantajele utilizării materialelor celulare, (izolare termică, ambalare, utilizarea în construcții și flotabilitate). S-a realizat o prezentare a materialelor celulare și s-a constatat că un solid celular este confecționat dintr-o rețea interconectată de straturi solide cu forma muchiilor și fețelor celulelor bine definite. În acest sens, cea mai importantă caracteristică a solidelor celulare este densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ ; care este egală cu raportul dintre densitatea materialului celular,  $\rho^*$ , și densitatea solidului din care este confecționat materialul celular,  $\rho_s$ .



## 2. MODELE MICROMECHANICE PENTRU CARACTERIZAREA MATERIALELOR CELULARE

### 2.1. Introducere

Tehnicile existente în ziua de azi pot realiza solide celulare tridimensionale din polimeri, metale, ceramice și chiar din sticlă. Spumele realizate de om, sunt confecționate pe o scară tot mai largă pentru absorbția energiei de impact (ambalare) și în structurile cu greutate redusă (de exemplu miezul panourilor de tip sandwich). Utilizarea eficientă a spumelor în astfel de aplicații necesită înțelegerea în detaliu a comportamentului lor mecanic. Chiar dacă utilizarea primară nu este mecanică (de exemplu, acolo unde spumele sunt utilizate pentru izolare termică, plutire sau ca și filtre), rezistența și comportamentul la rupere este totuși important. În natură, există de asemenea, o paletă largă de materiale celulare. În unele cazuri, funcția primară este chiar cea mecanică, cum este exemplul lemnului (de a susține copacul). În alte cazuri cum este exemplul frunzei de iris, plutei sau chiar bureților, funcțiile primare pot fi impuse de nevoia de a optimiza transportul lichidelor sau de a izola termic, dar chiar și aici proprietățile mecanice prezintă un rol important deoarece celulele trebuie să susțină întreaga structură. Aici poate fi inclus și subiectul mâncării, (pâinea și multe alte alimente sunt materiale celulare-spume).

În acest capitol se prezintă comportarea mecanică a spumelor la diferite solicitări ținând cont de structura și proprietățile de material din care sunt realizați pereții celulelor. Principalele caracteristici structurale ale spumei sunt: densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ , procentul dintre celulele închise și deschise și rapoartele de anizotropie a formei  $R_{12}$  și  $R_{13}$ . Proprietățile cele mai importante ale peretelui celulei sunt: densitatea solidului,  $\rho_s$ , modulul de elasticitate longitudinal,  $E_s$ , rezistența la

curgere,  $\sigma_{ys}$ , rezistența la rupere,  $\sigma_{fs}$ , și parametrii de fluaj,  $n_s$ ,  $\epsilon_{0s}$  și  $\sigma_{0s}$ . Proprietățile spumei sunt analizate ținând cont de acești parametri și comparate cu rezultatele experimentale pentru a găsi ecuații necesare pentru calculele de proiectare proiectare.

În această domeniu, se găsește o considerabilă, dar în același timp o confuză literatură despre comportarea mecanică a spumelor. Abordări pe această temă sunt propuse de către: Suh și Skochdopole (1980), Suh și Webb (1985), și Weaire și Fortes (1994), iar cărți/monografii elaborate de Wendle (1976), Hilyard (1982) și Hilyard și Cunningham (1994). O parte dintre aceste confuzii sunt legate de faptul că sunt date anumite ecuații (pentru modul de elasticitate sau rezistența), care nu corespund cu realitatea. În ultimii ani unele dintre aceste confuzii au dispărut datorită aprofundării acestui domeniu și elucidării anumitor mecanisme, [Gibson și Ashby (1997)].

## 2.2. Mecanismele de deformare în spume

În figura 2.1 este prezentată schematizat curba tensiune-deformație la compresiune pentru: a) o spumă elastomerică, b) o spumă elasto-plastică și c) pentru o spumă fragilă. În aceste figuri se observă o zonă liniar-elastică obținută la tensiuni mici, urmată de o zonă de platou unde tensiunea rămâne aproape constantă iar deplasarea crește considerabil, ajungând în final la o semnificativă creștere în tensiune, zona purtând numele de densificare.

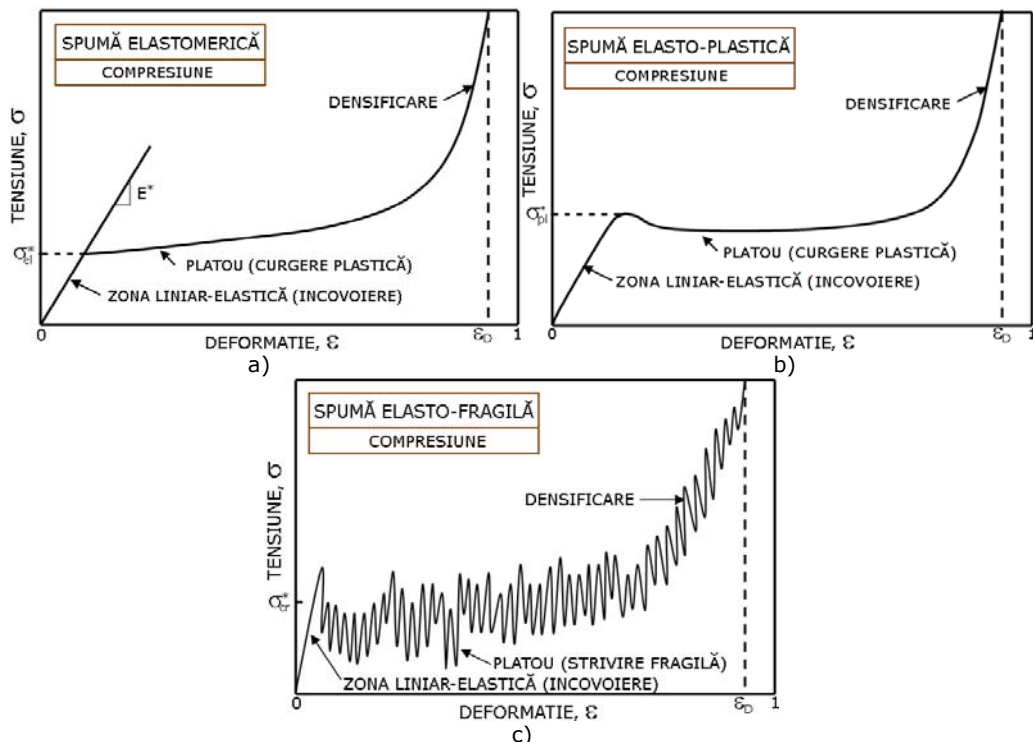


Fig. 2.1. Curbele tensiune-deformație la compresiune, pentru: a) o spumă elastomerică, b) o spumă elasto-plastică, c) o spumă elasto-fragilă, după [Gibson și Ashby (1997)].

Zona liniar-elastică din curba tensiune-deformație este asociată cu încovoierea peretelui celulei, plus întinderea feței celulei dacă celulele sunt închise, iar modulul de elasticitate longitudinal,  $E^*$ , se poate obține de pe porțiunea liniar-elastică din această curbă. Odată cu creșterea încărcării, zona de platou este asociată cu o deformare a celulelor-dată de flambajul elastic pentru spumele elastomerice (cum ar fi de exemplu cauciucul), sau cu formarea unor articulații plastice pentru spumele care curg (asemenea metalelor), de asemenea, această zonă mai poate fi asociată cu ruperea fragilă în cazul spumelor fragile (de exemplu ceramicele). În momentul în care celulele sunt aproape complet distruse, se obține ultima regiune numită densificare, cu o creștere rapidă a tensiunii, la o deformație aproape constantă.

În figura 2.2 sunt prezentate curbele tensiune-deformație pentru spumele elastice, plastice și fragile. Odată cu creșterea densității spumei are loc creșterea

modulului de elasticitate, o creștere a tensiunii de platou și scăderea deplasării la care începe densificarea.

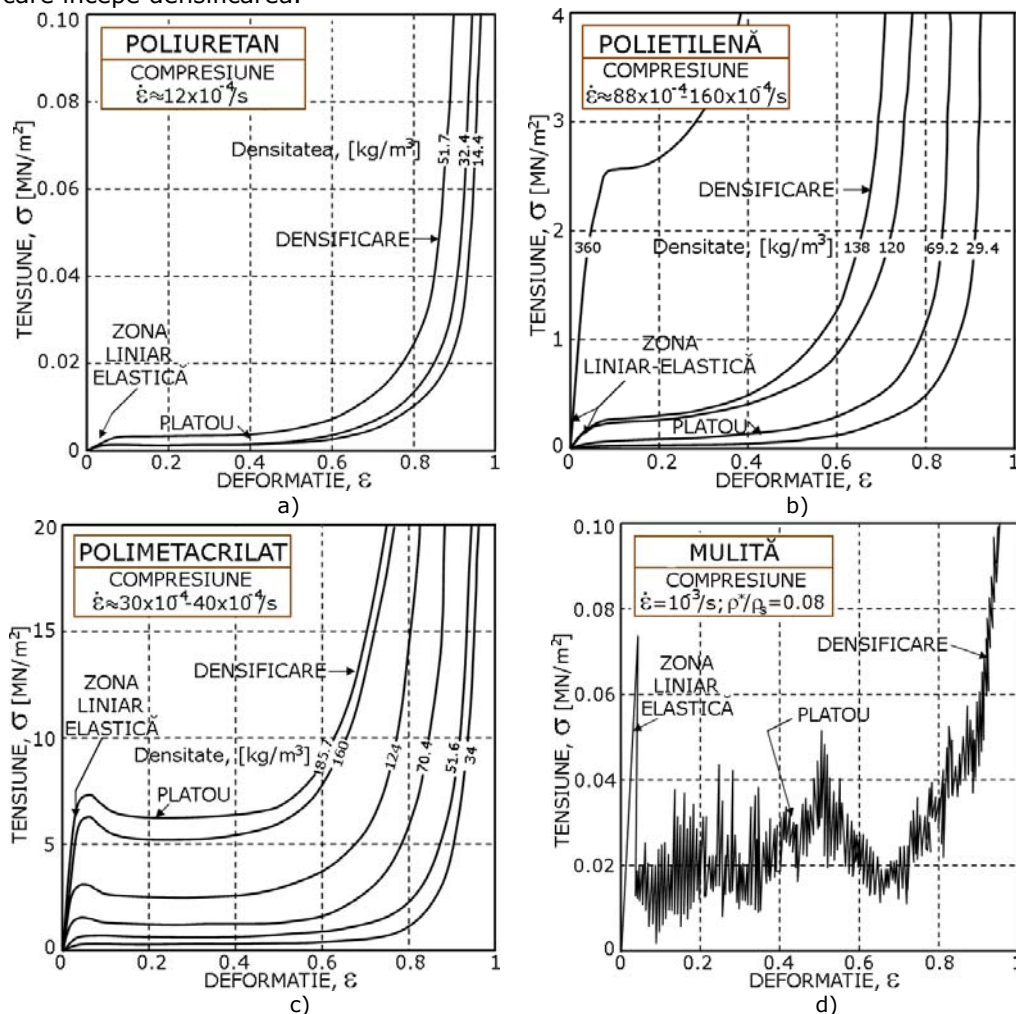


Fig. 2.2. Curbele tensiune-deformație la compresiune pentru spume: a) poliuretanic flexibile, b) polietilenă, c) polimetacrilat, d) mulită, după [Gibson și Ashby (1997)].

Comportamentul la întindere pentru fiecare tip de spumă este prezentat în figura 2.3, [Gibson și Ashby (1997), Ridha (2007)]. Și în acest caz zona liniar-elastică este dată de către încovoierea peretelui celulei, plus întindere dacă celulele sunt închise. În cazul spumelor elastomerice, deplasările mari rotesc muchiile celulei în jurul axei supuse întinderii, ducând la o creștere a rigidității structurii. De asemenea, în cazul spumelor plastice, pereții celulei se rotesc în jurul axei, dând un punct de curgere urmat de o creștere a curbei tensiune-deformație, până la rupere. În cazul spumelor fragile, are loc crearea unei fisuri la nivelul peretelui celulei sau pre-extinderea unei fisuri (defect), deja existente, urmată de propagarea acesteia, care în final duce la ruperea fragilă. Unele spume (cum ar fi de exemplu spumele polimerice rigide), prezintă un comportament plastic în cadrul compresiunii, pe când în cazul tracțiunii se comportă fragil. Acest lucru se datorează efectului de

concentrare a tensiunii din jurul fisurii, care poate duce la ruperea peretelui celulei și la o rupere rapidă în cazul tracțiunii, iar în cazul compresiunii acest efect influențează modul de rupere mult mai puțin.

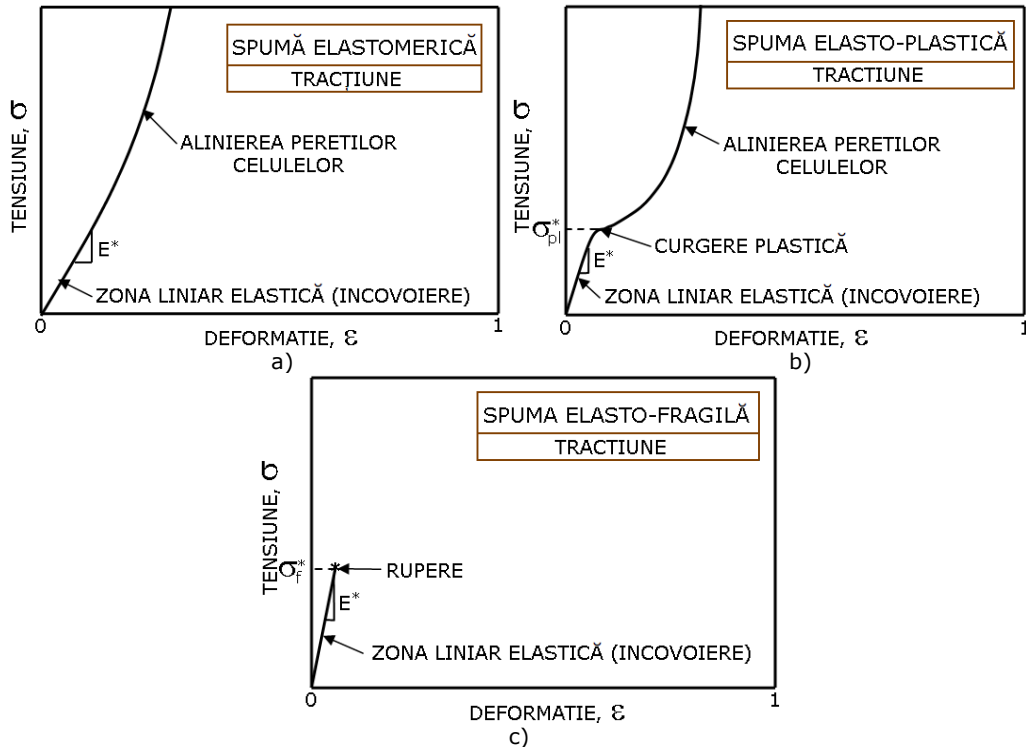


Fig. 2.3. Curbele tensiune-deformație la tracțiune, pentru o spumă: a) elastomerică, b) elasto-plastică, c) elasto-fragilă, după [Gibson și Ashby (1997)].

Proprietățile mecanice ale spumelor depind în foarte mare măsură de materialul solidului din care este realizată spuma. Măsurarea directă a modului peretelui celulei, utilizând teste de tracțiune sau încovoiere, este foarte dificil de realizat pe epruvete de dimensiuni mici, [Ryan și Williams (1989), Choi și alții (1990)]. Cea mai sigură metodă pare a fi cea care utilizează ultrasunete [Ashman și Rho (1988), Rho și alții (1993)].

## 2.3. Proprietățile mecanice ale spumelor: Compresiunea

În cele mai multe aplicații spumele sunt utilizate sub sarcini de compresiune. În acest subcapitol se prezintă comportamentul spumelor la solicitarea de compresiune.

### 2.3.1. Zona liniar-elastică

Comportamentul liniar-elastic al spumelor este caracterizat de un set de constante elastice. În mod obișnuit ele se aleg dintre următoarele: modulul de

elasticitate longitudinal,  $E^*$ , modulul de elasticitate transversal,  $G^*$ , modulul volumic,  $K^*$  și coeficientul lui Poisson,  $\nu^*$ . Pentru a descrie o spumă izotropă are nevoie de cel puțin doi dintre aceștia. Pentru un număr mai mare avem: cinci pentru o structură axisimetrică; nouă pentru o structură ortotropică. În această lucrare se vor da expresii doar pentru  $E^*$ ,  $G^*$ ,  $K^*$  și  $\nu^*$  pentru o spumă izotropă în termenii modulului de elasticitate al peretelui celulei (solidului),  $E^*$  și a densității relative  $\rho^*/\rho_s$  a spumei. Literatura conține numeroase încercări de a da aceste expresii (Gent și Thomas (1959), (1963); Ko (1965); Chan și Nakamura (1969); Patel și Finnie (1970); Lederman (1971); Mengs și Knipschild (1975); Barma și alții (1978); Gibson și Ashby, (1982); Christensen, (1986); și Warren și Kraynik, (1988)). Multe dintre aceste expresii sunt greu de corelat din cel puțin două motive: primul că se face o confuzie asupra mecanismului de deformare liniar-elastic, iar un alt motiv pentru ca de cele mai multe ori autorii aleg o formă particulară a celulei (de exemplu, fețe conectate formând un dodecaedru rombic).

Comportarea liniar elastică depinde în primul rând de tipul celulelor: celule închise sau celule deschise. La densități relative mici, spumele cu celule deschise se deformează prima dată prin încovoierea peretelui celulei [Ko, (1965); Patel și Finnie, (1970); Mengs și Knipschild, (1975); Gibson și Ashby, (1982); Warren și Kraynik, (1988)]. Dacă densitatea relativă crește ( $\rho^*/\rho_s > 0.1$ ), contribuția întinderii sau comprimării pereților celulei devine semnificativă [Warren și Kraynik, (1988)]. În cazul spumelor cu celule închise muchiile celulei se încovoie și se întind sau comprimă, în timp ce membranele care formează fețele celulei se alungesc, crescând contribuția rigidității peretelui celulei asupra modulului de elasticitate [Gent și Thomas, (1959), (1963); Patel și Finnie, (1970); Lederman, (1971); Green, (1985); și Christensen, (1986)]. Dacă membranele nu se rup, comprimarea celulelor crește rigiditatea. Fiecare mecanism care contribuie la răspunsul liniar-elastic al spumelor este arătat schematic în figura 2.4.

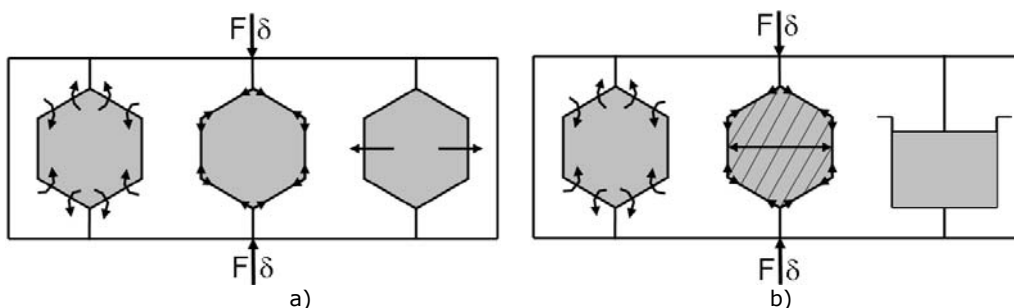


Fig. 2.4. Mecanismul de deformare în spume: a) spume cu celule deschise-încovoierea pereților celulei + deformare axială a pereților + curgerea fluidului dintre celule, b) spumă cu celule închise-încovoierea pereților celulei + contracția muchiilor și întinderea membranelor + presiunea gazului din celulă, [Gibson și Ashby (1997)].

În cele ce urmează se va analiza răspunsul pentru ambele tipuri de celule: spume cu celule închise și spume cu celule deschise.

### 2.3.1.1. Spume cu celule deschise

La cel mai simplu nivel, o spumă cu celule deschise poate fi modelată ca și un cub format din elemente de lungime  $l$  și având secțiunea pătrată,  $t$  (figura 2.5). Celulele adiacente sunt aranjate astfel încât elementele lor să se întâlnească într-un

punct comun. În realitate, desigur, forma celulelor este mult mai complexă decât cea prezentată în figura 2.5, [Gibson și Ashby (1997), Ashby (1983)]. Dar, dacă celulele se deformează și se rup, proprietățile lor pot fi exprimate folosind argumente dimensionale care omit toate constantele care reies din geometria specifică a celulei. Densitatea relativă a celulei,  $\rho^*/\rho_s$  și momentul de inerție a unui element,  $I$ , sunt legate de dimensiunile  $t$  și  $l$  prin:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (2.1)$$

și

$$I \propto t^4 \quad (2.2)$$

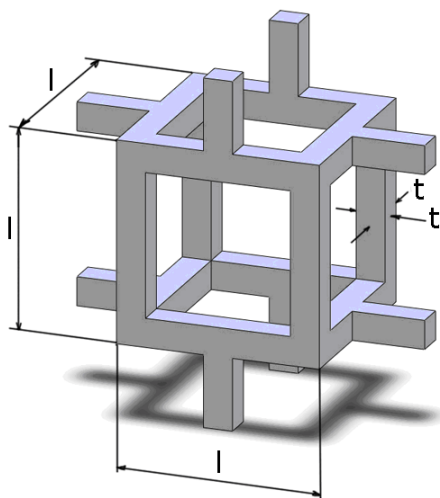


Fig. 2.5. Modelul cubic pentru spume cu celule deschise prezentând lungimea,  $l$  și grosimea,  $t$  a muchiei.

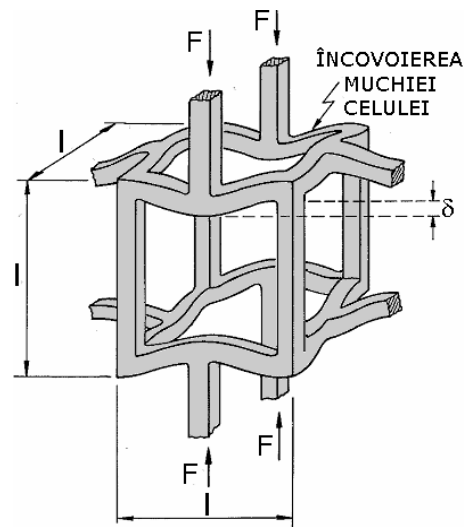


Fig. 2.6. Celula deformată la încovoieră pe zona liniar-elastică

Modulul de elasticitate al spumei este calculat din deformarea liniar-elastică a grinzii de lungime  $l$ , încărcată la mijlocul ei de forța  $F$ . Teoria grinzii [Timoshenko și Goodier, (1970)] dă această deformare,  $\delta$ , ca raport între  $Fl^3/E_s I$ , unde  $E_s$ , este modulul de elasticitate pentru materialul grinzii. În momentul în care spuma este încărcată cu o forță uniaxială, astfel încât fiecare muchie a celulei transmite o forță  $F$  (figura 2.6), muchiile se încovoie, și deformăția liniar-elastică a întregii structurii este proporțională cu  $Fl^3/E_s I$ . Forța  $F$ , este asociată cu tensiunea de compresiune,  $\sigma$ , prin  $F = \sigma l^2$  iar deformăția  $\varepsilon$ , este asociată cu deplasarea,  $\delta$ , prin  $\varepsilon = \frac{\delta}{l}$ . Rezultă că modulul de elasticitate pentru spumă este dat de următoarea relație:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{C_1 E_s I}{l^4} \quad (2.3)$$

Utilizând relațiile (2.1) și (2.2) obținem:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (2.4)$$

Ecuția (2.4) este pentru o spumă cu celule deschise, iar  $C_1$  include toate constantele geometrice de proporționalitate. Orice formă echiaxială a celulei am avea duce la acest rezultat, singura diferență constă în această constantă  $C_1$ . În acest caz se va lua valoarea  $C_1 \approx 1$ .

Modulul de elasticitate transversal este calculat într-un mod similar. Dacă se aplică o tensiune tangențială,  $\tau$ , spumei, elementele celulei de deformează din nou prin încovoiere. Deoarece deformația la încovoiere,  $\delta$ , este proporțională cu  $Fl^3/E_s I$ , iar tensiunea tangențială,  $\tau$ , și deformația unghiulară,  $\gamma$ , sunt proporționale cu  $F/l^2$  respectiv  $\delta/l$ , obținem:

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{C_2 E_s I}{l^4} \quad (2.5)$$

De unde rezultă

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.6)$$

Ecuția (2.6) este pentru o spumă cu celule deschise, iar în acest caz,  $C_2 \approx 3/8$ .

Coefficientul lui Poisson,  $\nu^*$ , este un coeficient de contracție transversală. Raportul deformațiilor transversală și longitudinală este constant, și din acest motiv coeficientul lui Poisson depinde numai de geometria celulei, fiind independent de densitate. Pentru un material care este liniar-elastic și izotrop, se poate scrie că:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.7)$$

De unde rezultă expresia coeficientului lui Poisson:

$$\nu^* = \frac{C_1}{2C_2} - 1 = C_3 \quad (2.8)$$

În acest caz  $C_3 = 0.33$ .

Determinarea constantelor elastice  $E^*$ ,  $G^*$  și  $\nu^*$  conține o serie de aproximări. Modul în care este calculată densitatea, de exemplu și deplasările axiale și transversale ale peretelui celulei au fost neglijate deoarece ele sunt mult mai mici comparativ cu deplasările realizate la încovoiere.

Atât contribuția dată de deformația de încovoiere cât și a celei dată de întinderea peretelui celulei în cadrul domeniului liniar-elastic au fost, de asemenea, analizate de către Warren și Kraynik (1988). Ei au găsit că sub încărcarea uniaxială sau tangențială, încovoierea reprezintă mecanismul dominant al deformării peretelui celulei la densități relative scăzute; rezultatele lor pentru modulul de elasticitate transversal și longitudinal simplificând ecuațiile (2.4) și (2.6). Sub încărcare hidrostatică pură, încovoierea este suprimată într-o spumă izotropică ideală: pereții celulei se contractă doar uniaxial, ducând la o dependență liniară a modulului volumic funcție de densitatea relativă [Christensen, (1986); Warren și Kraynik, (1988)]:

$$\frac{K^*}{E_s} = \frac{1}{9} \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.9)$$

În Tabelul 2.1 sunt prezentate proprietățile peretelui celulei după mai mulți autori.

Tabelul 2.1. Proprietățile peretelui celulei

Material	Simbol	Referința	Densitate	Modul de elasticitate	Tensiunea de curgere	Rezistența la rupere
			$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_s$ [MPa]	$\sigma_{ys}$ [MPa]	$\sigma_{fs}$ [MPa]
Poliuretan, (rigid)	PU(R)	Traeger (1967) Patel și Finnie (1970) Phillips și Waterman (1974) Fowlkes (1974) Wilsea și alții (1975) McIntyre și Anderson (1979) Gibson și Ashby (1982), (1997)	1200	1600	127	130

În practică, orice imperfecțiune a structurii celulare (cum ar fi neuniformități în densitatea relativă sau neregularități ale pereților celulei), duce la încovoierea pereților celulei, reducând modulul volumic.

Înlocuind constantele de proporționalitate, obținem următoarele relații de calcul pentru modulul de elasticitate longitudinal, cel transversal și coeficientul lui Poisson, pentru spumele cu celule deschise:

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.10a)$$

$$\frac{G^*}{E_s} \approx \frac{3}{8} \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.10b)$$

$$\nu^* \approx \frac{1}{3} \quad (2.10c)$$

### 2.3.1.2. Spume cu celule închise

Analiza spumelor cu celule închise este mai complicată decât a celor cu celule deschise. În momentul în care spumele sunt fabricate din componente lichide, tensiunile de suprafață pot trage materialul în muchiile celulei, lăsând doar un strat subțire de material în fețele celulei ceea ce duce la ruperea foarte ușoară a feței. Deși spuma are celule care inițial sunt închise, rigiditatea lor derivă în întregime din muchiile celulei, rezultând în final un modul de elasticitate identic cu cel al spumelor cu celule deschise. Dar, nici acest caz nu este respectat de către toate spumele cu celule închise. Din unii polimeri și unele sticle se realizează spume în care materialul solid este conținut în mare parte și în fețe, acesta contribuind la creșterea rigidității. În acest caz intră și multe materiale naturale (de exemplu, frunzele), care prezintă structură celulară închisă dar cu fețele mai dense. În acest caz, caracteristicile elastice depind de densitate într-un mod ușor diferit.



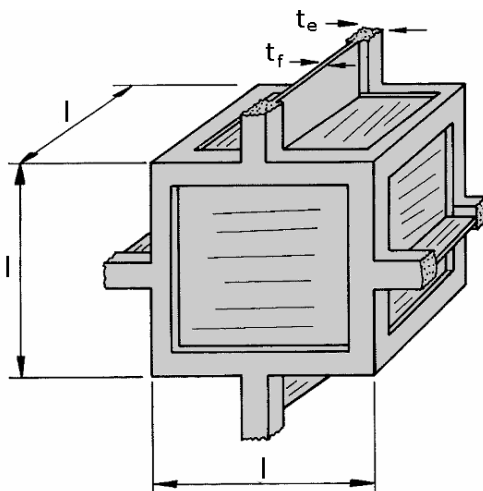


Fig. 2.7 Modelul cubic pentru spume cu celule închise prezentând lungimea celulei,  $l$ ; grosimea muchiei,  $t_e$  și grosimea feței,  $t_f$ .

Dacă considerăm o spumă cu celule închise în care o cantitate (fracțiune),  $\varphi$  de solid este conținută în muchiile celulei, având o grosime,  $t_e$ , putem spune că fracțiunea rămasă în fețe este  $(1 - \varphi)$ , și are grosimea,  $t_f$ , (figura 2.7), [Mills (2007), Gibson și Ashby (1997), Ashby (1983), Saint-Michel (2006)]. Fracțiunea  $\varphi$  este dată de ecuația (1.3), iar rapoartele  $t_e/l$  și  $t_f/l$  sunt legate de densitatea relativă și sunt date de ecuațiile (1.6) și (1.7).

Modulul de elasticitate pentru spumele cu celule deschise este suma celor trei componente prezentate în figura 2.4b. Prima componentă este cea de încovoiere a muchiilor celulei, [Gibson și Ashby (1982)] și are aceeași formă ca modulul calculat mai devreme în ecuația (2.4), înmulțită cu factorul  $(0.86 \varphi)^2$  (ec. 1.7b)

Al doilea termen din ecuația modulului este dat de către comprimarea lichidului celulei [Gent și Thomas, (1963); și Skochdopole și Rubens, (1965)]. Acest termen s-a calculat prin luarea în considerare a unui eșantion de spumă având volumul,  $V_0$ , densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ , celulele spumei conținând gaz. Dacă eșantionul este deformat prin compresiunea axială  $\varepsilon$ , volumul lui scade de la  $V_0$  la  $V$ :

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \varepsilon(1 - 2\nu^*) \quad (2.11)$$

În urma compresiunii, gazul conținut în celulă este eliminat din volumul celulei de către muchiile și fețele solidului celulei, volumul scăzând de la  $V_g^0$  la  $V_g$ :

$$\frac{V_g}{V_g^0} = \frac{1 - \varepsilon(1 - 2\nu^*) - \rho^*/\rho_s}{1 - \rho^*/\rho_s} \quad (2.12)$$

Efectul gazului asupra modulelor este calculat cu ajutorul legii lui Boyle. Dacă presiunea inițială a gazului este  $p_0$  (de obicei presiunea atmosferică), în urma aplicării deplasării  $\varepsilon$ , presiunea va deveni  $p$  și este dată de relația:

$$pV_g = p_0V_g^0 \quad (2.13)$$

Presiunea care trebuie învinsă de către tensiunea aplicată este următoarea:

$$p' = p - p_0 \quad (2.14)$$

Utilizând ecuația precedentă se obține:

$$p' = \frac{p_0 \varepsilon (1 - 2v^*)}{1 - \varepsilon (1 - 2v^*) - \rho^* / \rho_s} \quad (2.15)$$

Contribuția asupra modulelor (luând limita pentru cea mai mică deformare,  $\varepsilon$ ) este următoarea:

$$E_g^* = \frac{dp'}{d\varepsilon} = \frac{p_0 (1 - 2v^*)}{(1 - \rho^* / \rho_s)} \quad (2.16)$$

unde  $p_0$  este presiunea atmosferică (0.1 MPa), și influențează modulele spumelor elastomerice cu celule închise, neinfluențând foarte mult pentru alte tipuri de spume. Pe de altă parte, dacă  $p_0$  este mult mai mare decât presiunea atmosferică, sau dacă fluidul din celulă nu este aer ci este un lichid, răspunsul incompresibil al fluidului introduce suplimentar tensiuni (întindere) asupra peretelui celulei, iar în acest caz contribuția fluidului din celulă nu trebuie neglijată, [Warner și Edwards, (1988)].

Cea de-a treia componentă din relația modulului rezultă din tensiunile care iau naștere în elementele fețelor celulei, [Patel și Finnie, (1970); Green, (1985); Christensen, (1986)]. În momentul în care spuma cu celule închise este încărcată, încovoiera muchiilor celulei duce la o întindere a fețelor celulei, (figura 2.8).

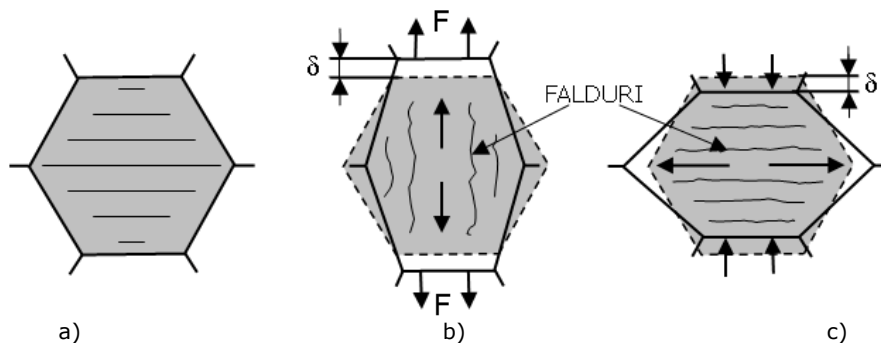


Fig. 2.8. Deformarea fețelor unei spume cu celule închise la o solicitare de tracțiune respectiv compresiune.

Forța care acționează asupra celulei produce asupra muchiilor celulei o deplasare  $\delta$  (figura 2.8). Structura este liniar-elastică, iar lucrul mecanic  $\frac{1}{2}F\delta$ , este realizat de către forța de revenire care este cauzată de încovoiera respectiv întinderea celulei. Prima dintre acestea este proporțională cu  $\frac{1}{2}S\delta^2$ , unde  $S$  este rigiditatea muchiei celulei, ( $S = E_s I / l^3$ ). A doua este proporțională cu  $\frac{1}{2}E_s \varepsilon^2 V_f$ , unde  $\varepsilon$  este deformația cauzată de întindere a feței celulei, iar  $V_f$  este volumul de solid din fața unei celule, ( $\varepsilon = \delta / l$  și  $V_f = l^2 t_f$ , unde, temporar, am despărțit grosimea muchiilor,  $t_e$ , de cea a fețelor,  $t_f$ ). Astfel avem:

$$\frac{1}{2}F\delta = \frac{aE_s I \delta^2}{j^3} + \beta E_s \left(\frac{\delta}{l}\right)^2 l^2 t_f \quad (2.17)$$

Utilizând  $I \propto t_e^4$  și  $E^* = (F/l^2) / (\delta/l)$ , obținem:

$$\frac{E^*}{E_s} = a' \frac{t_e^4}{j^4} + \beta' \frac{t_f}{l} \quad (2.18)$$

Înlocuind pe  $t_e$  și  $t_f$  din ecuațiile (1.7), obținem:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \varphi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) + C_1'(1-\varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2.19)$$

Ecuția (2.19) este relația pentru o spumă cu celule închise incluzând tensiunile din elemente, în care  $a$ ,  $\beta$ ,  $a'$ ,  $\beta'$  și  $C_1'$ , sunt simple constante de proporționalitate. Ecuția (2.19), descrie combinația dintre cele două efecte, încovoierea muchiei celulei și întinderea feței celulei. Acestei relații i-ar trebui adăugată și relația,  $\frac{\rho_0(1-2\nu^*)}{E_s(1-\rho^*/\rho_s)}$ , care ține cont de efectul gazului asupra compresinunii, care este destul de important. Mai rămân de determinat constantele  $C_1$  și  $C_1'$ . Limitele de  $\varphi = 1$  (când ecuația (2.19), trebuie să reducă din prima ecuația (2.10)) și  $\varphi = 0$  (atunci când  $E^*/E_s = \rho^*/\rho_s$ ) conduce la  $C_1 \approx C_1' \approx 1$ .

Modulul de elasticitate transversal,  $G^*$ , pentru o spumă cu celule închise, asemenea modulului de elasticitate longitudinal este influențat de către întinderea feței celulei. Parcurgând un itinerar identic cu cel precedent pentru modulul de elasticitate longitudinal,  $E^*$ , obținem:

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \varphi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + C_2'(1-\varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2.20)$$

O forfecare pură nu produce modificări de volum, deci, în acest caz presiunea gazului nu are nici o influență asupra modulului de elasticitate transversal.

Coeficientul lui Poisson pentru spume cu celule închise, asemenea ca și cel pentru celule deschise, este raportul a două deformații, aceasta depinzând doar de forma celulelor nu și de densitatea relativă.

Înlocuind toate constantele de proporționalitate și incluzând tensiunile din elemente, respectiv presiunea gazului obținem următoarele relații de calcul pentru modulul de elasticitate longitudinal, cel transversal și coeficientul lui Poisson, pentru spumele cu celule închise:

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \varphi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) + (1-\varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} + \frac{\rho_0(1-2\nu^*)}{E_s(1-\rho^*/\rho_s)} \quad (2.21a)$$

$$\frac{G^*}{E_s} \approx \frac{3}{8} \left\{ \varphi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1-\varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} \right\} \quad (2.21b)$$

$$\nu^* \approx \frac{1}{3} \quad (2.21c)$$

### 2.3.2. Zona neliniară - elastică și densificarea

Zona liniar-elastică, desigur, este limitată și se întâlnește la deformații mici, de obicei până la 5% sau chiar mai puțin. Spumele elastomerice pot fi supuse solicitărilor de tracțiune sau compresiune care să depășească cu mult această valoare a deformației. Deformațiile rămân totuși recuperabile (și totodată elastice), dar ele sunt neliniare. În cazul compresiunii, curba tensiune-deformație prezintă un platou extins la o tensiune,  $\sigma_{el}^*$ , numită tensiunea colapsului elastic (figura 2.1a), și reprezintă o tensiune importantă care se utilizează în proiectarea sistemelor pe bază de spumă folosite pentru amortizarea vibrațiilor sau pentru ambalare.

Curgerea plastică generalizată este cauzată de către flambarea elastică a pereților celulei [Gent și Thomas, (1959); Matoins (1964); Chana și Nakamura, (1969); Patel și Finnie, (1970); Menges și Knipschild, (1975); Barma și alții, (1978); Gibson și Ashby, (1982); Christensesn (1986)]. Literatura de specialitate suferă puțin datorită confuziei dintre colapsul elastic și plastic al spumei și datorită modelelor care se bazează prea mult pe caracteristicile specifice și mai degrabă improbabile ale geometriei celulei.

Tensiunea colapsului elastic și comportamentul post-colaps, depind de tipul spumelor, adică dacă spumele sunt cu celule închise sau cu celule deschise. Pentru spumele cu celule deschise, asemenea poliuretanilor prezentați în figura 2.2a, colapsul la o sarcină aproape constantă, produce un platou extins și plat. În cazul spumelor cu celule închise, asemenea polietilenelor prezentate în figura 2.2b, comprimarea celulelor ce încorporează gaz, împreună cu tensiunile elementelor care apar în fețele celulei, dau o curbă tensiune-deformație care crește odată cu creșterea deformației.

#### 2.3.2.1. Spumele cu celule deschise

Atunci când o spumă elastomerică cu celule deschise este solicitată la compresiune, mai întâi are loc o încovoiere a pereților celulei urmată de o flambare a acestora (figura 2.9).

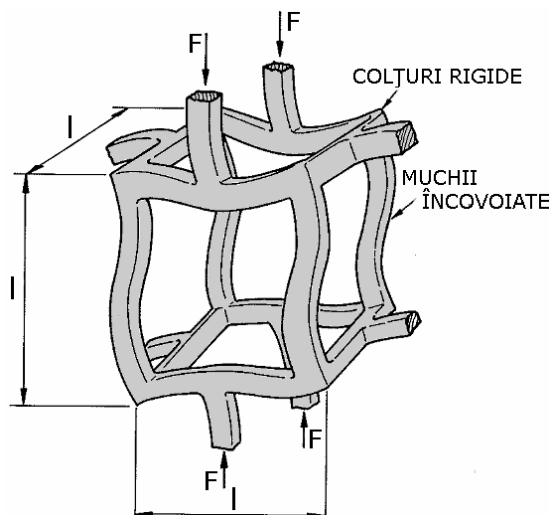


Fig. 2.9. Încovoierea elastică a pereților unei celule pentru o spumă cu celule deschise

Încărcarea critică la care o muchie a celulei de lungime  $l$ , modul de elasticitate  $E_s$  și moment de inerție  $I$  flambează este dată de formula lui Euler:

$$F_{crit} = \frac{n^2 n^2 E_s I}{l^2} \quad (2.22)$$

unde, în acest caz  $n^2$  descrie modul de rezemare/constrângere al muchiei. În cazul în care această forță este atinsă într-un strat de celule care acoperă secțiunea transversală, acestea vor flamba, inițiindu-se colapsul elastic în spumă. Tensiunea la care se produce acest fenomen se notează,  $\sigma_{el}^*$  și este dată de relația:

$$\sigma_{el}^* = \frac{E_{crit}}{l^2} = \frac{E_s I}{l^4} \quad (2.23)$$

Utilizând ec.  $I = t^4$  și  $\rho^*/\rho_s = (t/l)^2$  adecvate spumelor cu celule deschise avem:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = C_4 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.24)$$

Ecuția (2.24) este validă pentru o spumă cu celule deschise. Această relație poate fi ajustată pentru a lua în considerare imperfecțiunile de geometrie care apar în momentul în care densitatea spumei nu este mică, (de exemplu atunci când colțurile celulei conțin o parte semnificativă din volum), Gibson și Ashby (1982):

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = C_4' \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \left( 1 + \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \right)^2 \quad (2.25)$$

unde  $C_4 = 0.05$  și  $C_4' = 0.03$  conțin toate constantele de proporționalitate.

Această corecție este neesențială atunci când densitatea relativă  $\rho^*/\rho_s < 0.3$ , dar are efect pentru spume de densitatea relativă mai mare.

Înlocuind constantele de proporționalitate, obținem următoarele relații de calcul pentru spumele cu celule deschise:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} \approx 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.26a)$$

Ecuția (2.26a) este pentru o spumă cu celule deschise.

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} \approx 0.03 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \left( 1 + \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \right)^2 \quad (2.26b)$$

Ecuția (2.26b) este pentru o spumă cu celule deschise incluzând corecția densității.

### 2.3.2.2. Spume cu celule închise

În momentul în care spumele cu celule închise prezintă un colaps elastic, are loc o comprimare a lichidului din celule. Acest lucru poate schimba atât tensiunea de colaps,  $\sigma_{el}^*$ , cât și comportamentul post-colaps.

Se consideră inițierea colapsului într-o spumă umplută cu lichid. Presiunea inițială a fluidului este considerată  $p_0$ , iar presiunea atmosferică este  $p_{at}$ . Dacă  $p_0$  este mai mare decât  $p_{at}$ , diferența de presiune  $p_0 - p_{at}$  exercită tensiuni asupra muchiilor și fețelor celulei. Ele nu pot flamba decât în momentul în care tensiunea aplicată a depășit atât această tensiune cât și cea cauzată de forța de flambaj asupra muchiilor celulei dată de relația (2.26), astfel încât:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{p_0 - p_{at}}{E_s} \quad (2.27)$$

În cadrul procesului de fabricare al spumelor, de obicei  $p_0$  este aproximativ egală cu  $p_{at}$ , în consecință gazul are un efect scăzut asupra inițierii colapsului. În cadrul materialelor celulare naturale, de exemplu presiunea exercitată asupra unei celule dintr-o frunză poate atinge chiar 6 atmosfere, în acest caz termenul presiunii având un rol foarte important.

De asemenea, într-un astfel de caz, comportamentul post-colaps se modifică. Într-o spumă cu celule deschise, regiunea de platou este aproape orizontală, iar într-o spumă cu celule închise această regiune crește, prezentând o anumită întărire. Unul dintre motivele prezenței acestei întăriri este dat de faptul că în cazul solicitării de compresiune, celulele pline de gaz exercită o anumită presiune asupra pereților celulei, iar aceasta se calculează cu ajutorul relației (2.15).

$$p' = \frac{p_0 \varepsilon (1 - 2\nu^*)}{1 - \varepsilon (1 - 2\nu^*) - \rho^* / \rho_s} \approx \frac{p_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - \rho^* / \rho_s} \quad (2.28)$$

Această aproximare este posibilă deoarece în zona post-colaps:  $\nu^* \approx 0$ .

Apoi, curba post-colaps este descrisă de următoarea ecuație:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{p_0 \varepsilon}{E_s (1 - \varepsilon - \rho^* / \rho_s)} \quad (2.29)$$

Ecuația (2.29) este valabilă pentru o spumă cu celule închise incluzând și contribuția presiunii gazului.

Cel de-al doilea termen din partea dreaptă a ecuației de mai sus cauzează o creștere a tensiunii de platou odată cu creșterea deplasării.

Creșterea a tensiunii de platou odată cu creșterea deformării nu este dată întotdeauna doar de către comprimarea celulelor cu gaz, ci această pantă mai poate fi dată și de tensiunile care apar în elementele celulei. Cele mai multe studii s-au realizat pe polietilenă, care este o spumă cu celule închise cu o gamă foarte variată de densități [Zhang și Ashby (1988)]. Astfel, pentru spumele cu celule închise avem:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} \approx 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{(p_0 - p_{at})}{E_s} \quad (2.30a)$$

iar dacă se include corecția densității și presiunea gazului din celulă rezultă:

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} \approx 0.03 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \left( 1 + \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \right)^2 + \frac{(p_0 + p_{at})}{E_s} \quad (2.30b)$$

### 2.3.2.3. Densificarea

Regiunea de platou se termină în momentul începerii densificării. La deplasări mari la compresiune pereții celulelor se rup, iar materialul acestora este supus de asemenea la compresiune. Când are loc această cedare a pereților celulelor, curba tensiune-deformație crește abrupt, tinzând către o pantă  $E_S$ , (deși aceasta este mult mai mare decât  $E^*$ , curba tensiune-deplasare apare verticală), limitată de către o deplasare  $\varepsilon_D$  (figura 2.1a). S-ar putea spune că această limitare a deplasării să fie egală cu porozitatea ( $1 - \rho^*/\rho_s$ ), deoarece aceasta corespunde deplasării în care tot spațiul dintre pori a fost eliminat. În realitate, pereții celulei se aglomerează împreună la o deplasare chiar mai mică decât aceasta. Această densificare este descrisă de către următoarea relație:

$$\varepsilon_D = 1 - 1.4 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.31)$$

### 2.3.3. Colapsul plastic și densificarea

Colapsul plastic într-o spumă cu celule deschise are loc atunci când momentul exercitat asupra pereților celulei depășește complet momentul plastic, [Thornton și Magee, (1975a,b); Gibson și Ashby, (1982)], creând articulații plastice ca cele prezentate în figura 2.10. Dar pentru spumele cu celule închise colapsul plastic poate fi afectat atât de întinderea pereților, de încovoierea lor cât și de presiunea fluidului din interiorul celulei. În primul caz se va examina situația cea mai simplă, adică cea a spumelor cu celule deschise.

#### 2.3.3.1. Spume cu celule deschise

Colapsul plastic are loc atunci când momentul exercitat de forța  $F$  (figura 2.10), depășește momentul articulației plastice din muchiile celulei.

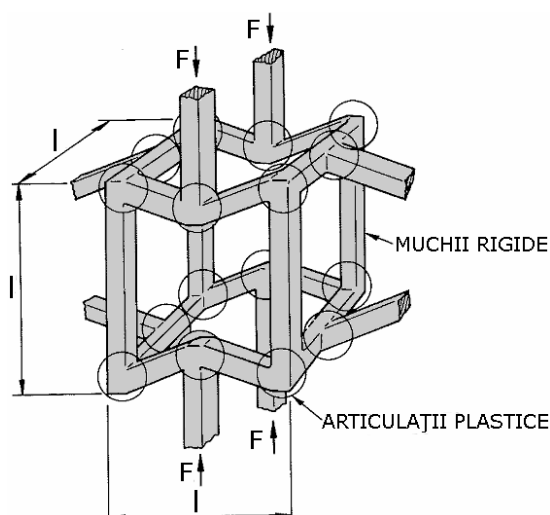


Fig. 2.10. Formarea articulațiilor plastice în spumele cu celule deschise

Pentru o grindă de secțiune pătrată de latura  $t$ , acest moment este:

$$M_p = \frac{1}{4} \sigma_{ys} t^3 \quad (2.32)$$

unde  $\sigma_{ys}$  este limita de curgere a materialului peretelui celulei. Dacă forța  $F$  are o direcție normală la muchia celulei, momentul de încovoiere maxim este proporțional cu  $Fl$ . Tensiunea din spumă, ca și mai înainte, este proporțională cu  $F/l^2$ . Combinând rezultatele obținem tensiunea corespunzătoare colapsului plastic:

$$\sigma_{pl}^* = \frac{M_p}{l^3} \quad (2.33)$$

Utilizând ecuația  $\rho^*/\rho_s = (t/l)^2$  pentru celule deschise obținem expresia pentru o spumă cu celule deschise:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (2.34)$$

De asemenea se pot face ajustări acestei expresii, dar acestea au un efect foarte scăzut asupra rezultatelor. La densități mari ale spumei trebuie luate în calcul și corecțiile datorate densității. Astfel luând în considerare corecția datorată densității ultima relație devine:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5' \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \left[ 1 + \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \right] \quad (2.35)$$

unde constantele  $C_5 = 0.3$  și  $C_5' = 0.23$ , conține toate constantele de proporționalitate.

Înlocuind constantele de proporționalitate, obținem următoarele relații de calcul pentru spumele cu celule deschise:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0.3 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (2.36a)$$

Ecuația (2.36a) fiind valabilă pentru o spumă cu celule deschise, iar

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0.23 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \left[ 1 + \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1/2} \right] \quad (2.36b)$$

este validă pentru o spumă cu celule deschise incluzând corecția datorată densității.

### 2.3.3.2. Spume cu celule închise

Fețele spumelor cu celule închise se comportă ca niște membrane. Colapsul plastic face ca aceste membrane să se "boțescă" în direcția comprimată, iar aceste membrane fiind subțiri, forța necesară acestei "boțiri" este relativ mică. Dar, la direcții perpendiculare pe acestea, membranele sunt întinse ceea ce duce la modificări semnificative asupra rezistenței la curgere a spumei.

Se consideră colapsul unei celule ca cea prezentată în figura 2.11. Muchiile și fețele celulei au grosimile  $t_e$ , respectiv  $t_f$ ; ele fiind legate de coeficientul de umplere cu solid al fețelor,  $\phi$ , prin ec. 1.7 prezentată în capitolul precedent.



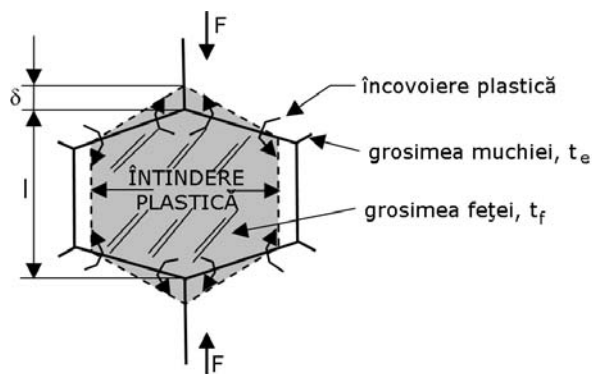


Fig. 2.11. Întinderea plastică a fețelor unei celule pentru o spumă cu celule închise

În acest caz se poate scrie că:

$$F\delta = aM_p \frac{\delta}{l} + \beta\sigma_{ys}\delta \cdot t_f l \quad (2.37)$$

unde  $a$  și  $\beta$  sunt constante. Înlocuind  $F$  cu  $\sigma \cdot l^2$  și  $M_p$  cu  $\sigma_{ys}t_e^2/4$  (ec. 2.32),  $t = t_e$ , obținem:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = \frac{a}{4} \left( \frac{t_e}{l} \right)^3 + \beta \left( \frac{t_f}{l} \right) \quad (2.38)$$

În cele din urmă, utilizând ecuația (1.7) obținem:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left( \varphi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_5'' (1 - \varphi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.39)$$

Ecuația (2.39) este validă pentru o spumă cu celule închise, incluzând și tensiunile din membrane, iar  $C_5$  și  $C_5''$  sunt constante. Dacă  $\varphi = 1$  (spume cu celule deschise), știm că  $C_5 = 0.3$ , iar dacă  $\varphi = 0$ ,  $\sigma_{pl}^*$  trebuie să fie egală cu  $\sigma_{ys}$ , deci  $C_5'' \approx 1$ . Factorul de corecție al densității  $(1 + (\rho^*/\rho_s)^{1/2})$ , poate fi adăugat dacă se dorește primului termen, dar influența lui este mică.

Aceste ecuații descriu efectul combinat de încovoiere plastică a muchiilor celulei și cel de întindere plastică a fețelor. De asemenea la cei doi termeni se mai poate adăuga și contribuția fluidului din celule. Dacă fluidul din celulă este un gaz la presiune atmosferică, contribuția acestui termen este de obicei nesemnificativă (deoarece  $\sigma_{ys} \gg p_{at}$ ). Dar dacă celulele conțin fluid la o presiune  $p_0$  mult mai mare decât cea atmosferică, această presiune trebuie adăugată termenului din dreapta al ecuației (2.39).

Înlocuind constantele de proporționalitate, obținem următoarea relație de calcul pentru spumele cu celule închise, incluzând tensiunile din membrane și contribuția presiunii gazului:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0.3 \left( \varphi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + (1 - \varphi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) + \frac{p_0 - p_{at}}{\sigma_{ys}} \quad (2.40)$$

### 2.3.3.3. Densificarea

Ca și în cazul colapsului elastic, în timpul compresiunii au loc deformații plastice mari ducând la prăbușirea pereților celulei, acest lucru cauzând o creștere semnificativă a curbei tensiune - deformație la o deformație aproape constantă  $\varepsilon_D$ . Atât spumele elastice cât și cele plastice sunt descrise de către relația:

$$\varepsilon_D = 1 - 1.4 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.41)$$

## 2.4. Proprietățile mecanice ale spumelor: Întinderea

Spumele structurale și miezul de spumă din structurile de tip sandwich sunt supuse atât la tracțiune cât și la compresiune. Curbele caracteristice solicitării de tracțiune pentru spume sunt prezentate în figura 2.3. Ruperea este puțin diferită în cazul tracțiunii: tensiunile de întindere pot produce o rupere rapidă, fragilă, pe când în cazul compresiunii strivirea celulelor are loc progresiv.

### 2.4.1. Zona liniar-elastică

Determinarea modulelor în cazul întinderii se face în același mod ca și în cazul compresiunii. Și în acest caz zona liniar-elastică se află la deplasări mici (sub 5%). Caracteristicile mecanice pentru spumele cu celule deschise se determină din condiția de încovoiere a muchiei celulei; pe când în cazul spumelor cu celule închise acestea se determină însumând trei termeni: încovoierea muchiei, întinderea feței și presiunea gazului din interiorul celulei. Aceste caracteristici elastice sunt date cu aproximație în ecuațiile (2.10) și (2.21).

### 2.4.2. Zona neliniar - elastică

La deplasări mai mari de câteva procente, rigiditatea spumelor elastomerice crește. Flambajul care apare la compresiune și produce comportarea neliniar - elastică nu este posibil în tracțiune. În schimb, muchiile celulei care se află la un anumit unghi față de axa tensiunii, se rotesc față de această axă, ducând la o scădere a momentului de încovoiere care acționează asupra lor, (figura 2.12).

Inițial, răspunsul elastic este dominat de către încovoierea muchiei celulei, dând valoarea inițială a lui  $E^*$  descrisă mai înainte. Dar, odată cu rotirea pereților celulei, rigiditatea crește. Atât modelul schițat în figura 2.12 cât și rezultatele experimentale realizate pe spume reale arată că muchiile devin mai mult întinse decât încovoiate, dominând deformațiile axiale. Neliniaritatea introdusă în curbele tensiune-deformație de către acest efect a fost analizată utilizând un element tetraedral pentru a modela straturile [Warren și Kraynik, (1991)]. Ei au găsit pentru tensiunea uniaxială următoarea expresie:

$$\frac{\sigma^*}{E_s} = 1.1 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \varepsilon + 3.74 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \varepsilon^2 + 0.0343 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \varepsilon^3 \quad (2.42)$$

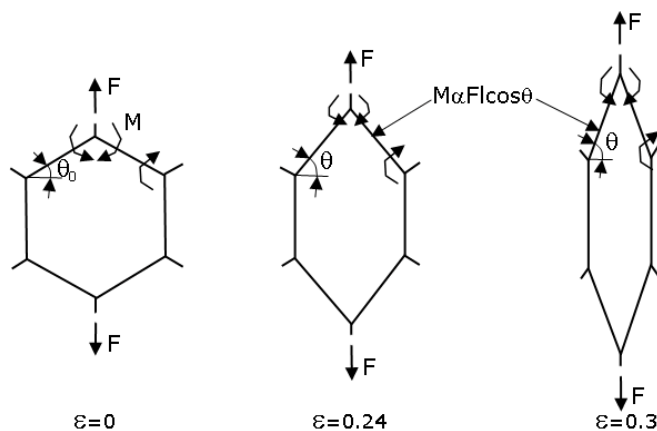


Fig. 2.12. Modul de aliniere a muchilor celulei pe durata solicitării la tracțiune

### 2.4.3. Colapsul plastic

În cazul tracțiunii o spumă plastică curge utilizând aceleași mecanisme și aceleași tensiuni ca și în cazul compresiunii (ec. (2.36) și (2.40)). Comportamentul post-curgere în acest caz este diferit. În cazul compresiunii rotirea pereților celulei induce un moment de încovoiere care rămâne constant sau poate crește puțin, dând un platou orizontal lung. În cadrul tracțiunii, această rotire (figura 2.12), reduce momentul de încovoiere astfel încât după o deplasare de  $1/3$  pereții celulei sunt substanțial aliniați cu axa de tracțiune. Tensiunea  $\sigma^*$  crește peste acest interval de deplasare de la valoarea  $\sigma_{pl}^*$  calculată anterior (ec. (2.36) și (2.40)), la valoarea:

$$\frac{\sigma_A^*}{\sigma_{ys}} \approx \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2.43)$$

### 2.4.4. Ruperea fragilă a spumelor

#### 2.4.4.1. Noțiuni de bază despre mecanica ruperii liniar elastică

Ruperea fragilă la tracțiune este destul de diferită față de cea la compresiune. În compresiune spuma se strivește progresiv, iar în cazul tracțiunii spuma se rupe datorită propagării unei singure fisuri. Spumele fragile (aici fiind incluse cele mai rigide spume polimerice), în cazul tracțiunii se comportă liniar-elastic până la rupere, deci ruperea prin tracțiune poate fi tratată cu ajutorul conceptelor din mecanica ruperii liniar elastică. Prin urmare, vom căuta o expresie analitică care să exprime tenacitatea la rupere a spumelor,  $K_{IC}^*$ , în funcție de rezistența la rupere a pereților celulei  $\sigma_{fs}$  și a densității relative  $\rho^*/\rho_s$ , [Fowlkes, (1974); McIntyre și Anderson, (1979); Morgan și alții, (1981); Zwissler și Adams, (1983); Ashby, (1983); Maiti și alții, (1984b) și Green, (1985)].

Foarte multe cărți prezintă conceptele mecanicii ruperii liniar elastice, dintre care cele mai însemnate sunt următoarele: Anderson (1995), Broek (1986), Ewalds și Wanhill (1989). Conform mecanicii ruperii liniar elastice câmpul de tensiuni din

vecinătatea unei fisurii depinde de lungimea fisurii  $a$ , tensiunea aplicată  $\sigma$  și un coeficient  $\beta$ , care ține seama de geometria corpului fisurat (dimensiuni finite, caracteristici geometrice) și de tipul încărcării (tracțiune, încovoiere, torsiune). Acestea sunt exprimate cu ajutorul factorului de intensitate al tensiunii:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.44)$$

Soluții ale câmpului de tensiuni din vecinătatea fisurii într-un solid liniar elastic au fost propuse de către Westergaard (1939), Irwin (1957), Williams (1957) și mulți alți cercetători. În figura 2.13 este prezentată o fisură cu lungimea  $2a$  într-o placă sollicitată la o tensiune  $\sigma$ .

Câmpul de tensiuni din vecinătatea fisurii, (figura 2.14), pentru modul mixt de încărcare poate fi exprimat sub următoarea formă:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ K_I f_{ij}^I(\theta) + K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} f_{ij}^{III}(\theta) \right] + \quad (2.45)$$

+ alti termeni de ordin superior

unde  $r$ ,  $\theta$  sunt coordonatele polare care definesc poziția unui element având originea în vârful fisurii,  $K_I$ ,  $K_{II}$  și  $K_{III}$  sunt factorii de intensitate ai tensiunii corespunzători celor trei moduri de încărcare, iar  $f_{ij}^I, f_{ij}^{II}, f_{ij}^{III}$  sunt funcții adimensionale de coordonata polară  $\theta$  prezentate în Tabelul 2.2.

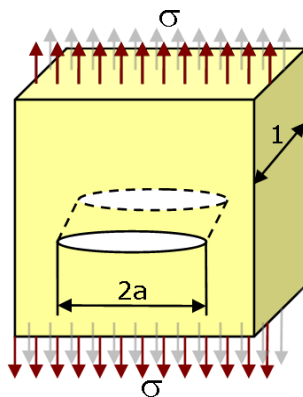


Fig. 2.13. Fisura cu lungimea  $2a$  într-o placă sollicitată la o tensiune  $\sigma$

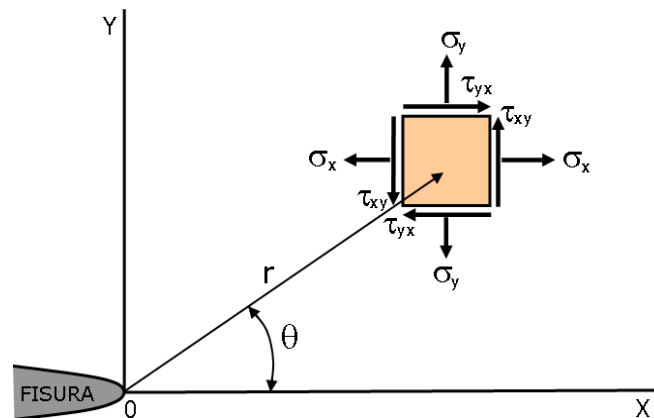


Fig. 2.14. Componentele tensiunii din vecinătatea fisurii

Câmpul de tensiuni descris de ecuația (2.45) arată faptul că tensiunile de la vârful fisurii sunt teoretic infinite. Cele mai multe materiale ingineresti curg în momentul în care ating tensiunea la curgere ( $\sigma_{YS}$ ) și au o rezistență finită. Astfel la atingerea limitei de curgere se produce o enclavă plastică. Mărimea zonei plastice se notează cu  $r_p$  și reprezintă raza corespunzătoare tensiunii la curgere, figura 2.15. Câmpul de tensiuni liniar elastic este valabil numai în zona dominată de singularitatea tensiunii  $K$ , de exemplu atunci când  $r_p$  este mai mică decât raportul  $1/25$  din lungimea fisurii  $a$ .

Tabelul 2.2. Funcțiile non-dimensionale

$f_{ij}$	<b>Modul I</b>	<b>Modul II</b>	<b>Modul III</b>
$f_{xx}$	$\cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$	$-\sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$	0
$f_{yy}$	$\cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$	$\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$	0
$f_{zz}$	$\begin{cases} 0 & - \text{tensiune} \\ v(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & - \text{deformație} \end{cases}$	$\begin{cases} 0 & - \text{tensiune} \\ v(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & - \text{deformație} \end{cases}$	0
$f_{xy}$	$\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$	$\cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$	0
$f_{xz}$	0	0	$-\sin \frac{\theta}{2}$
$f_{yz}$	0	0	$\cos \frac{\theta}{2}$

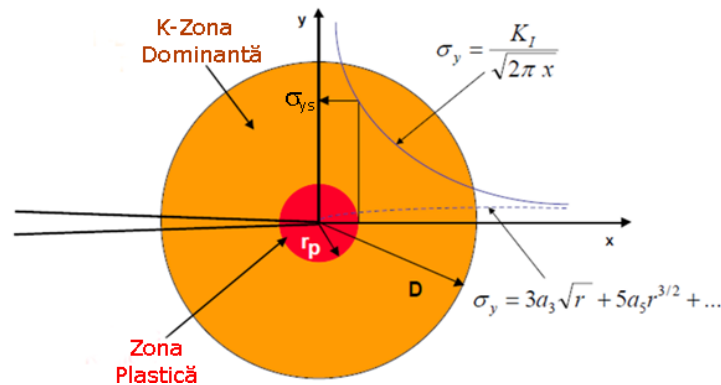


Fig. 2.15. Valabilitatea câmpului de tensiuni liniar elastic

Câmpurile de deplasare la vârful fisurii pentru materialele izotrope liniar elastice sunt date de următoarele ecuații:

➤ pentru Modul I

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\
 v &= \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( \kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

➤ pentru Modul II

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( \kappa + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\
 v &= -\frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \kappa - 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

- pentru Modul III

$$w = \frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.48)$$

$$u = v = 0.$$

unde  $G$  este modulul de elasticitate transversal, iar  $\kappa = 3 - 4\nu$  pentru stare plană de deformare, respectiv  $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$  pentru stare plană de tensiune.

Factorii de intensitate ai tensiunii sunt foarte importanți deoarece în condițiile unei curgeri limitate câmpurile de tensiune și deformare sunt dominate de către factorii de intensitate ai tensiunii. Prin urmare, aprecierea dacă o fisură se propagă instabil sau nu, precum și la viteza de propagare sunt controlate de către factorul de intensitate al tensiunii.

Factorii de intensitate ai tensiunii pot fi determinați prin mai multe metode și anume:

- analitic, utilizând:
  - funcții complexe ale tensiunii,
  - funcții de pondere,
  - funcții Green;
- numeric, cu ajutorul:
  - metodelor de modelare cu elemente finite,
  - metodelor de modelare cu elemente de frontieră;
- experimental, cu ajutorul:
  - traductoarelor de deplasare,
  - fotoelasticității,
  - interferometriei
  - termoelasticității.

Criteriul de rupere exprimat pe baza factorului de intensitate al tensiunii prevede că ruperea instabilă are loc atunci când factorul de intensitate al tensiunii atinge o valoare critică  $K_{IC}$ , numită de asemenea și *tenacitate la rupere*. Tenacitatea la rupere  $K_{IC}$  reprezintă capacitatea intrinsecă a unui material de a se opune propagării instabile a unei fisuri. Astfel, o fisură se va propaga (în Modul I), atunci când factorul de intensitate al tensiunii  $K_I$ , atinge tenacitatea la rupere a materialului  $K_{IC}$ . Prin urmare, în conformitate cu ipotezele din mecanica ruperii liniar elastice fisura se propagă instabil dacă:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} = K_{IC} \quad (2.49)$$

Acest criteriu al ruperii este cel mai utilizat în mecanica ruperii liniar elastică, deoarece prezintă o mulțime de soluții ale factorului de intensitate al tensiunii, disponibile pentru diferite corpuri cu fisuri, iar tenacitatea la rupere a materialelor este o proprietate mecanică ce poate fi determinată experimental. Valoarea măsurată a tenacității la rupere,  $K_{IC}$ , este mare pentru grosimi mici ale epruvetelor și atinge o valoare de platou aproape constantă la epruvete cu grosimi mari; această valoare a factorului critic de intensitate al tensiunii, notat cu  $K_{IC}$ , reprezintă tenacitatea la rupere în condițiile stării plane de deformare, figura 2.16.

În general, determinarea tenacității la rupere se face experimental utilizând metodele standard de testare, care vor fi prezentate în Capitolul 3. Modelele micromecanice au fost dezvoltate pe baza soluțiilor analitice (Subcapitolul 2.4.4.2),

și cu ajutorul metodelor de modelare cu elemente finite, în scopul prezicerii tenacității la rupere a materialelor celulare, (Capitolul 4).

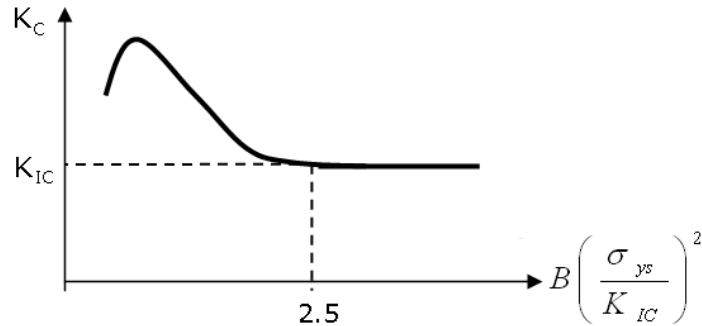


Fig. 2.16. Variația tenacității la rupere funcție de grosimea normalizată a epruvetei

Evaluarea integrității și fiabilității structurilor necesită o analiză detaliată a tensiunilor și deformațiilor. Primele modele s-au bazat pe criteriul rezistenței materialelor care prevede că  $\sigma = \sigma_L$ , (figura 2.17), unde  $\sigma_L$  este tensiunea limită, reprezentând raportul dintre rezistența la curgere sau tracțiune și un coeficient de siguranță.

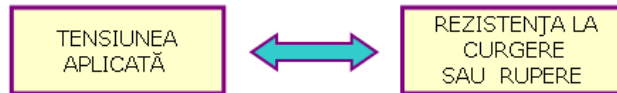


Fig. 2.17 Criteriul de proiectare din Rezistența Materialelor

Mecanica Ruperii ia în considerare în plus față de Rezistența Materialelor și mărimea defectului ca în figura 2.18 și ecuația (2.49). Astfel, pentru proiectarea unei structuri fisurate sau posibil fisurate, inginerul trebuie să decidă ce variabile de proiectare pot fi selectate, deoarece, doar două dintre aceste variabile pot fi fixe, iar cea de-a treia variabilă trebuie să fie determinată. Variabilele de proiectare prezentate în figura 2.18 sunt:

- proprietăți de material: tenacitatea la rupere  $K_{IC}$ ;
- nivelul tensiunii de proiectare: tensiunea aplicată  $\sigma$  ;
- mărimea defectului: lungimea fisurii  $a$ .

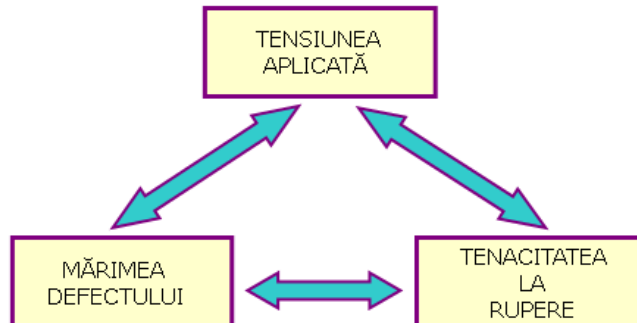


Fig. 2.18 Criteriul de proiectare din Mecanica Ruperii

În cadrul unei evaluări cât mai sigure a unui corp fisurat, este esențial ca lungimea fisurii să fie cunoscută în mod corespunzător. În cele mai multe cazuri această lungime a fisurii nu este cunoscută exact. Astfel, ipotezele de calcul trebuie să fie făcute pentru valoarea sa, iar aceste ipoteze sunt dependente de metodologia adoptată de detectare a fisurii.

#### 2.4.4.2. Modele micromecanice

Modelele micromecanice de estimare a tenacității la rupere  $K_{IC}$ , exprimă această caracteristică de material în funcție de rezistența la rupere a pereților celulei,  $\sigma_{fs}$ , și de densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ . Caracteristicile geometrice ale unei spume cu celule deschise sunt lungimea celulei  $l$  și grosimea muchiei  $t$ , acestea fiind prezentate în figura 2.5.

În cele ce urmează se vor prezenta pe scurt cele mai importante modelele micromecanice pentru evaluarea tenacității la rupere.

##### 2.4.4.2.1. Modelul micromecanic Gibson - Ashby (1997)

La scara dimensiunii celulelor, o fisură se poate extinde într-o spumă într-un mod discret. De fiecare dată rândul de celule de-a lungul frontului fisurii se rupe și fisura se extinde pe lungimea unei celule, astfel frontul fisurii avansează cu lungimea unei celule, (figura 2.19).

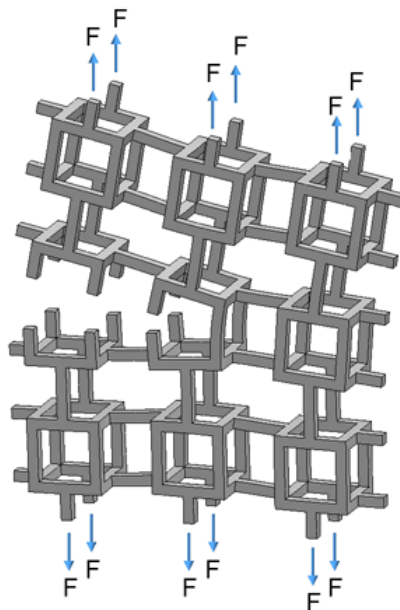


Fig. 2.19. Propagarea unei fisuri printr-o spumă fragilă cu celule deschise

În cazul în care spuma este încărcată, pereții celulei se deformează elastic. Încărcarea este transmisă prin spumă ca un set discret de forțe și momente prin intermediul muchiilor celulei. Aceste forțe și momente pot fi calculate pe baza câmpului de tensiune liniar elastic continuu din vecinătatea fisurii.



O fisură cu lungimea  $2a$  într-un solid celular, creează o tensiune singulară de forma:

$$\sigma = \frac{CK_I^*}{\sqrt{2\pi \cdot r}} = \frac{C\sigma^\infty \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \quad (2.50)$$

unde,  $r$  este distanța până la vârful fisurii,  $C$  este o constantă funcție de geometria corpului fisurat și de solicitare, cu o valoare aproximativ egală cu unitatea (pentru corpuri infinite). Dacă se consideră prima muchie neruptă de lungime  $l/2$  situată dincolo de vârful fisurii, atunci ea este supusă forței:

$$F = \int_0^l \frac{CK_I^*}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot l \cdot dr = \sqrt{2} C \sigma^\infty l^2 \sqrt{\frac{a}{l}} \quad (2.51)$$

Muchiile cedează atunci când momentul de încovoiere, proporțional cu  $Fl$ , depășește momentul de rupere  $M_f = \frac{\sigma_{fs} t^3}{6}$ , sau atunci când tensiunea totală a feței depășește valoarea rezistenței la rupere la tracțiune  $\sigma_{fs}$ . Momentul încovoiator al peretelui celulei este proporțional cu  $Fl$  sau cu  $\sigma^\infty l^3 \sqrt{\frac{a}{l}}$ , dând condiția de rupere scrisă sub forma (Ashby, 1983; Maiti și alții, 1984b)):

$$\sigma^\infty = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\sigma_{fs}}{\sqrt{a/l}} \quad (2.52)$$

Pentru spumele cu celule deschise, densitatea relativă  $\rho^*/\rho_s$  este legată de dimensiunea celulei prin,  $\rho^*/\rho_s = \left(\frac{t}{l}\right)^2$ . Apoi, utilizând ecuația (2.50) obținem:

$$K_{IC}^* = C_8 \sigma_{fs} \sqrt{\pi \cdot l} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} \quad (2.53)$$

unde, ec. (2.53) este pentru spume cu celule deschise, iar  $C_8 = 0.65$  și conține toate constantele de proporționalitate.

Modelul micromecanic prezentat de către Gibson și Ashby se poate utiliza doar pentru determinarea tenacității la rupere pentru Modul I de încărcare, ( $K_{IC}$ ).

#### 2.4.4.2.2. Modelul micromecanic Choi - Shankar (2005)

Choi și Shankar folosesc mecanica ruperii liniar elastică și iau în considerare factorii de intensitate ai tensiunii pentru câmpul de tensiuni de la vârful fisurii pentru o spumă. Ei consideră lungimea fisurii ca fiind egală cu:

$$a = \alpha l \quad (2.54)$$

unde  $\alpha$  - este un coeficient non-dimensional iar  $l$  este mărimea celulei.

Componenta normală a tensiunii de-a lungul fisurii ( $\theta = 0$ ), pentru Modul I de încărcare este următorul:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.55)$$

unde  $r$  este distanța de la vârful fisurii.

Tensiunea produce o forță axială și un moment încovoiător în stratul din vârful fisurii, (figura 2.20), care poate fi asimilat cu distribuția tensiunilor dinaintea fisurii prezentată în figura 2.15.

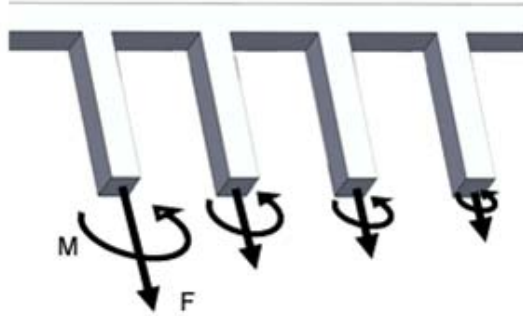


Fig. 2.20. Forțele și momentele fisurii din spumă, după Choi și Sankar (2005).

Forța axială se poate obține prin integrarea pe lungimea efectivă a fisurii:

$$F = l \int_0^a \sigma_{yy} dr = K_I l \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \quad (2.56)$$

În mod similar, momentul încovoiător din vârful fisurii se poate scrie astfel:

$$M = l \int_0^a r \sigma_{yy} dr = K_I l \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{a^{3/2}}{3} \quad (2.57)$$

Presupunând că ruperea stratului se produce atunci când tensiunea maximă (pentru solicitarea combinată de tracțiune și încovoiere), este egală cu rezistența la rupere a materialului,  $\sigma_{fs}$ . Choi și Shankar (2005) determină tenacitatea la rupere  $K_{IC}$ , considerând o solicitare compusă de întindere cu încovoiere și punând condiția că ruperea spumei se produce atunci când tensiunea totală pentru solicitarea compusă atinge valoarea rezistenței la rupere a materialului solid din muchia celulelor:

$$\sigma_{fs} = \sigma_i + \sigma_t = \frac{M \frac{h}{2}}{h^4} + \frac{F}{h^2} = \frac{K_I l}{h^2} \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \left( 1 + 2 \frac{a}{h} \right) \quad (2.58)$$

rezultând:

$$K_{IC} = \sigma_{fs} \frac{h^2}{l} \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \frac{1}{\left( 1 + 2 \frac{a}{h} \right)} \quad (2.59)$$

înlocuind  $a = a \cdot l$ , obținem:

$$K_{IC} = \sigma_{fs} \frac{h^2}{l^2} \sqrt{l} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{a} \left( 1 + 2a \frac{l}{h} \right)} \quad (2.60)$$

În mod similar tensiunea tangențială pentru Modul II de rupere poate fi

exprimată astfel:

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.61)$$

Forța tangențială pe o distanță efectivă  $a$ , poate fi scrisă astfel:

$$F = l \int_0^a \tau_{xy} dr = K_{II} l \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \quad (2.62)$$

Momentul încovoiator maxim în elementul din vârful fisurii este produs de către forța  $F$  având un braț egal cu  $l/2$ :

$$M = F \frac{l}{2} = K_{II} \frac{l^2}{2} \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \quad (2.63)$$

Tensiunea maximă la încovoiere este:

$$\sigma_i = \frac{M}{\frac{h^3}{6}} = 3K_{II} \frac{l^2}{h^3} \sqrt{\frac{2a}{\pi}} = \sigma_{fs} \quad (2.64)$$

Tenacitatea la rupere pentru Modulul II de încărcare se poate scrie astfel:

$$K_{IIC} = \sigma_{fs} \frac{h^3}{3l^2} \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \quad (2.65)$$

considerând  $a = a \cdot l$ , rezultă:

$$K_{IIC} = \sigma_{fs} \frac{h^3}{3l^2} \sqrt{\frac{\pi}{2al}} = \sigma_u \frac{h^3}{3l^{3/2}} \sqrt{\frac{\pi}{2a}} \quad (2.66)$$

#### 2.4.4.2.3. Modelul micromecanic Choi - Lakes (1996)

Un alt model a fost propus de către Choi și Lakes (1996), care au considerat că din cauza deformațiilor plastice la vârful fisurii, câmpul de tensiuni din jurul fisurii pentru o spumă nu este singular. Câmpul de tensiuni din jurul fisurii, cu lungimea de  $2a$  și raza la vârful fisurii  $r_{tip}$ , la distanța  $r > r_{tip}$ , este:

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r_{tip}}{2r} \right) \quad (2.67)$$

Forța produsă în primul strat nerupt este:

$$F = \int_{r_{tip}/2}^{r_{tip}/2+h} \left[ \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r_{tip}}{2r} \right) \right] r_{tip} dr \quad (2.68)$$

Pentru un tetracaidecaedru regulat cu mărimea celulei  $l$ , raza la vârf este  $r_{tip} = \sqrt{2} l$ .

Integrând ecuația (57) obținem:

$$F = 2.38K_I l \sqrt{\frac{l}{\pi}} \left( \frac{h}{l} \right) \quad (2.69)$$

Considerând că tensiunea maximă la încovoiere atinge valoarea rezistenței

la rupere a solidului, rezultă:

$$K_{IC} = 0.20 \sigma_{fs} \sqrt{\pi l} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \quad (2.70)$$

Pentru un tetracaidecaedru regulat care prezintă următoarea relație între densitatea relativă și dimensiunile celulei:

$$\left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) = 1.06 \left( \frac{h}{l} \right)^2 \quad (2.71)$$

se poate scrie că tenacitatea la rupere va fi egală cu:

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_{fs} \sqrt{\pi l}} = 0.19 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right). \quad (2.72)$$

#### 2.4.4.2.4. Modelul micromecanic Green (1985)

O corelare similară a fost propusă de către Green (1985):

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_{fs} \sqrt{\pi l}} = 0.28 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.3} \quad (2.73)$$

Toate modelele micromecanice prezentate mai sus permit determinarea tenacității la rupere a spumelor cunoscând rezistența la rupere a materialului solid din care este fabricată spuma și parametrii microstructurii: lungimea celulei și densitatea relativă.

Capitolului 2 prezintă comportamentul spumelor la diferite solicitări ținând cont de structura și proprietățile de material din care sunt realizați pereții celulelor. În acest sens s-au sintetizat metodele analitice de determinare a proprietăților mecanice ale spumelor, respectiv mecanismele de deformare în spume și modelele micromecanice utilizate pentru caracterizarea materialelor celulare.

S-au prezentat ecuațiile aferente fiecărei zone din curba tensiune-deformație (zona liniar-elastică, zona de platou și densificarea). Ținând cont de tipul spumei cât și de faptul că spumele pot fi solicitate atât la tracțiune cât și la compresiune, aceste ecuații sunt dezvoltate atât pentru spume cu celule deschise cât și pentru spume cu celule închise.

S-a realizat o trecere în revistă a principalelor modele micromecanice utilizate pentru determinarea tenacității la rupere. În acest sens s-au studiat mai multe modele micromecanice, printre care: Modelul micromecanic Gibson-Ashby, Modelul micromecanic Choi-Sankar, Modelul micromecanic Choi-Lakes și Modelul micromecanic Green.

### **3. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR MECANICE ALE SPUMELOR POLIURETANICE**

#### **3.1. Considerații generale**

Caracterizarea experimentală a materialelor celulare este un subiect evaziv, datorită faptului că s-a aflat într-o continuă evoluție. Odată cu dezvoltarea de noi materiale celulare și apariția de noi aplicații, și tehnicile de testare a acestor materiale au înregistrat o continuă evoluție. Această evoluție a metodelor de testare pentru a răspunde noilor cerințe, a continuat de-a lungul timpului cu aspecte suplimentare și totodată au crescut în importanță, de exemplu, influența densității, temperaturii, vitezei de încărcare, planului de formare, umidității și a altor factori care afectează durabilitatea.

Așa cum se știe, odată cu intrarea în secolul 21 s-a înregistrat o accentuare a aplicării tuturor tipurilor de materiale celulare în obținerea de noi produse comerciale. Ca o anticipare a acestei evoluții, începând cu anii '90 a urmat o perioadă de înțelegere și consolidare a metodelor de încercare a materialelor celulare. Având în vedere acest lucru, prezenta teză de doctorat vine într-un moment oportun, în care evoluția metodelor de testare este într-o perioadă relativ stabilă și pot fi aduse recomandări definitive, [Chinca (2010)].

Materialele celulare de tipul spumelor poliuretanică rigide sunt utilizate sub formă de panouri de tip sandwich (Capitolul 6), în industria aerospațială, constructoare de mașini, construcțiilor și în multe alte aplicații. Această utilizare largă este dată de structura lor celulară care prezintă capacități deosebite de absorbție a energiei de impact și de asemenea au o greutate relativ redusă comparativ cu alte materiale care prezintă aceleași caracteristici mecanice. Energia este disipată prin celulele încovoiate, flambate sau rupte dar tensiunea este în general limitată de un platou mare care se observă în diagrama tensiune-deformație. Acest comportament explică eficiența acestor materiale celulare.

Analiza experimentală prezentată în acest capitol s-a realizat pe spume poliuretanică rigide. Pentru determinarea comportamentului acestor spume s-au folosit 11 tipuri diferite de spume, având 11 densități diferite. Spumele au fost obținute din diferite surse, sub formă de plăci sau panouri de tip sandwich. De asemenea, în colaborare cu firme specializate în acest domeniu s-au procurat cele două componente chimice (poliol și poliisocianat - a se vedea Capitolul 1), și s-au realizat spume cu diferite densități.

Trebuie menționat faptul că pentru cele 11 densități obținute nu se cunosc proprietățile de Mecanica Ruperii și nici comportamentul acestora la diferite variații amintite mai sus, (temperatură, viteză de încărcare, direcția planului de formare, etc.). Acești parametri sunt foarte importanți în proiectarea și dezvoltarea produselor realizate, [Cernescu (2009)]. Cele 11 spume au fost analizate după un program de încercări special stabilit pentru scopul acestei lucrări și a cărui schemă de principiu este prezentată în figura 3.1.

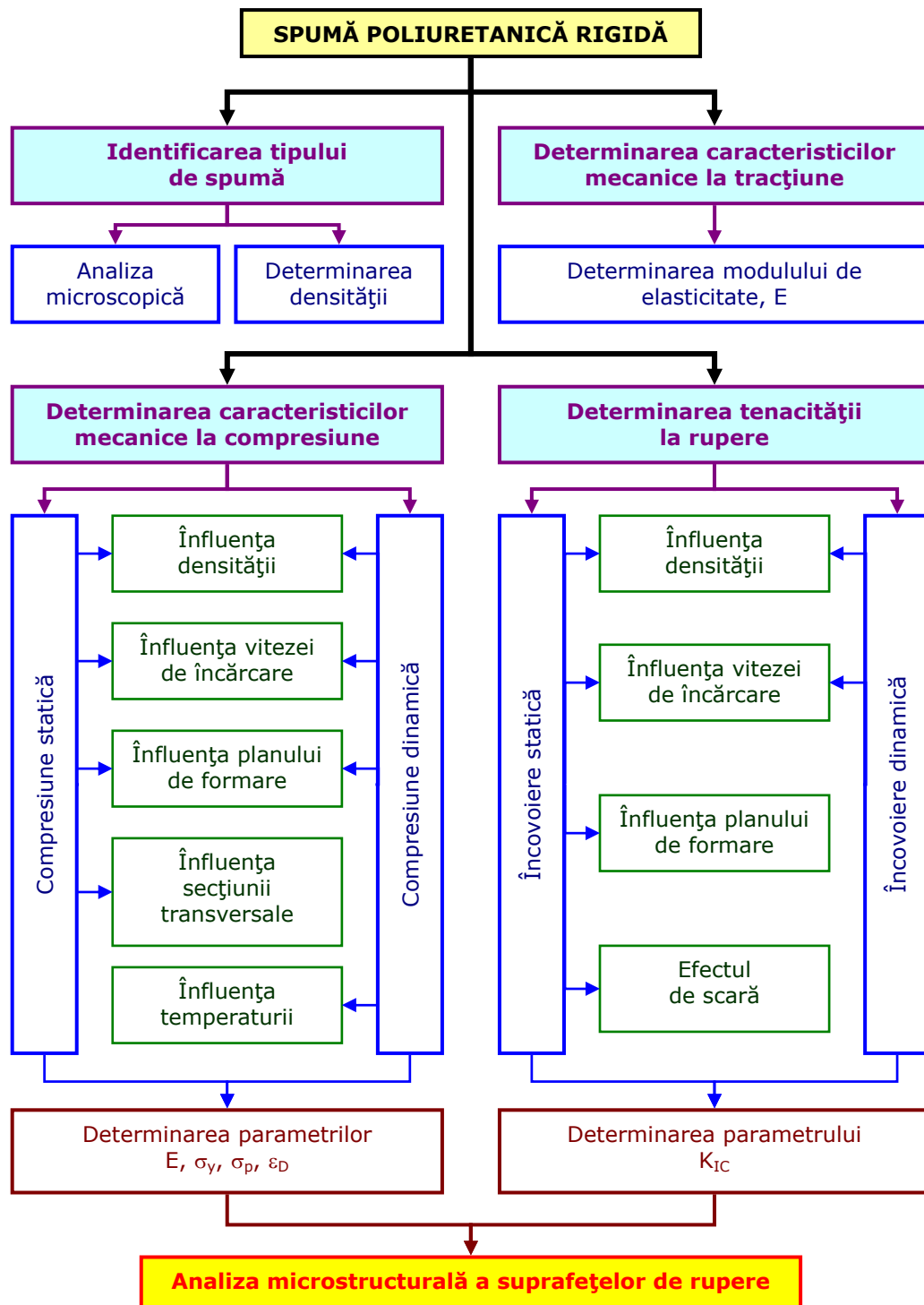


Fig. 3.1. Schema de principiu a programului experimental

### 3.2. Identificarea tipului de spumă

Pentru identificarea tipului de spumă utilizat s-au realizat următoarele analize:

- determinarea densității;
- analiza microscopică.

#### 3.2.1. Determinarea densității

Pe baza celor prezentate, din materialele studiate, (plăci din spumă poliuretanică), s-au prelevat probe în vederea stabilirii densității. Densitatea s-a determinat conform ASTM D 1622-03 Metode Standard de Testare a Densității Aparente a Plasticelor Celulare Rigide, [ASTM D 1622-03].

Densitatea, (sau mai exact densitatea de masă, numită și masă specifică) este o mărime fizică folosită pentru descrierea materialelor și definită ca masa unității de volum. Astfel, densitatea unui corp este egală cu raportul dintre masa și volumul său. Densitatea se notează de obicei cu litera grecească  $\rho$  (ro) sau cu inițiala cuvântului, litera d.

Relația de calcul a densității este următoarea:

$$\rho = \frac{m}{V} = m \times V^{-1} \quad (3.1)$$

În cazul corpurilor cu formă geometrică regulată (paralelipiped, cilindru etc.) se mai poate folosi formula:

$$\rho = \frac{m}{V} = m \times V^{-1} = m \times (k \times l^{-3}) \quad (3.2)$$

unde, k este coeficientul volumic al formei geometrice respective, iar  $l^{-3}$  este inversul produsului lungime x lățime x înălțime a corpului.

Unitatea de măsură a densității în SI (Sistemul Internațional de Măsurări și Greutăți) este raportul dintre unitatea de măsură a masei (kilogram) și unitatea de măsură a volumului (metru la puterea a treia, sau metrul cub), deci este kilogram pe metru cub,  $\text{kg/m}^3$ .

$$\langle \rho \rangle = \langle d \rangle = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1 \text{ kg} \times \text{m}^{-3} \quad (3.3)$$

Alte unități folosite sunt gramul pe centimetru cub ( $\text{g/cm}^3$ ), kilogramul pe litru ( $\text{kg/L}$ ) etc.

Dimensional, densitatea se poate scrie sub forma monomului  $M \times L^{-3}$  (dimensiunea masei, M, înmulțită cu puterea a treia negativă a dimensiunii lungimii L, sau altfel exprimat, dimensiunea masei, M, împărțită la puterea a treia a dimensiunii lungimii L):

$$[\rho] = [d] = M \times L^{-3} = \frac{M}{L^3} \quad (3.4)$$

Densitatea se poate măsura cu picnometrul, cu densimetrul (areometru), cu balanța, (folosind forța lui Arhimede), cântarul sau la fluide în curgere pe fluxuri industriale cu debitmetrul Coriolis.

În cazul de față, pentru determinarea greutății probelor s-a folosit un cântar electronic de laborator, (figura 3.2), foarte precis, ( $10^{-4}$  g).

Volumul probelor s-a determinat prin măsurarea celor trei dimensiuni cu ajutorul unui șubler cu precizie de 0.01 mm.



Fig. 3.2. Cântar de laborator pentru determinarea greutateii probelor

Condițiile pentru eșantionul de testare au fost cele de laborator: temperatura  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , [ $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ], respectiv umiditatea relativă  $50 \pm 5\%$ , cu cel puțin 24 de ore înainte de testare. Numărul de probe utilizat a fost de 5 pentru fiecare densitate. Pentru fiecare dimensiune s-au făcut câte trei măsurători.

Densitatea este o mărime locală (intensivă), în sensul că densitatea unui corp poate diferi de la un loc la altul și nu depinde de poziția de măsurare în cadrul corpului. Corpurile realizate din substanțe omogene au aceeași densitate indiferent de punctul în care se face măsurarea; la un astfel de corp prin divizare se obțin corpuri care prezintă aceeași densitate.

Volumul substanțelor, și ca urmare și densitatea, depinde de temperatură și de presiune. La substanțele lichide și mai ales la cele solide această dependență e slabă. În schimb gazele prezintă variații mari ale densității cu temperatura și presiunea.

Densitatea este importantă în acele situații în care corpurile de densități diferite se comportă diferit sau trebuie manipulate diferit, ori în care cunoașterea densității poate servi la efectuarea unor operații.

De exemplu, plutirea unui corp solid la suprafața unui lichid este determinată de relația dintre densitățile celor două substanțe: cele mai multe tipuri de lemn plutesc pe apă, dar cele mai multe tipuri de metal se scufundă (ambarcațiunile de metal nu se scufundă pentru că nu sunt masive, ci înglobează și aer, încât densitatea lor medie este mai mică decât a apei).

### 3.2.2. Analiza microstructurală a spumelor înainte efectuării testelor

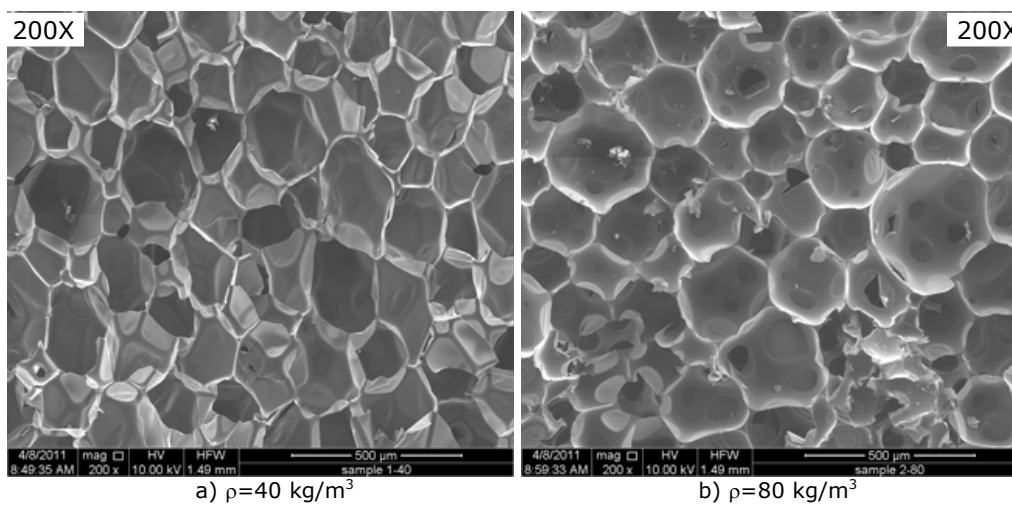
Analiza microstructurală a materialelor utilizate s-a realizat atât în Laboratorul Universității din Lublin cât și în Laboratorul Catedrei SMS din cadrul Departamentului de IMF (Ingineria Materialelor și Fabricației) a Facultății de Mecanică din cadrul Universității „Politehnica” Timișoara. Aparatura utilizată pentru caracterizarea microstructurală a constat din microscopul electronic cu baleiaj prezentat în figura 3.3, [Linul și Marșavina (2011c), Linul și alții (2011b)].



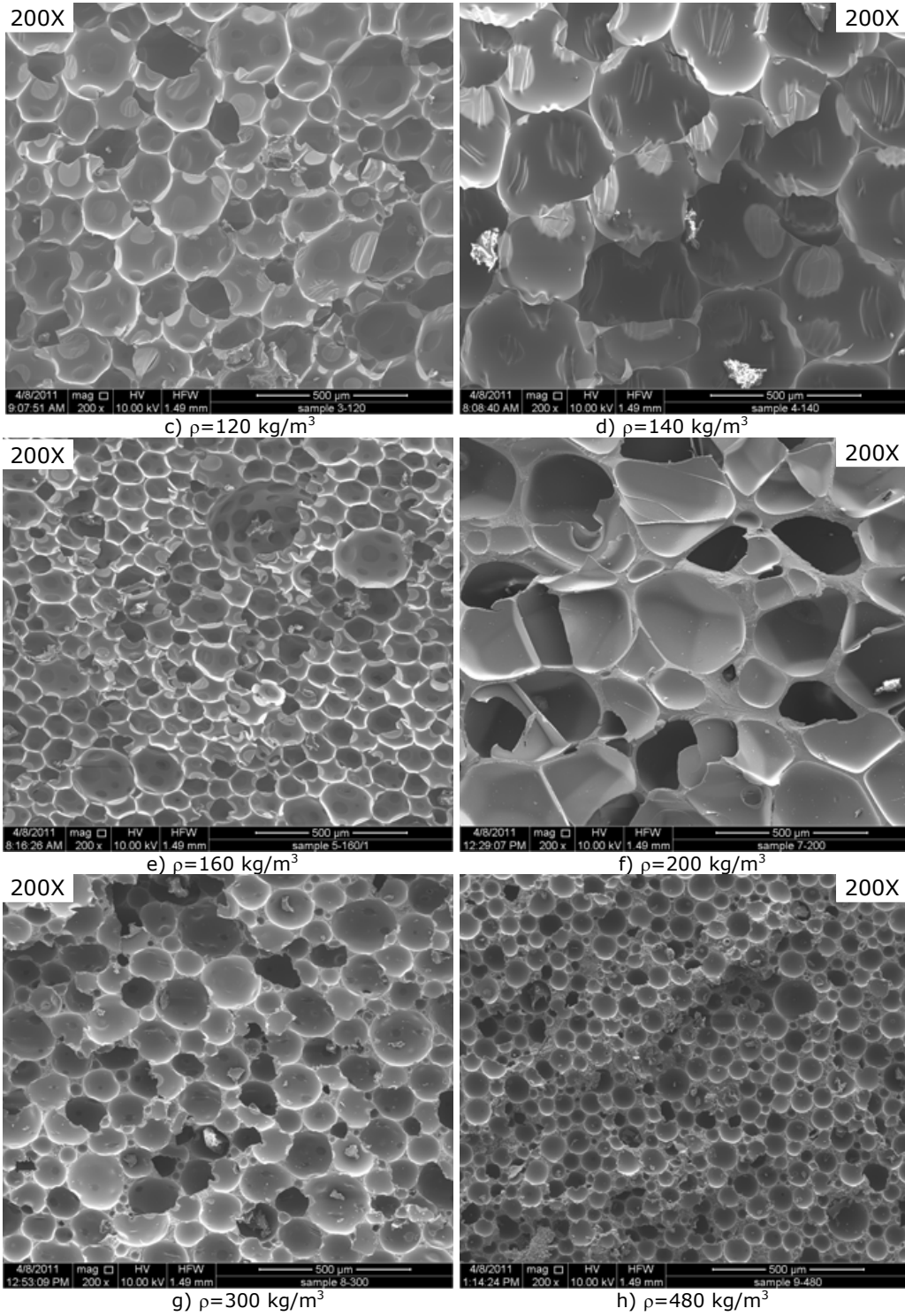


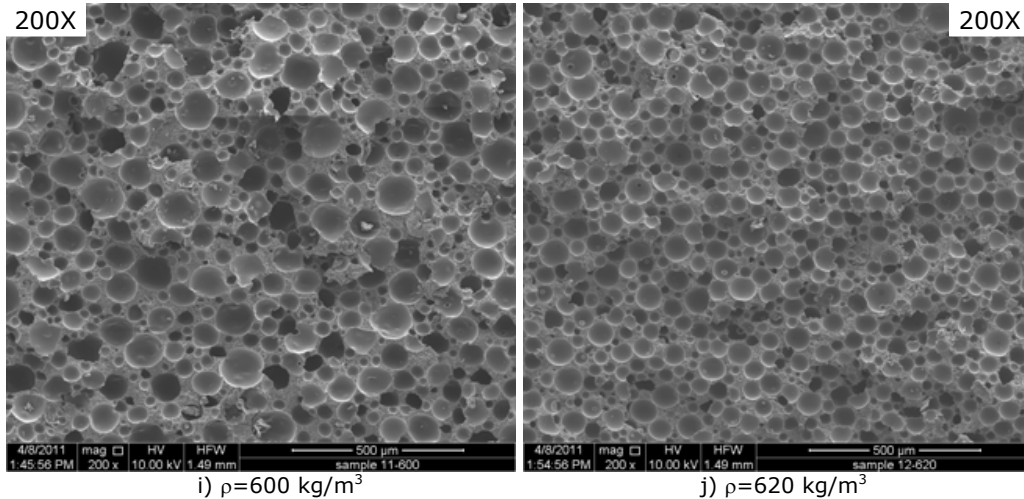
Fig. 3.3. Microscopul electronic cu baleiaj pentru analiza microstructurală

În figura 3.4 este prezentată structura celulară pentru spumele utilizate în cadrul programului experimental. Pentru a se putea fi comparabile și pentru a se putea observa cât mai ușor diferențele între forma și mărimea celulelor, s-a folosit aceeași magnitudine de 200X.



112 Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale PUR – 3





i)  $\rho=600 \text{ kg/m}^3$  j)  $\rho=620 \text{ kg/m}^3$   
 Fig. 3.4. Analiza microstructurală (SEM) a spumelor poliuretanicе rigide utilizate în cadrul programului experimental

### 3.3. Determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune

Cele mai multe încercări experimentale pentru determinarea proprietăților spumelor s-au efectuat pentru solicitările de întindere și compresiune. Comportamentul la compresiune al spumelor este foarte important. Studii privind proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanicе rigide sunt extinse și au fost bine documentate.

Determinarea caracteristicilor mecanice pentru materialele studiate s-a făcut prin încercări de compresiune, pe probe cubice. Forma și dimensiunile probelor utilizate sunt prezentate în figura 3.5. Datele din tabele sunt trecute conform acestor notații din figura de mai jos.

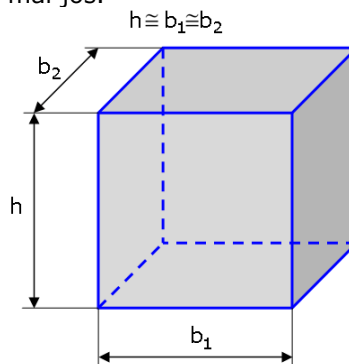


Fig. 3.5. Forma și dimensiunile probelor pentru încercările de compresiune

Încercările mecanice de compresiune ale spumelor s-au realizat în două regimuri:

- regim static;
- regim dinamic.

### 3.3.1. Determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune în regim static

În ultimii ani s-au făcut multe eforturi pentru caracterizarea diferitelor tipuri de spume în diferite condiții de încărcare. Avalle și alții, (2001) a prezentat o procedură de optimizare în scopul identificării parametrilor micromecanici rezultați în urma testelor de compresiune pentru diferite tipuri de spume. Influența densității și mărimea umplerii au fost de asemenea investigate în Avalle și alții, (2007).

#### 3.3.1.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate

Încercările experimentale s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor "Ștefan Nădășan", aflat în dotarea Catedrei de Rezistența Materialelor din cadrul Departamentului de MRT (Mecanică și Rezistența Materialelor) a Facultății de Mecanică din cadrul Universității „Politehnica” Timișoara. Testele s-au făcut la temperatura camerei, ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ), pe o mașină pentru încercări statice și de oboseală Walter Bay de 10 kN (figura 3.6), având două plăci întinse, una atașată bazei fixe a mașinii de testat și cealaltă bacului mobil. Aceste plăci sunt mai mari decât suprafața de încărcare a epruvetei pentru a asigura o distribuție uniformă a solicitării, [Linul și alții (2010a)].



Fig. 3.6. Imagine de ansamblu a mașinii de încercat, Walter Bay de 10 kN

Pentru caracterizarea comportamentului mecanic la solicitările de compresiune spumele poliuretanică rigide utilizate în programul experimental au avut următoarele densități: 40, 80, 120, 140 și 200 kg/m<sup>3</sup>. Forma constructivă a epruvetelor utilizate este arătată în figura 3.7. De asemenea, tot în figura 3.7 este prezentată o comparație a epruvetelor între forma inițială, nedeformată, (înainte de încărcare) și cea finală, deformată, (după încărcare).

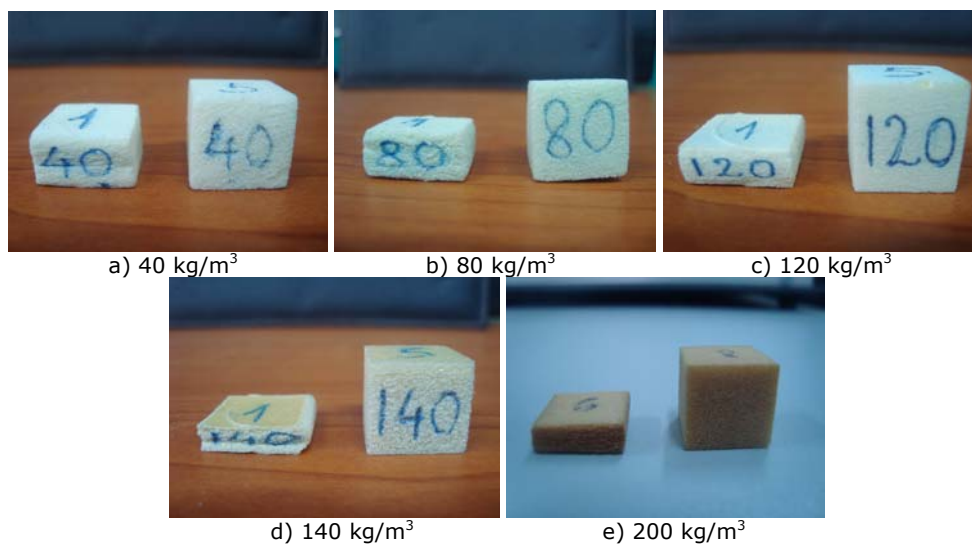


Fig. 3.7. Epruvetele utilizate în cadrul încercărilor experimentale de compresiune

Probele au fost supuse unei compresiuni uniaxiale la o viteză de încărcare de 2 mm/min, excepție făcând probele pentru determinarea influenței vitezei de încărcare, unde s-au utilizat viteze de încărcare diferite: 1, 5, 10 respectiv 20 mm/min.

Pentru fiecare tip de încercare s-au folosit câte 5 epruvete, iar conform standardului ASTM D1621-00 (Metode Standard de Testare a Proprietăților la Compresiune pentru Plasticele Celulare Rigide), s-a ținut cont de faptul că marginile încărcate ale epruvetelor să fie paralele una față de cealaltă și perpendiculare pe muchiile laterale. De asemenea este foarte important ca epruveta supusă testării să fie așezată în centrul plăcii fixe.

### 3.3.1.2. Definirea proprietăților și determinarea lor experimentală

Curba tensiune-deformație la compresiune pentru un solid celular adesea poate fi simplificată în trei zone: o zonă liniar-elastică; o zonă de platou și densificarea, [Gibson și Ashby (1988)]. Aceste trei zone sunt prezentate în figura 3.8 pentru diferite tipuri de materiale celulare, urmând ca în continuare să se explice cele trei zone pe o spumă utilizată în cadrul programului experimental de compresiune, [Li și alții (2006)].

Pentru o înțelegere mai ușoară a comportamentului acestor materiale se va face o scurtă definiție și modul de determinare a principalelor caracteristici mecanice determinate în cadrul încercărilor experimentale de compresiune statică.

Principalii parametri studiați la compresiune sunt:

- modulul de elasticitate;

- tensiunea la curgere;
- tensiunea de platou;
- densificarea.

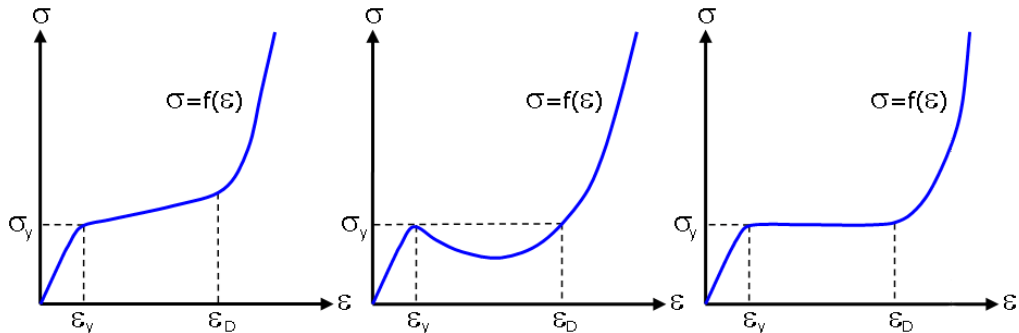


Fig. 3.8. Tipuri de curbe tensiune-deformație la compresiune pentru materialele celulare: a) curba cu caracteristica de întărire; b) curba cu caracteristica de înmuiere; c) pentru probe cu palier orizontal.

În figura 3.9 este prezentată curba caracteristică tensiune-deformație pentru o spumă poliuretanică obținută în urma încercărilor experimentale de compresiune. Această figură va fi folosită pentru definirea parametrilor amintiți mai sus.

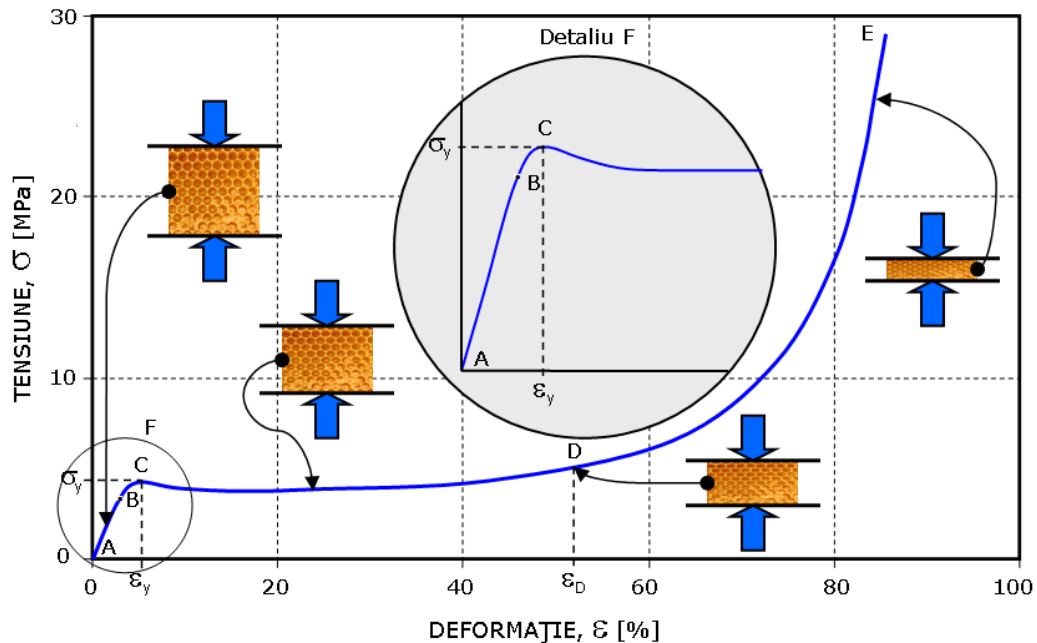


Fig. 3.9. Curba tensiune-deformație pentru o spumă poliuretanică prezentată în detaliu pentru definirea parametrilor studiați

Pe această curbă prezentată în figura de mai sus sunt evidențiate detaliat zonele caracteristice care descriu direct sau indirect determinarea parametrilor amintiți mai sus.

3.3.1.2.1. Modulul de elasticitate,  $E$  [MPa]

Modulul de elasticitate – este o măsură a rigidității pentru un material elastic și izotrop. Acesta este definit ca și raport între tensiunea și deformația uniaxială, unde este respectată legea lui Hooke și poate fi determinat experimental cu ajutorul pantei curbei tensiune-deformație din zona liniar-elastică, [Linul și Marșavina (2011a)].

Relația de calcul a modulului de elasticitate este dată de următoarea relație:

$$E \equiv \frac{\text{tensiune}}{\text{deformație}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L} \quad (3.5)$$

unde :

$E$  – modulul de elasticitate;

$F$  – forța aplicată asupra epruvetei;

$A_0$  – aria inițială a secțiunii transversale asupra căreia se aplică forța  $F$ ;

$\Delta L$  – alungirea epruvetei;

$L_0$  – lungimea inițială a epruvetei.

Unitatea de măsură a modulului de elasticitate în SI este Pascalul [Pa sau  $N/m^2$  sau  $m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$ ]. Unitățile practice utilizate sunt Megapascalul, (MPa sau  $N/mm^2$ ) sau Gigapascalul [GPa sau  $kN/mm^2$ ].

Modulul de elasticitate calculează schimbarea în dimensiune a unei epruvete realizată dintr-un material izotrop elastic sub încărcări de tracțiune sau compresiune, ajutând totodată la alegerea materialelor pentru anumite aplicații particulare.

Pentru mai multe materiale, modulul de elasticitate este în general constant într-un anumit interval de deformații. Aceste materiale sunt numite liniare și se spune ca respectă legea lui Hooke. Ca și exemple de materiale liniare pot fi amintite: oțelurile, fibrele de carbon, sticlele, etc. În cadrul materialelor non-liniare poate fi amintit cauciucul, excepție făcând la deformații foarte mici.

De asemenea, modulul de elasticitate nu este întotdeauna același în toate direcțiile. Cele mai multe metale și ceramice, împreună cu multe alte materiale sunt izotrope, rezultând că proprietățile lor mecanice sunt aceleași în toate direcțiile. Anizotropia poate fi observată foarte ușor în multe compozite. De exemplu compozitele armate cu fibre de carbon prezintă un modul mult mai mare, (sunt mult mai rigide), dacă este încărcată paralel cu fibrele, (de-a lungul lor). De asemenea, în această categorie mai pot fi incluse și unele spume, lemnul, betonul armat, etc., inginerii putând folosi acest fenomen direcțional în avantajul lor.

3.3.1.2.2. Tensiunea la curgere,  $\sigma_y$ , [MPa]

Tensiunea la curgere – este definită ca primul punct din curba tensiune-deformație care prezintă o creștere în deformație fără o creștere a tensiunii (punctual B din figura 3.9), [ASTM D1621-00, EN ISO 527-1].

Cunoașterea punctului de curgere este vitală în momentul proiectării unui component deoarece el reprezintă, în general, o limită superioară pentru încărcarea care poate fi aplicată. De asemenea, acest punct de curgere este important pentru controlul mai multor tehnici de producție a materialelor, cum ar fi: forjarea, laminarea sau presarea.

În cadrul ingineriei structurale, limita de curgere caracterizează un mod de degradare lent, care de cele mai multe ori nu duce la o rupere cu rezultate catastrofale sau la o rupere fragilă.

### 3.3.1.2.3. Tensiunea de platou, $\sigma_{pl}$ [MPa]

Tensiunea de platou – este dată de o creștere a deformației la o tensiune aproape constantă, [Gibson și Ashby (1997), Tu și alții (2001)]. Pentru cele mai multe tipuri de spume, zona de platou începe de la o deformație la curgere,  $\varepsilon_Y$ , sau tensiune la curgere,  $\sigma_Y$ , reprezentând inițierea unui nou mecanism de deformare a peretelui celulei sau ruperea peretelui celulei, și se termină la o deformație critică,  $\varepsilon_D$ , reprezentând începutul densificării, (figura 3.9), [Li și alții (2006)].

### 3.3.1.2.4. Densificarea, $\varepsilon_D$ , [%]

Dacă se continuă încărcarea depășind zona de platou, pereții celulelor vor intra în contact unii cu alții. Materialul celular este complet compact în momentul în care deformația atinge o densificare completă  $\varepsilon_D$ , producând o creștere a pantei în curba tensiune-deformație.

Deformația la densificare este o deformație critică care poate fi exprimată în general funcție de densitatea relativă, [Gibson și Ashby (1997), Marșavina și alții (2008)]:

$$\varepsilon_D = f\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (3.6)$$

unde  $\rho^*$  este densitatea spumei, iar  $\rho_s$  este densitatea solidului din care este realizată spuma. Pentru  $\varepsilon \geq \varepsilon_D$ , proprietățile la compresiune ale spumei sunt dominate de către proprietățile la compresiune ale materialului din care este făcută spuma.

O explicare mai detaliată a determinării densificării va fi prezentată în cele ce urmează în paralel cu prelucrarea datelor experimentale.

## 3.3.1.3. **Rezultate experimentale obținute**

Pentru încercările de compresiune statice s-a analizat influența principalilor factorii care stau la baza alegerii spumelor poliuretanică în aplicațiile practice.

Factorii care influențează comportamentul spumelor sunt reprezentați de:

- influența densității;
- influența vitezei de încărcare ;
- influența planului de formare;
- influența secțiunii transversale.

### 3.3.1.3.1. Determinarea densificării

În orice aplicație care implică absorbția de energie, atât începutul deformației la densificare cât și densificarea în sine joacă un rol foarte important. Este necesar să se utilizeze precis și clar metodele existente pentru determinarea acestor parametrii. Metodele pentru determinarea deformației la densificare, în conformitate cu Gibson și Ashby (1988), se bazează pe faptul că există o limită de deformație, la care curba tensiune-deformație are un modul mare tangent care este de același ordin ca și modulul de elasticitate al materialului peretelui celulei. Există mai multe metode pentru determinarea începutului deformației la densificare.



Începutul deformației la densificare și deformația la densificare corespund la diferite niveluri de interacțiune între celule, și, prin urmare, la puncte diferite pe curba tensiune-deformație. Cele mai multe publicații nu fac distincție între aceste două tipuri, de exemplu, deformația la densificare este frecvent utilizată atunci când ar trebui să fie utilizată începutul deformației la densificare. De exemplu, în Capitolul 11 din Ashby și alții (2000), deformația la densificare are sensul evident de începutul deformației la densificare (a se vedea figura 11.1(b) din Ashby și alții (2000)). Există multe alte exemple de confuzie între deformația la densificare și începutul deformației la densificare, care nu sunt enumerate aici. Dar, trebuie menționat faptul că termenul "deformația la densificare" și metodele ei de determinare ar trebui descrise mult mai precis.

Începutul deformației la densificare al spumelor poate fi determinat prin mai multe metode, [Linul și Marșavina (2011a), Linul și alții (2011a)]:

➤ Metoda I – Începutul deformației la densificare este definit de intersecția tangențelor dintre zona de platou și zona densificării, [Nieh și alții (2000), Paul și Ramamurty (2000) și Chan și Xie (2003)].

➤ Metoda II – Începutul deformației la densificare este definit de ultima deformație minimă locală înainte de creșterea semnificativă a tensiunii, [Vural și Ravichandran (2003)].

➤ Metoda III – Începutul deformației la densificare este definit ca deformația la care panta tangentei este egală cu cea a zonei liniar-elastice, [Chan și Xie (2003)].

Există mari incertitudini în determinarea începutului deformației la densificare cu aceste metode sau cu altele nementionate, deoarece acestea pot introduce erori substanțiale în momentul în care sunt folosite pentru proiectarea și modelarea comportamentului materialelor și structurilor celulare.

Un parametru al eficienței energetice pentru identificarea stării de absorbție a energiei optime în spume este utilizat de către Avalor și alții (2001). Această eficiență de absorbție a energiei este definită de ecuația următoare:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \cdot \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon \quad (3.7)$$

Această relație este obținută pe baza curbei uniaxiale tensiune-deformație pentru un material celular. Pentru o probă realizată dintr-un material anizotrop, valoarea eficienței de absorbție a energiei depinde de direcția în care se obține curba tensiune-deformație. Eficiența de absorbție a energiei pentru determinarea reprezentativă a deformației la densificare este utilizată de către Tan și alții (2002):

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_D} = 0 \quad (3.8)$$

la care eficiența de absorbție a energiei atinge un maxim pe curba eficiență energetică - deformație. Un exemplu tipic de curbe tensiune-deformație pentru o spumă poliuretanică și respectiv curbele corespunzătoare eficienței de absorbție a energiei funcție de deformație sunt prezentate în figura 3.10.

Această metodă este adoptată în cazul acestei lucrări pentru definirea începutului deformației la densificare, atunci când definiția eficienței de absorbție a energiei din ecuația (3.7) se înlocuiește cu:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \cdot \int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon \quad (3.9)$$

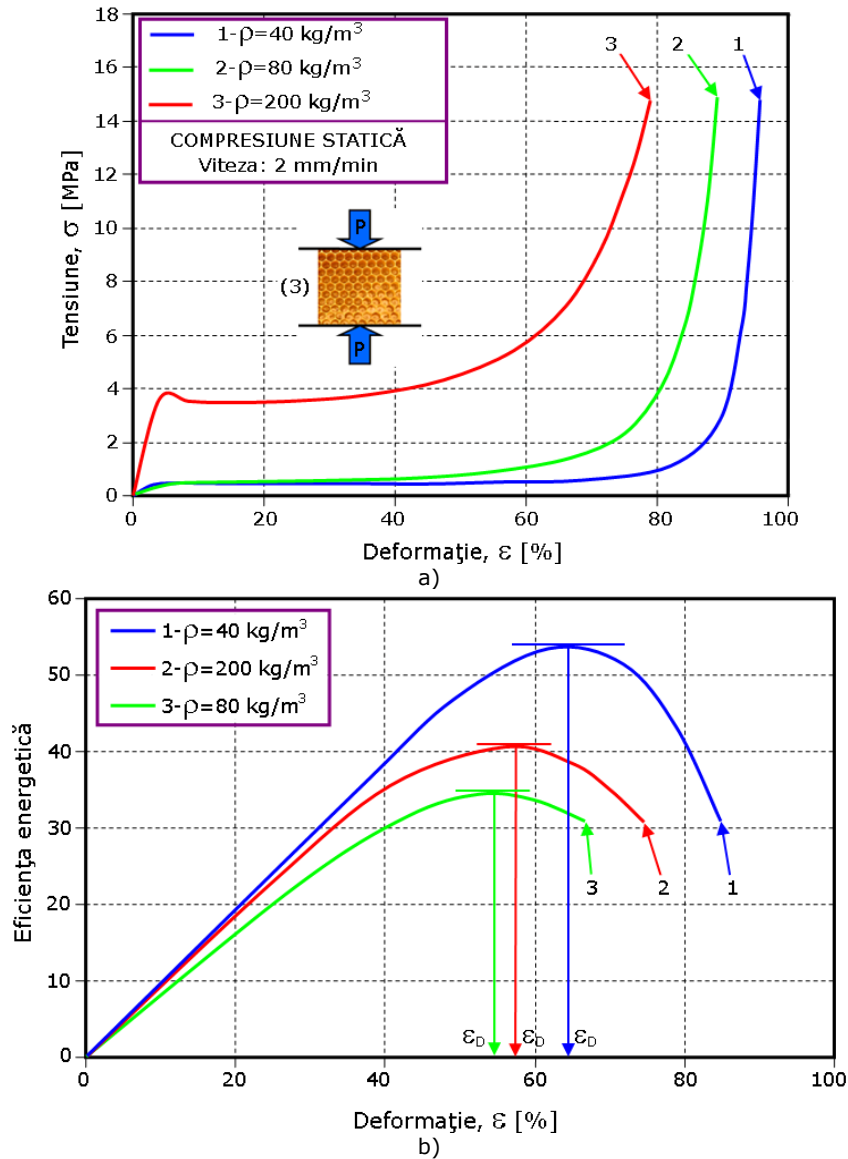


Fig. 3.10. Spumă poliuretanică (40, 80 și 200  $\text{kg/m}^3$ ): a) Curbele uniaxiale tensiune-deformație la compresiune; b) Curbele eficiența energetică - deformație.

Metoda amintită mai sus este, de asemenea, aplicabilă în momentul în care influența vitezei de încărcare devine importantă, deși numai rezultatele cvasi-stactice sunt utilizate pentru verificarea metodei amintite.

### 3.3.1.3.2. Influența densității

În urma efectuării încercărilor de compresiune statică s-au determinat caracteristicile mecanice ale spumelor studiate. Valorile medii ale acestor caracteristici sunt prezentate în Tabelul 3.1., iar în Tabelul A.1 din Anexe sunt

prezentate toate valorile pentru fiecare încercare. Rezultatele au fost obținute în urma unei încărcări perpendiculare pe planul de formare la o temperatură de 20°C.

Tabelul 3.1. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de densitate

Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea de curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
	h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	12.78	12.78	12.66	(3)	4.20	0.38	0.39	65.53
80	15.08	14.90	14.84		7.90	0.48	0.51	54.57
120	15.42	15.28	15.22		18.37	0.89	0.93	54.31
140	14.02	12.06	12.04		34.11	1.05	1.21	54.47
200	11.76	11.72	11.72		121.99	4.14	3.86	55.75

De asemenea, din datele furnizate de mașina de încercat, s-au trasat diagramele caracteristice convenționale pentru epruvetele încercate,  $F = f(\Delta l)$  [Cernescu (2009), Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a)].

În figura 3.11 este prezentată o comparație a curbelor tipice tensiune-deformație pentru toate cele 5 densități ale sumei poliuretanică.

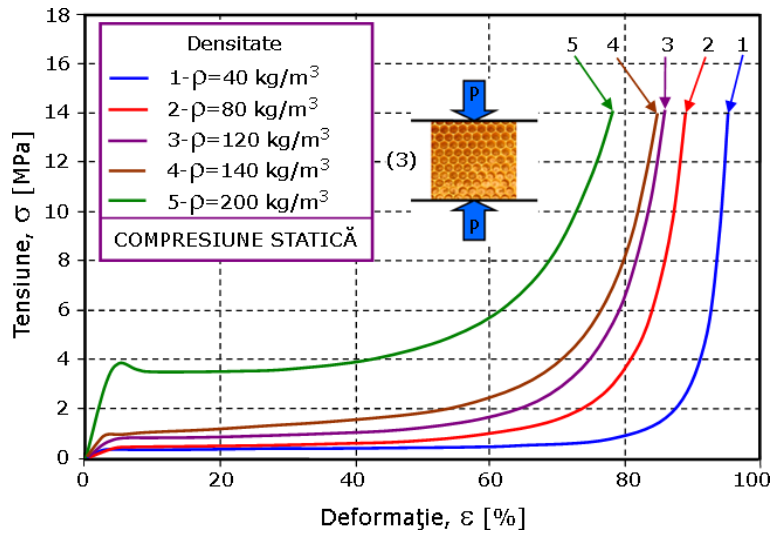


Fig. 3.11. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența densității

De pe această diagramă se poate observa foarte ușor că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în comportarea mecanică la compresiune a materialelor celulare.

De pe diagrama tensiune-deformație se pot identifica următoarele zone:

- prima parte a curbei prezintă **o zonă liniar-elastică** până la curgere, o mică scădere în tensiune după curgere (pentru spuma cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ );
- **o zonă de platou** după curgere care poate prezenta atât o variație constantă, cu pantă egală cu zero, cât și o variație liniară, prezentând o anumită pantă diferită de zero, dar pozitivă;
- o zonă la sfârșitul curbei în care are loc o creștere semnificativă a tensiunii la o deplasare aproape constantă, care poartă numele de **densificare**.

Aceste zone sunt prezentate detaliat în Capitolul 4, aici fiind doar amintite.

### 3.3.1.3.3. Influența vitezei de încărcare

Tabelul 3.2 prezintă valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune pentru o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , funcție de viteza de încărcare, iar Tabelul A.2 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare.

Tabelul 3.2. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de viteza de încărcare

Densitate [ $\text{kg/m}^3$ ]	Dimensiunile probelor			Viteza de încărcare [ $\text{mm/min}$ ]	Modulul de elasticitate [ $\text{MPa}$ ]	Tensiunea de curgere [ $\text{MPa}$ ]	Tensiunea de platou [ $\text{MPa}$ ]	Densificarea [%]
	h [ $\text{mm}$ ]	$b_1$ [ $\text{mm}$ ]	$b_2$ [ $\text{mm}$ ]					
140	13.2	13.6	13.6	1	18.94	1.01	1.16	50.71
	13.6	13.6	13.8	5	21.67	1.07	1.22	52.17
	13.2	13.4	13.6	10	22.48	1.17	1.30	50.56
	13.4	13.2	13.6	20	25.57	1.22	1.40	53.87

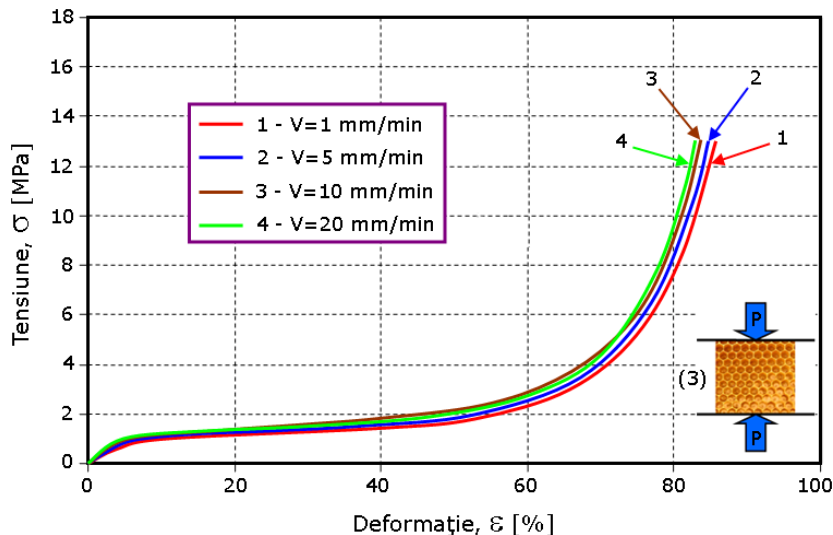


Fig. 3.12. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența vitezei de încărcare

Figura 3.12 prezintă influența vitezei de încărcare asupra comportării la compresiune pentru o spumă poliuretanică cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ .

Viteza de încărcare are o influență scăzută asupra proprietăților, (Tabelul 3.2) totuși poate fi identificată o ușoară creștere a proprietăților mecanice cu creșterea vitezei de încărcare, [Linul și alții (2010a)].

#### 3.3.1.3.4. Influența planului de formare

În figura 3.13 este prezentat modul de prelevare al probelor dintr-o placă de semifabricat de secțiune dreptunghiulară, respectiv modul de acționare al forței funcție de planul de formare al spumei, [Chincea (2010), Marșavina (2010a), Tan și alții (2005), Kabir și alții (2006)], iar în figura 3.14 este prezentată influența acestui plan de formare și a direcției forței asupra caracteristicilor mecanice la compresiune. Investigarea anisotropiei datorată producerii materialelor celulare au fost prezentate și în Linul și alții (2009).

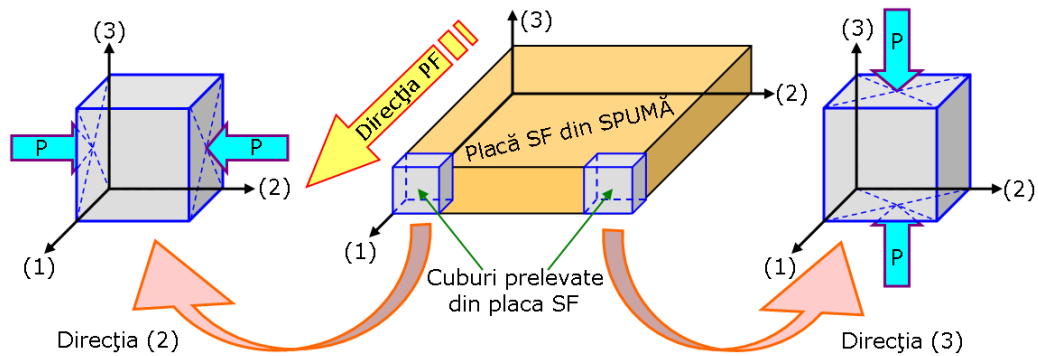


Fig. 3.13. Modul de prelevare al epruvetelor cubice dintr-o placă

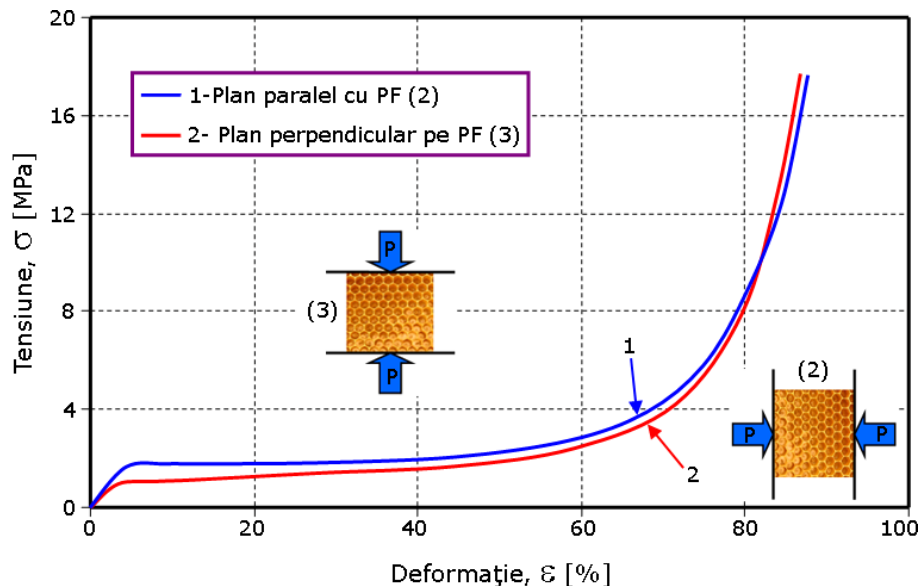


Fig. 3.14. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența direcției de încărcare

În cazul acestei teze toate încercările s-au realizat fie pe direcția (2) de încărcare-plan paralel cu planul de formare, fie pe direcția (3) de încărcare-plan perpendicular pe planul de formare.

După cum se poate observa în Tabelul 3.3. direcția de încărcare evidențiază comportamentul anizotrop al spumei. Pentru aceeași densitate a spumei, în cazul încărcării în plan pentru regiunea de platou se obține o tensiune constantă, iar pentru o încărcare perpendiculară pe planul de formare, regiunea de platou prezintă o ecruisare liniară.

Tabelul 3.3. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de planul de formare

Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea de curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
	h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
140	14.02	12.06	12.04	(3)	34.11	1.05	1.21	54.47
	13.80	13.80	13.80	(2)	36.18	1.72	1.75	54.42

Tabelul 3.3. prezintă valorile medii ale parametrilor mecanici, iar Tabelul A.1 și A.3 din Anexe prezintă toate valorile obținute pentru cele două direcții de încărcare.

### 3.3.1.3.5. Influența secțiunii transversale

În Tabelul 3.4 sunt prezentate valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune pentru o spumă cu densitatea de 140 kg/m<sup>3</sup>, funcție de secțiunea transversală, iar Tabelul A.4 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare.

Tabelul 3.4. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune statică funcție de secțiunea transversală

Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Secțiunea transversală	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea de curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
	h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	25.0	12.2	12.2	12X12	4.91	0.23	0.24	53.82
	25.2	25.2	25.4	25X25	5.17	0.20	0.21	53.68
	24.8	49.8	50.0	50X50	5.32	0.16	0.18	53.63

Figura 3.15 prezintă probele utilizate în cadrul studierii influenței secțiunii transversale, iar în figura 3.16 sunt prezentate curbele aferente.

În acest caz probele au prezentat aceeași înălțime h (25 mm), dar valori diferite pentru b<sub>1</sub> și b<sub>2</sub>, (12X12, 25X25, respectiv 50X50 mm<sup>2</sup>). Se observă că se

obține o influență relativ mică a secțiunii transversale asupra proprietăților mecanice la compresiune.

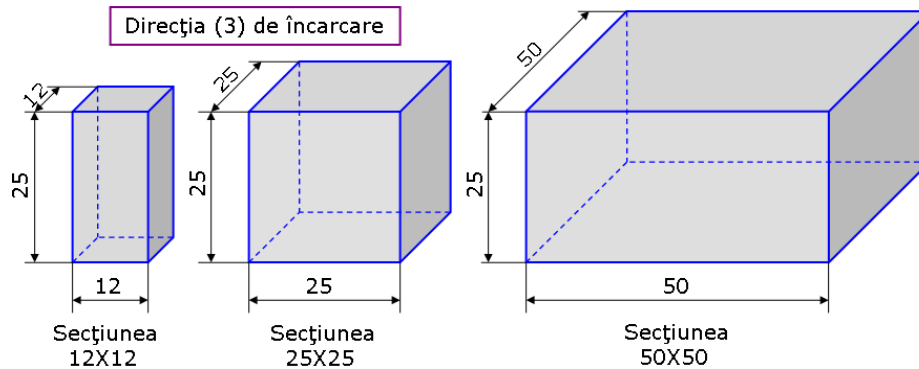


Fig. 3.15. Forma și dimensiunile probelor utilizate pentru studiul secțiunii transversale

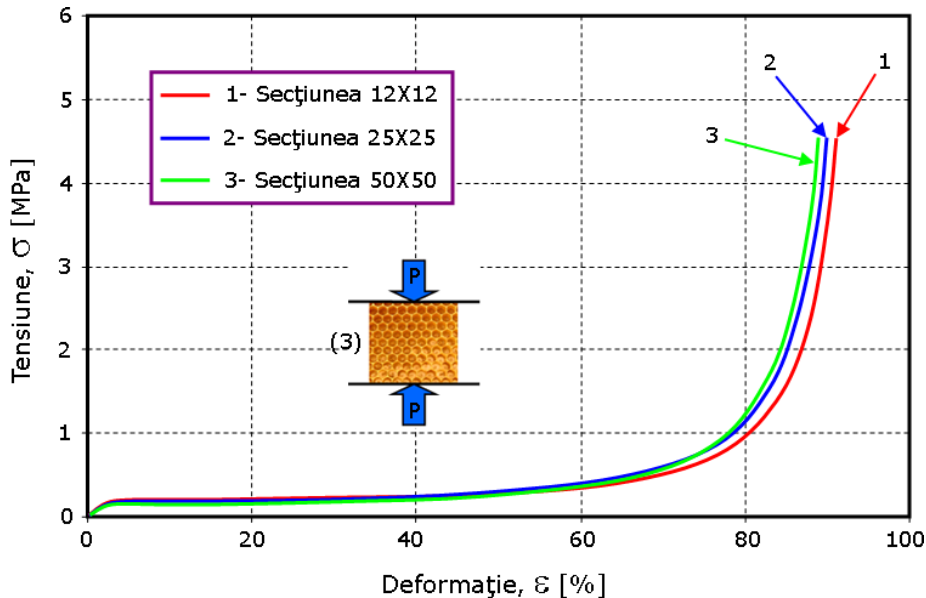


Fig. 3.16. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică.  
Influența secțiunii transversale.

În conformitate cu rezultatele prezentate în Tabelul 3.1 și Tabelul A.1, în figura 3.17 este prezentată variația modului de elasticitate în funcție de densitate (valorile medii și abaterea minimă și maximă a rezultatelor obținute), [Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a), Widya și Macosko (2005)].

În figura 3.18 se prezintă variația tensiunii de curgere și a tensiunii de platou funcție de densitate iar figura 3.19 prezintă variația densificării funcție de densitate.

Se observă că modulul de elasticitate, tensiunea de curgere și tensiunea de platou cresc odată cu creșterea densității, pe când densificarea prezintă o valoare aproximativ constantă (cu mici excepții, unde pentru densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup> se obține o valoare mai mare).

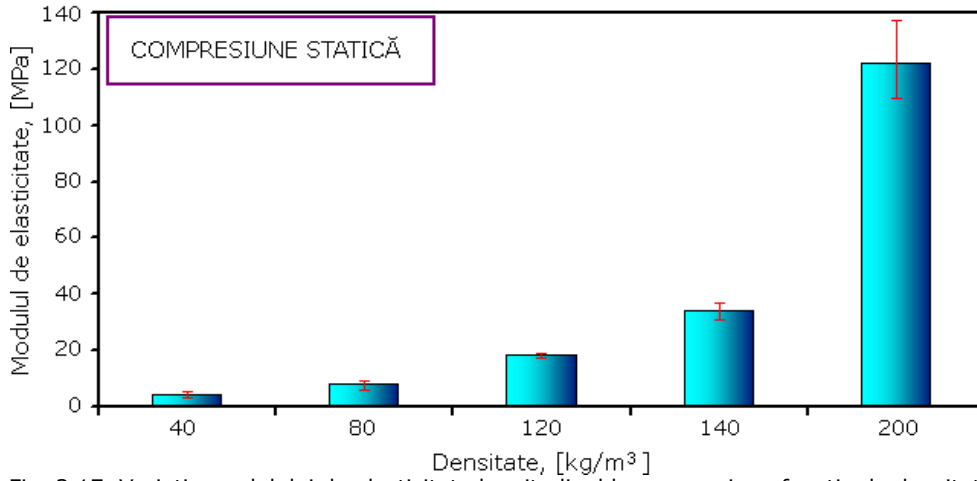


Fig. 3.17. Variația modulului de elasticitate longitudinal la compresiune funcție de densitate

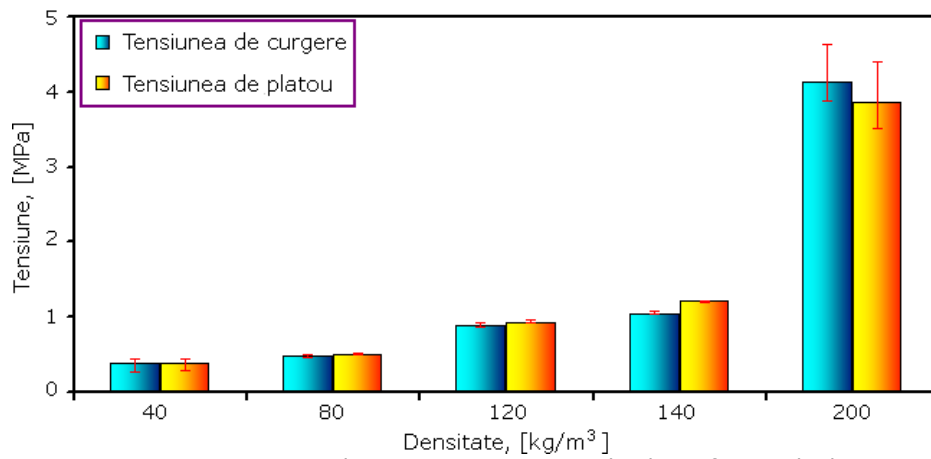


Fig. 3.18. Variația tensiunii de curgere și a tensiunii de platou funcție de densitate

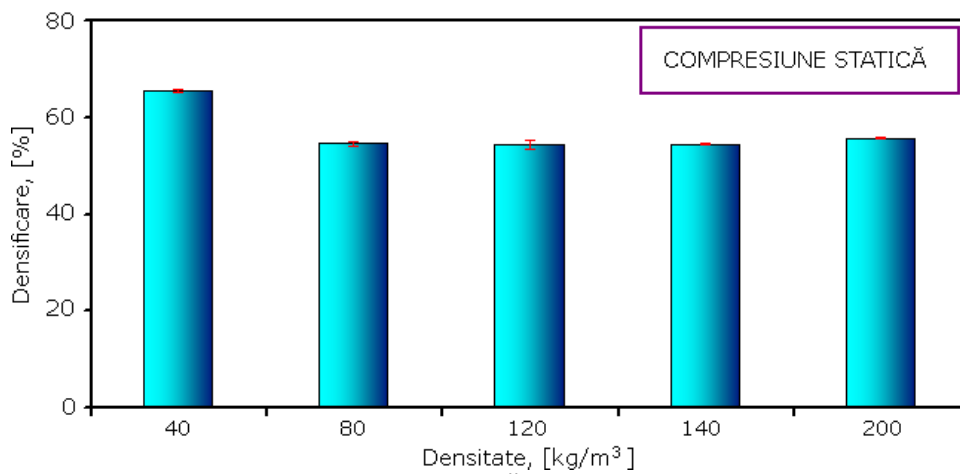


Fig. 3.19. Variația densificării funcție de densitate



### 3.3.2. Determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune în regim dinamic

În cadrul compresiunii dinamice s-a analizat:

- influența densității;
- influența vitezei de încărcare ;
- influența planului de formare;
- influența temperaturii.

#### 3.3.2.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate

Încercările experimentale s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității de Tehnice din Lublin, Polonia. Testele s-au realizat pe o mașină de încercat Instron-Dynatup prezentată în figura 3.20 la diferite temperaturi: 20, 60 și 100°C.

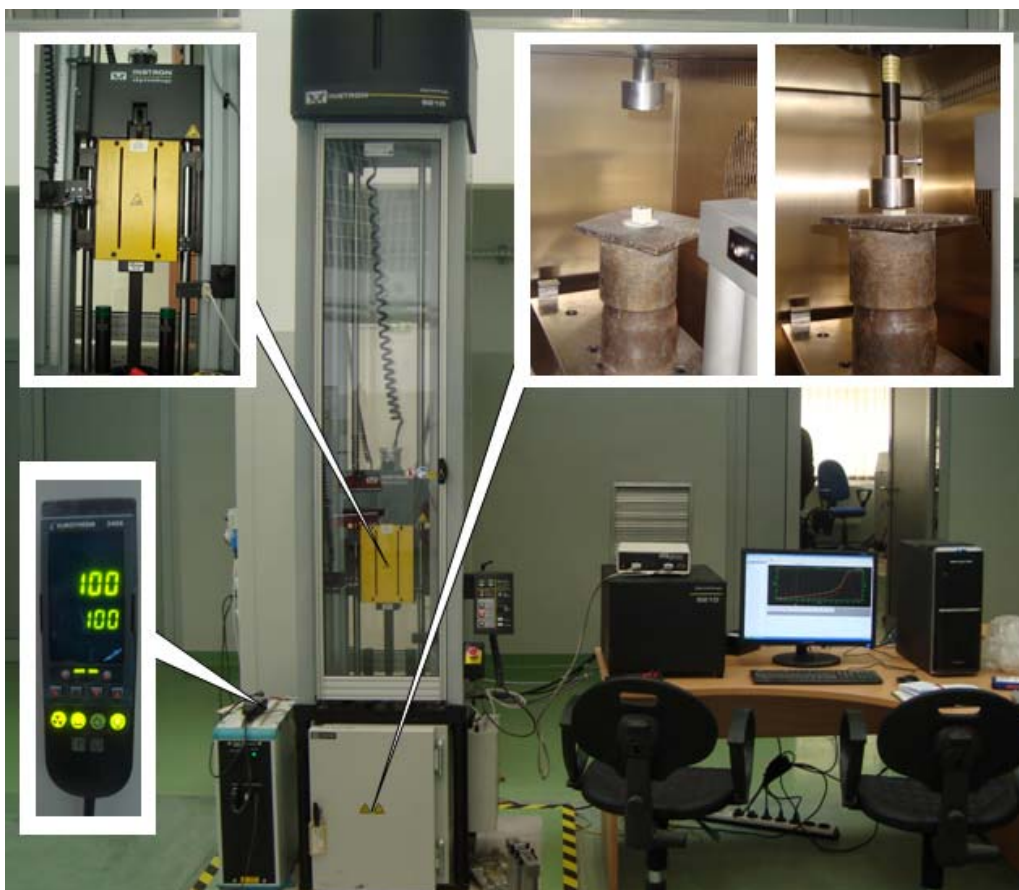


Fig. 3.20. Imagine de ansamblu a mașinii de impact, Instron-Dynatup

Pentru caracterizarea comportamentului mecanic la solicitările de compresiune dinamică spumele poliuretane rigide utilizate în cadrul programului experimental au avut următoarele densități: 40, 80, 120, 140 kg/m<sup>3</sup>. Forma

constructivă a epruvetelor utilizate este arătată în figura 3.7. Probele au fost supuse unei compresiuni uniaxiale la diferite viteze de încărcare, în intervalul 0.62-1.98 m/s. Pentru fiecare tip de încercare s-au folosit câte 5 epruvete conform standardului ASTM D1621-00 (Metode Standard de Testare a Proprietăților la Compresiune pentru Plasticele Celulare Rigide).

### 3.3.2.2. Rezultate experimentale obținute

Principalii factori care au fost analizați în cadrul compresiunii dinamice sunt reprezentați de:

- influența densității;
- influența vitezei de încărcare ;
- influența planului de formare;
- influența temperaturii.

#### 3.3.2.2.1. Influența densității

În urma efectuării încercărilor de compresiune dinamică s-au determinat caracteristicile mecanice ale spumelor. Valorile medii ale acestor caracteristici pentru o încărcare într-un plan paralel cu planul de formare –direcția (2)- sunt prezentate în Tabelul 3.5, iar în Tabelele A.5 și A.6 din Anexe sunt prezentate toate valorile pentru fiecare încercare.

Tabelul 3.5. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de densitate și direcția de încărcare

Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Viteza de încărcare	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea de curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	0.62	15.37	15.32	15.60	(2)	3.89	0.39	0.39	66.02
	0.78	15.73	15.87	15.56		4.12	0.37	0.37	62.86
	0.94	14.88	14.91	15.20		4.50	0.37	0.38	64.89
80	0.78	14.13	13.13	13.52		5.37	0.49	0.48	59.71
	1.09	14.13	14.03	14.40		6.40	0.42	0.42	53.98
	1.28	14.17	14.42	14.20		5.98	0.42	0.43	58.93
120	1.28	12.96	13.48	13.56		33.90	1.53	1.48	58.80
	1.67	13.76	13.77	13.90		31.30	1.72	1.47	54.13
	1.98	13.25	13.55	13.24		32.16	1.73	1.60	57.34
140	0.94	14.00	14.17	14.06		33.10	1.72	1.62	56.88
	1.28	14.17	14.22	14.16	39.43	1.83	1.71	57.60	
	1.67	14.10	14.08	14.11	33.47	1.84	1.55	57.12	

De asemenea, din datele furnizate de mașina de încercat, s-au trasat diagramele caracteristice convenționale pentru epruvetele încercate,  $F = f(\Delta l)$  [Cernescu (2009), Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a)].

În figura 3.21 este prezentată o comparație a curbelor tipice tensiune-deformație pentru cele 4 densități ale spumei poliuretanică supuse la compresiune dinamică (40, 80, 120 și 140 kg/m<sup>3</sup>). Curbele prezentate sunt rezultate în urma unei încărcări perpendiculare pe planul de formare la o temperatură de 20°C.

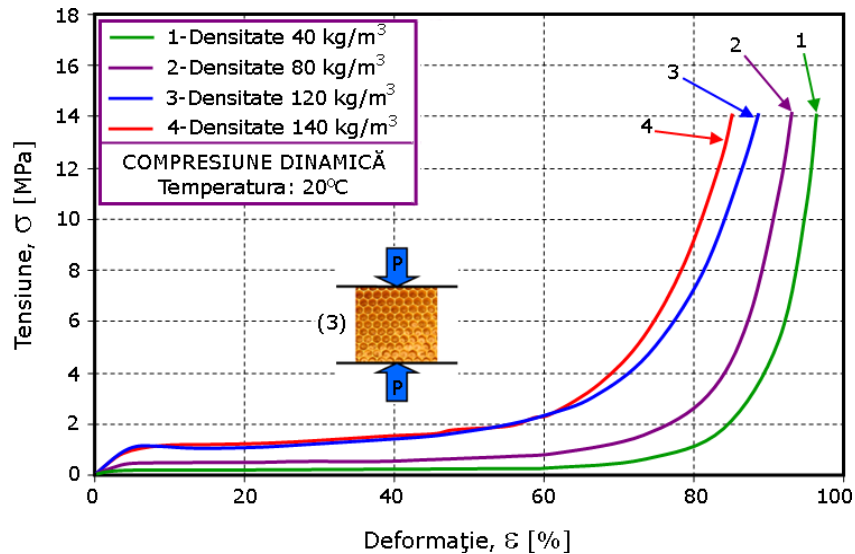


Fig. 3.21. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune dinamică. Influența densității

De pe această diagramă se poate observa foarte ușor că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în determinarea caracteristicilor mecanice la compresiune.

#### 3.3.2.2.2. Influența vitezei de încărcare

Figura 3.22 prezintă influența vitezei de încărcare asupra comportării la compresiune pentru o spumă poliuretanică cu densitatea de 80 kg/m<sup>3</sup>, (Tabelul 3.5, Tabelul A.5 și Tabelul A.6). Încărcările pentru determinarea influenței vitezei de încărcare sunt realizate pe direcția planului de formare la o temperatură de 20°C și diferite viteze de încărcare, (0.78, 1.09 și 1.28 m/s).

Viteza de încărcare are o influență scăzută asupra proprietăților mecanice la compresiune. Se observă că cea mai mare influență este prezentă în cadrul densificării, pe când zona liniar-elastică și zona de platou aproape coincid.

#### 3.3.2.2.3. Influența planului de formare

Valorile medii ale parametrilor geometrici și mecanici pentru o încărcare într-un plan perpendicular cu planul de formare –direcția (2)– sunt prezentate în Tabelul 3.6, iar în Tabelele A.7 și A.8 din Anexe sunt prezentate toate valorile pentru fiecare încercare.

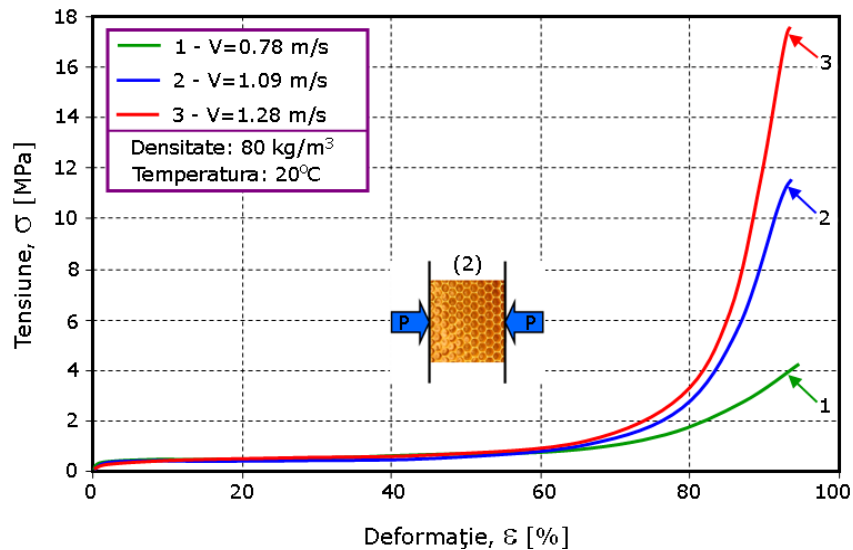


Fig. 3.22. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune dinamică. Influența vitezei de încărcare

Tabelul 3.6. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de planul de formare

Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Viteza de încărcare	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea de curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	0.62	14.92	14.88	15.13	(3)	4.49	0.39	0.39	66.77
	0.78	15.62	15.28	15.49		4.04	0.38	0.38	66.07
	0.94	15.27	15.91	15.80		4.49	0.37	0.37	65.13
80	0.78	14.16	14.76	14.12		7.74	0.54	0.54	62.97
	1.09	14.98	14.87	14.02		8.41	0.55	0.53	57.05
	1.28	14.26	14.54	14.32		8.42	0.47	0.49	55.02
120	1.28	13.91	14.00	14.00		24.57	1.17	1.15	59.79
	1.67	14.00	14.07	14.00		26.98	1.12	1.07	57.29
	1.98	14.37	14.35	14.39		26.89	1.10	1.15	58.09
140	0.94	12.74	12.83	12.76		22.37	0.98	1.04	56.98
	1.28	13.19	13.15	13.07		24.82	1.10	1.20	56.91
	1.67	12.42	13.34	13.41		25.62	1.05	1.01	52.89

Epruvetele au fost realizate conform figurii 3.13. În figura 3.23 este prezentată influența planului de formare și a direcției forței asupra caracteristicilor

meccanice la compresiune dinamică. În acest caz este studiată o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$  la o temperatură de  $20^\circ\text{C}$  pentru  $V=1.67 \text{ m/s}$ .

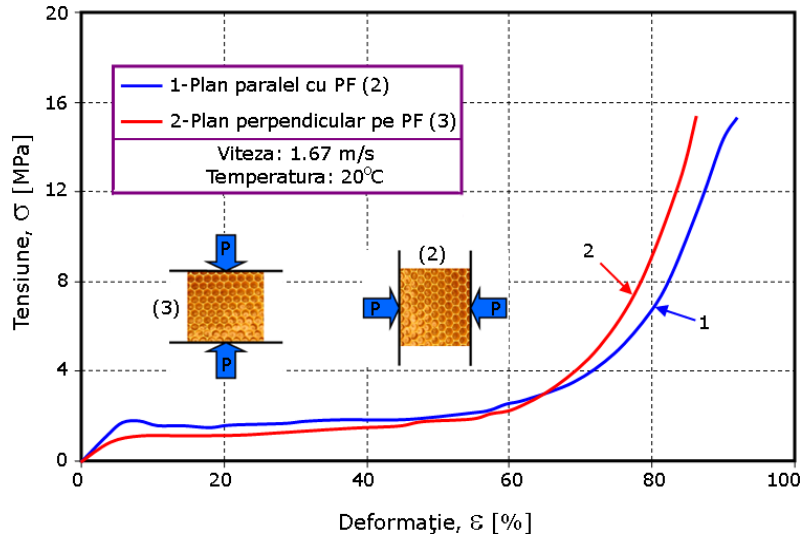


Fig. 3.23. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune dinamică. Influența direcției de încărcare

Ca și în cazul compresiunii statice, planul de formare are o influență semnificativă asupra proprietăților mecanice la compresiune în regim dinamic, acest lucru evidențiind comportamentul anizotrop al spumei (Tabelul 3.5 și Tabelul 3.6).

#### 3.3.2.2.4. Influența temperaturii

Figura 3.24 prezintă curbele tensiune-deformație privind influența temperaturii pentru o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , pentru  $V=1.67 \text{ m/s}$ .

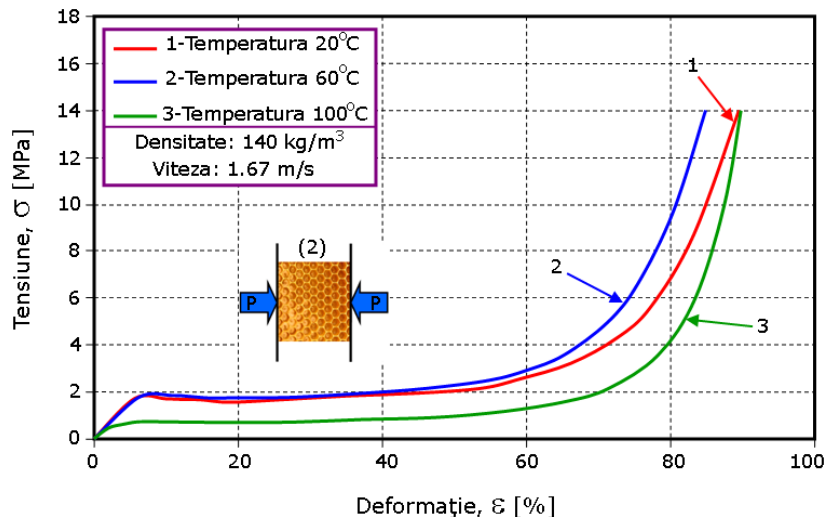


Fig. 3.24. Diagrama tensiune-deformație pentru compresiune statică. Influența temperaturii.

Studiul s-a realizat pentru trei temperaturi diferite: 20, 60 și 100°C, iar încărcarea s-a aplicat într-un plan paralel cu planul de formare.

Conform rezultatelor prezentate în figura 3.24 se poate constata că la temperatura ambiantă, (20°C) și la temperatura de 60°C, comportamentul spumei este aproximativ la fel, pe când în zona temperaturilor înalte (100°C), spumele își modifică proprietățile. Trebuie subliniat că în cazul spumelor poliuretanică temperatura de 100°C poate fi considerată înaltă având în vedere faptul că acestea au temperatura de topire în jurul valorii de 150°C.

În Tabelul 3.7 sunt prezentate valorile medii ale caracteristicilor mecanice funcție de temperatură, iar Tabelele A.9 și A.10 din Anexe sunt prezentate toate valorile pentru fiecare temperatură și fiecare plan de formare în parte.

Tabelul 3.7. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de temperatură

Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Direcția de încărcare	Dimensiunile probelor			Temperatura [°C]	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	(2)	15.03	15.18	14.97	60	4.46	0.37	0.37	65.35
		15.74	15.99	15.36	100	21.52	0.24	0.20	62.02
	(3)	14.96	15.38	14.45	60	4.04	0.37	0.37	64.40
		15.15	14.78	15.30	100	16.62	0.39	0.31	64.41
80	(2)	14.34	14.75	14.61	60	8.80	0.50	0.48	54.16
		14.82	14.77	14.80	100	46.50	0.58	0.44	52.10
	(3)	14.61	14.84	13.92	60	55.40	0.62	0.57	53.59
		14.60	14.13	14.66	100	64.72	0.51	0.40	53.51
120	(2)	13.81	13.81	13.78	60	69.80	1.93	1.57	59.09
		13.68	13.62	13.76	100	120.74	1.66	1.30	56.20
	(3)	13.39	13.58	13.21	60	80.48	1.46	1.33	59.43
		13.83	13.92	14.02	100	63.57	1.18	1.10	56.26
140	(2)	14.44	14.42	14.44	60	40.62	1.94	1.71	55.73
		12.27	14.30	14.27	100	50.73	0.78	0.72	56.18
	(3)	13.26	13.25	13.24	60	52.66	1.35	1.35	53.69
		13.17	13.18	13.17	100	12.99	0.58	0.67	54.21

### 3.3.3. Comparație între parametrii statici și cei dinamici la solicitarea de compresiune

În figura 3.25 este prezentată o comparație între curbele tensiune-deformație pentru solicitarea de compresiune, atât în regim static cât și în regim dinamic. Încercările s-au efectuat pentru mai multe densități, iar în figura de mai jos

sunt prezentate rezultatele doar pentru densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$  cu sollicitarea în cele două plane de încărcare (plan paralel cu planul de formare și plan perpendicular pe planul de formare).

Temperatura utilizată a fost cea de  $20^\circ\text{C}$ , iar vitezele de încărcare au fost:  $2 \text{ mm/min}$  în regim static, respectiv  $1.67 \text{ m/s}$  în regim dinamic.

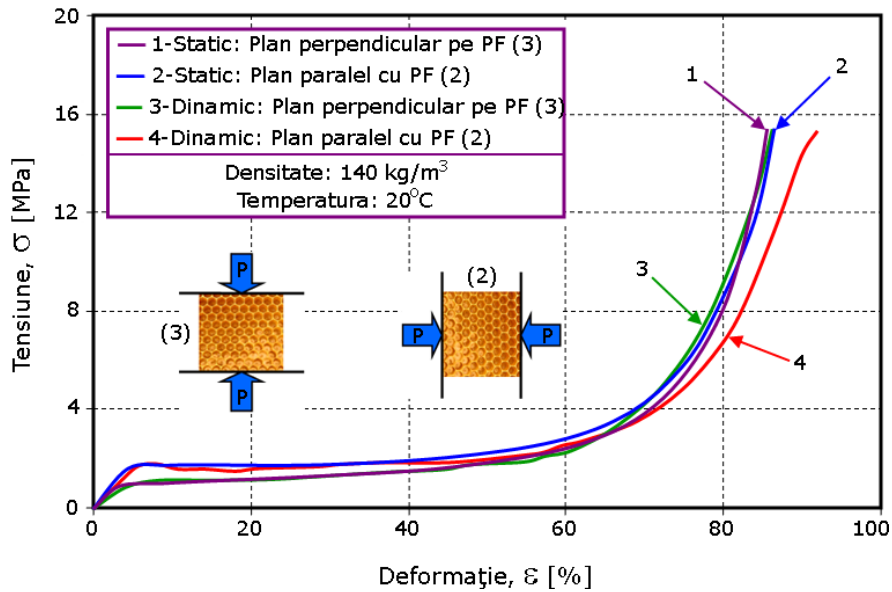


Fig. 3.25. Curbele tensiune-deformație. Comparăți între rezultatele obținute la sollicitarea statică și cea dinamică

După cum se poate observa și în figura 3.25, comportamentul în regim static cât și dinamic al spumelor poliuretanică rigide este aproape identic pentru condițiile amintite mai sus (diferența majoră fiind doar între planele de formare).

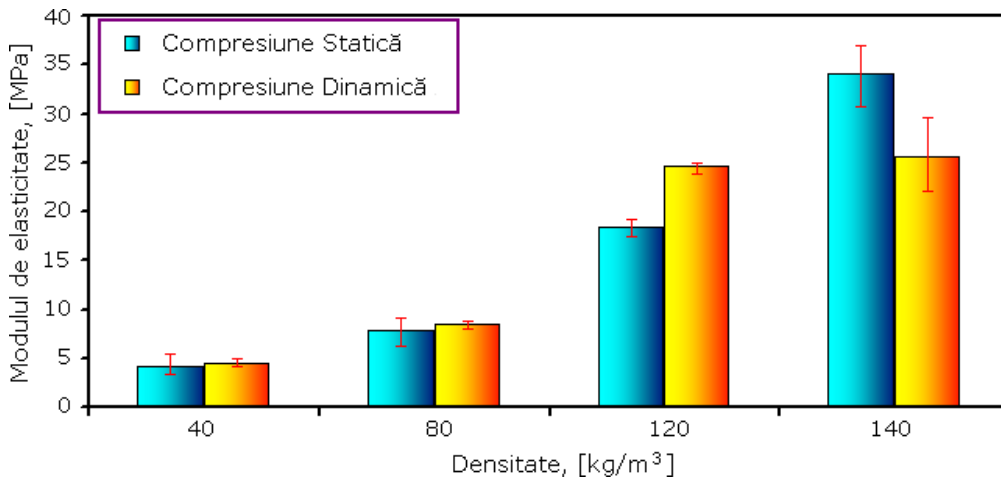


Fig. 3.26. Variația modului de elasticitate funcție de densitate la compresiune. Comparăți static-dinamic

În conformitate cu rezultatele prezentate în Tabelele 3.1, 3.6, A.1, A.7 și A.8, în figura 3.26 este prezentată comparativ (pentru solicitările statice și dinamice) variația modului de elasticitate în funcție de densitate, [Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a), Widya și Macosko (2005)].

În figura 3.27 se prezintă variația tensiunii de curgere funcție de densitate. Diagrama prezintă o comparație între parametrii statici și cei dinamici obținuți în urma solicitării de compresiune într-un plan perpendicular pe planul de formare la temperatura ambiantă (20°C).

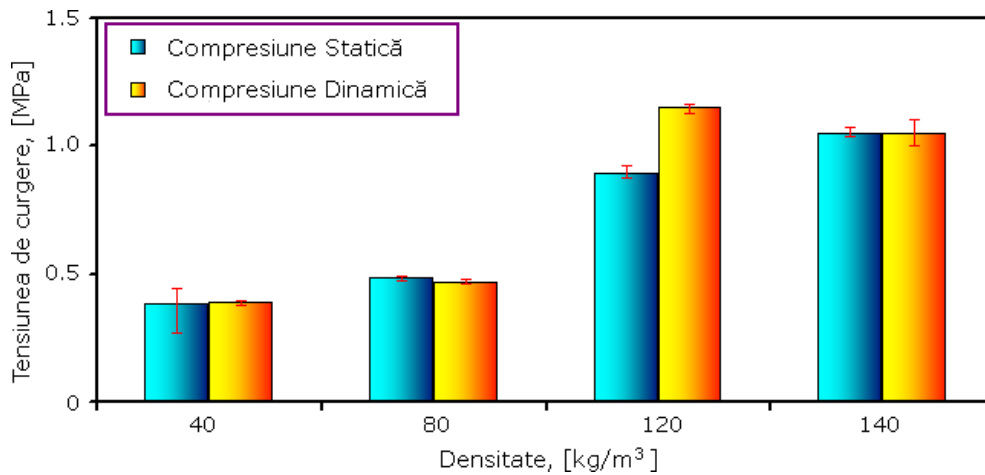


Fig. 3.27. Variația tensiunii de curgere funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic

Figura 3.28 prezintă variația tensiunii de platou funcție de densitate pentru cele două regimuri de încărcare (compresiune statică, respectiv dinamică).

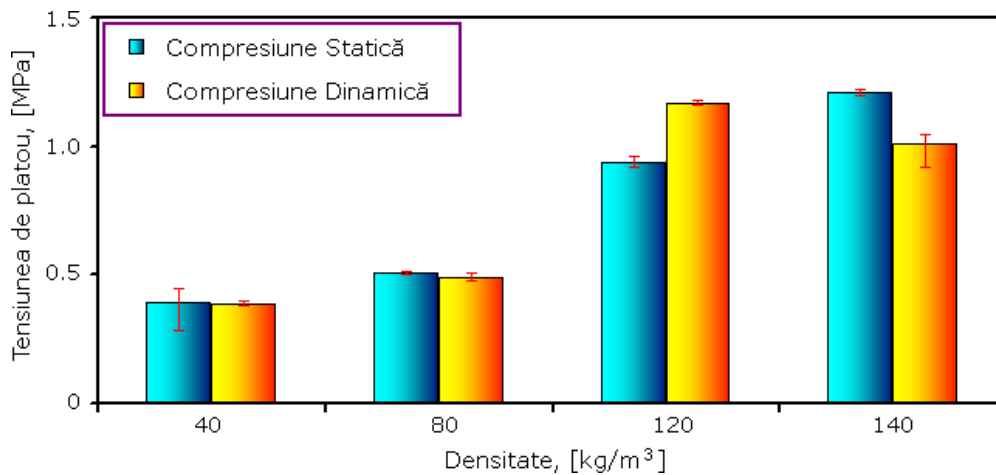


Fig. 3.28. Variația tensiunii de platou funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic

De asemenea, în figura 3.29 este prezentată o comparație a densificării funcție de densitate pentru cele două regimuri de încărcare.



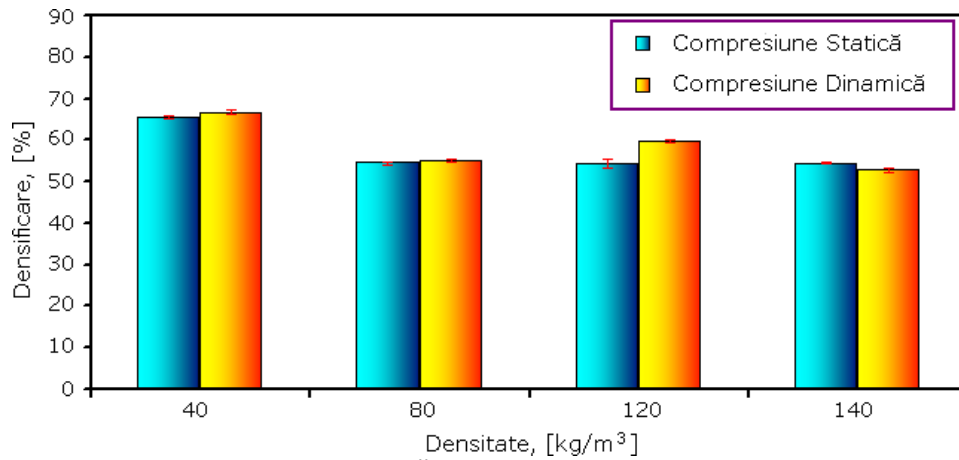


Fig. 3.29. Variația densificării funcție de densitate la compresiune. Comparație static-dinamic

Diagramele de mai sus prezintă o comparație a parametrilor statici și dinamici obținuți în urma solicitării de compresiune. Compresiunea statică s-a realizat cu o viteză de încărcare de 2 mm/min pentru toate cele patru densități. În cadrul compresiunii dinamice s-au utilizat mai multe viteze după cum urmează:

- pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, V=0.62 m/s;
- pentru spumele cu densitatea de 80, respectiv 120 kg/m<sup>3</sup>, V=1.28 m/s;
- pentru spuma cu densitatea de 140 kg/m<sup>3</sup>, V=1.67 m/s.

### 3.4. Determinarea caracteristicilor mecanice la tracțiune

Determinarea caracteristicilor mecanice la tracțiune ale spumelor s-a făcut prin încercări de tracțiune pe două tipuri constructive de probe. Forma și dimensiunile probelor utilizate este prezentată în figura 3.30, [Chiang și Ding (2008), ASTM D 1623, Marșavina (2008)].

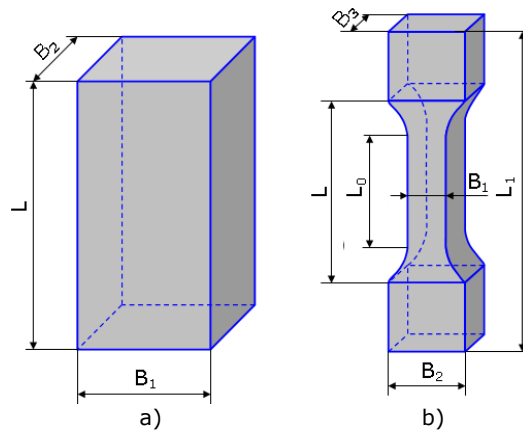


Fig. 3.30. Forma și dimensiunile probelor pentru încercările de tracțiune: a) Proba tip "1"; b) Proba tip "2"

### 3.4.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate

Încercările experimentale de tracțiune s-au realizat atât în Laboratorul de Rezistența Materialelor "Ștefan Nădășan", al Catedrei de Rezistența Materialelor, din cadrul Facultății de Mecanică (pentru probele de tip "1") cât și în Laboratorul de Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, Universitatea de Tehnice din Lublin, Polonia, (pentru probele de tip "2").



Fig. 3.31. Imagine de ansamblu a mașinii de încercat MTS de 25 kN



Fig. 3.32. Extensometru multiaxial MTS de tipul 632.85F-05

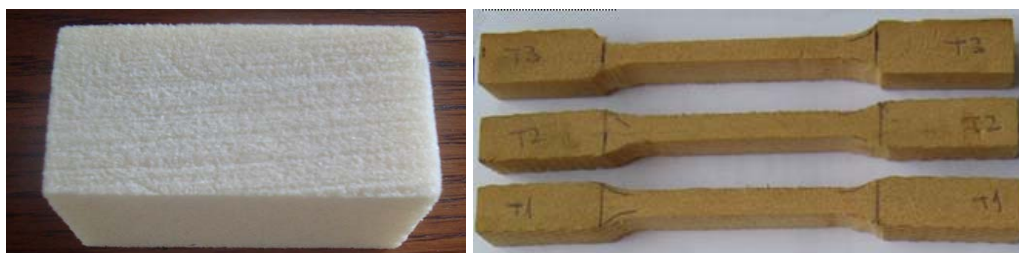
Testele s-au făcut la temperatura ambiantă, ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ), pe o mașină de încercat de tracțiune-compresiune statică Zwick Roell 005 de 5 kN, (pentru probele de tip "1"), respectiv pe o mașină de tracțiune în regim static-dinamic MTS de 25 kN de tipul 858, (figura 3.31-pentru probele de tip "2").

Pentru fiecare tip de încercare s-au folosit câte 5 epruvete, ele fiind supuse unei solicitări uniaxiale la o viteză de încărcare de 2 mm/min (probele de tip "1"), respectiv la o viteză de încărcare de 5 mm/min (probele de tip "2").

Pentru testele realizate în laboratorul Universității Tehnice din Lublin s-a folosit un extensometru multiaxial MTS de tipul 632.85F-05 pentru determinarea deplasărilor pe direcțiile longitudinale și transversale, având o lungime calibrată  $L_0=25$  mm, figura 3.32. Forța, deplasarea și deformațiile epruvetelor au fost înregistrate pe toată durata testelor.

Pentru caracterizarea comportamentului mecanic la solicitările de tracțiune spumele utilizate în programul experimental au avut următoarele densități: 40, 80, și  $200 \text{ kg/m}^3$ .

Probele au fost realizate atât în Timișoara, (probele de tip "1"), cât și în Laboratorul din Lublin, (probele de tip "2") din plăci de spumă poliuretanică rigidă de diferite densități. Forma constructivă a epruvetelor utilizate în cadrul programului experimental este prezentată în figura 3.33.



a) Proba tip "1" b) Proba tip "2"  
Fig. 3.33. Epruvetele utilizate în cadrul încercărilor experimentale de tracțiune

### 3.4.2. Rezultate experimentale obținute

Determinarea proprietăților mecanice la tracțiune a spumelor poliuretanică s-au realizat conform standardului ASTM D 1623. S-au utilizat următoarele definiții:

- $L_0$  – lungimea calibrată, în [mm];
- $v$  – viteza de încercare, reprezentând viteza de separare a bacurilor mașinii de încercat pe durata încărcării, în [mm/min];
- $\sigma$  – tensiunea normală la tracțiune, reprezentând raportul dintre forța exercitată în timpul încărcării, ( $F$ ) și unitatea de arie a secțiunii transversale inițiale ( $A$ ), din interiorul lungimii calibrate, în [MPa]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.10)$$

- $\sigma_M$  – tensiunea maximă la tracțiune suportată de epruvetă pe durata încercării, în [MPa];

- $\varepsilon$  – deformația la tracțiune, reprezentând creșterea în lungime, ( $\Delta L_0$ ) pe unitatea inițială a lungimii calibrate, ( $L_0$ ), în [mm/mm] sau [%]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad ; \quad \varepsilon(\%) = \frac{\Delta L_0}{L_0} 100 \quad (3.11)$$

- $\varepsilon_M$  – deformația la tracțiune corespunzătoare rezistenței la rupere, în [mm/mm] sau [%]:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} \quad ; \quad \varepsilon_t(\%) = \frac{\Delta L}{L} 100 \quad (3.12)$$

- $E_t$  – modulul de elasticitate la tracțiune obținut de pe panta liniar-elastică a curbei tensiune-deformație, în [MPa];

- $\nu$  – coeficientul lui Poisson la deformația  $\varepsilon_n$ , într-una din cele două axe normal la direcția de tragere, la deformația corespunzătoare  $\varepsilon$  în direcția de tragere, situat în porțiunea inițială a curbei de deformație longitudinală față de cea normală, adimensional, [-]. Este indicat ca  $\nu_b$  (pe direcția lățimii) sau  $\nu_h$  (pe direcția grosimii) să fie în conformitate cu axele relevante, [Marșavina (2010a)].

$$\nu_b = -\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon} \quad ; \quad \nu_h = -\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

Curba forță-deplasare înregistrată pe durata testelor de tracțiune pentru spuma cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$  este prezentată în figura 3.34, iar în figura 3.35 sunt prezentate curbele tensiune-deformație pentru spumele cu densitatea de 40, respectiv  $80 \text{ kg/m}^3$ .

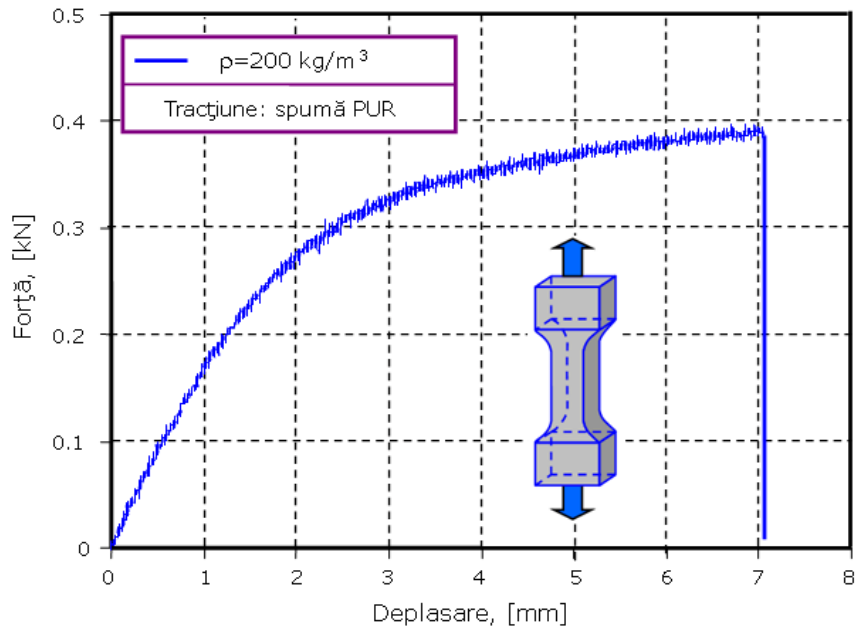


Fig. 3.34. Curba forță-deplasare înregistrată pe durata testului de tracțiune

Spuma cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , prezintă un comportament linear, urmat de unul nelinier până la forța maximă de rupere, figura 3.34. Spumele având densități de  $40$  și  $80 \text{ kg/m}^3$  au o comportare fragilă la rupere.

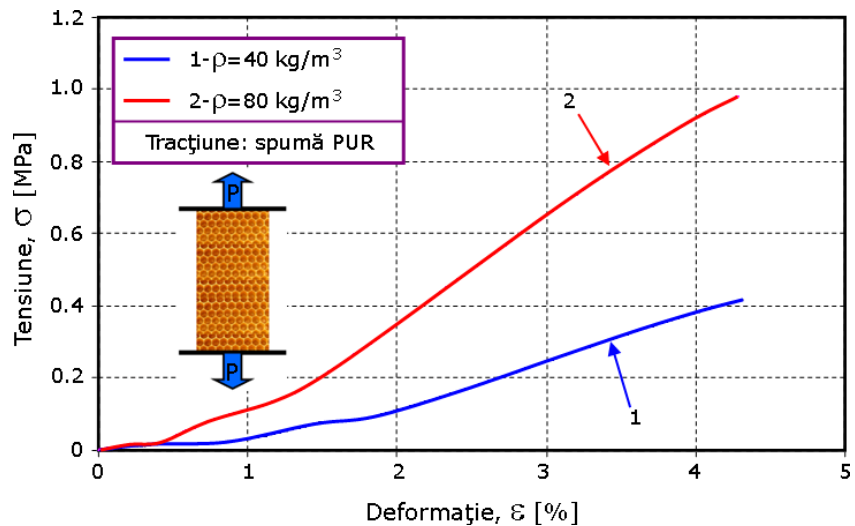


Fig. 3.35. Curbele forță-deplasare înregistrate pe durata testului de tracțiune

Valorile medii ale rezultatelor experimentale obținute în urma încercărilor de tracțiune sunt prezentat în Tabelul 3.8 pentru modulul de elasticitate și rezistența la tracțiune, iar în Tabelul A.11 din Anexe sunt prezentate toate valorile pentru fiecare încercare.

Tabelul 3.8. Rezultatele medii ale modulului de elasticitate și a rezistenței la rupere la tracțiune

Densitatea	Parametrii geometrici ai epruvetelor utilizate			Modulul de elasticitate	Rezistența la rupere la tracțiune
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	B <sub>1</sub> [mm]	B <sub>2</sub> (B <sub>3</sub> ) [mm]	L(L <sub>0</sub> ) [mm]	E [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]
40	24.8	24.8	49.0	14.07	0.44
80	26.0	25.8	50.2	28.73	0.78
200	6.0	12.0	25.0	169.7	5.28

În scopul observării influenței densității asupra proprietăților, în figura 3.36 sunt prezentate comparativ valorile medii, minime și maxime, obținute experimental.

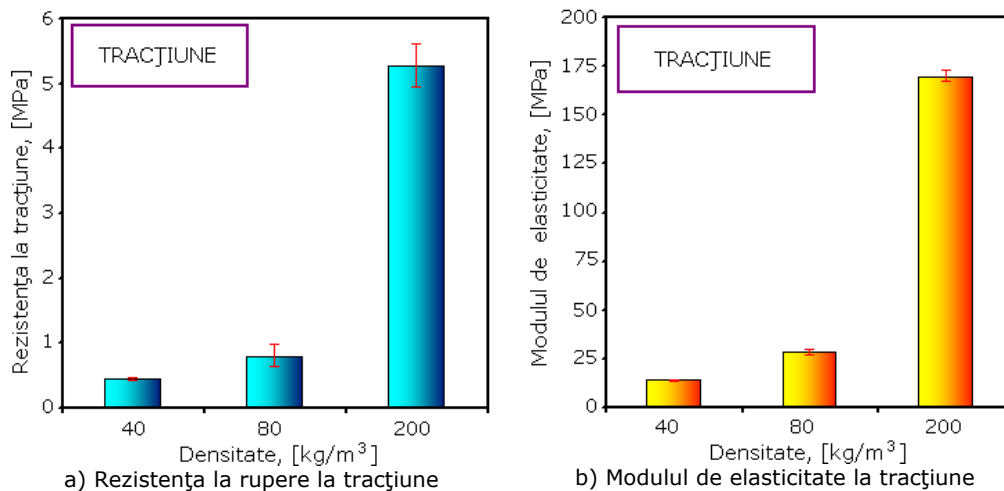


Fig. 3.36. Proprietățile la tracțiune ale spumei. Influența densității

Se poate observa că densitatea are un rol major asupra rezistenței la rupere, crescând de la 0.44 MPa pentru spumă cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup> la 5.28 MPa pentru spuma cu densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup>. Pe de altă parte, densitatea are de asemenea un rol foarte important asupra rigidității spumei. Modulul de elasticitate crește de la valoarea de 14.07 MPa pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, la valoarea de 169.7 MPa pentru spuma cu densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup>.

S-a încercat de asemenea să se determine coeficientul lui Poisson cu ajutorul extensometrului multiaxial. În afară de faptul că pini extensometrului pătrund în suprafața exterioară a spumei, s-a obținut pentru densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup> o valoare medie a coeficientului lui Poisson de 0.2474.

După cum se poate vedea și în figura 3.37, cele mai multe dintre probe s-au rupt în zona calibrată.

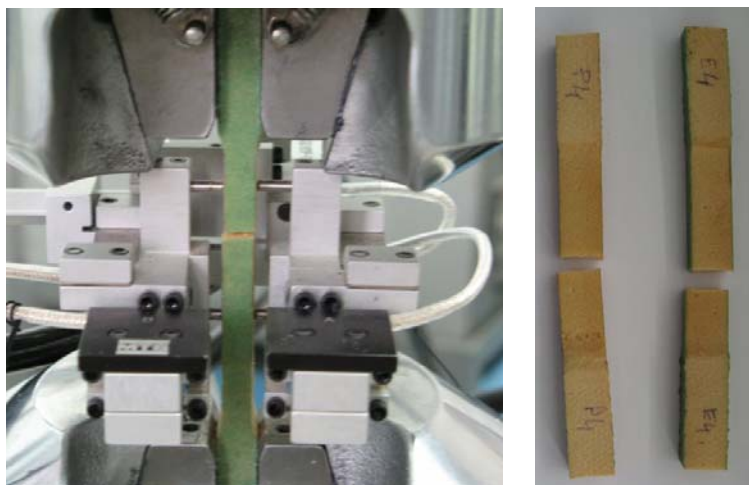


Fig. 3.37. Prezentarea probelor rupte după solicitarea de tracțiune

Toate probele prezintă o rupere fragilă fără deformații plastice, (figura 3.34 și figura 3.37).

### 3.5. Determinarea tenacității la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte pe epruvete crestate

O atenție deosebită este acordată tenacității la rupere a spumelor poliuretanică deoarece în general spumele au o comportare fragilă la tracțiune iar prezența fisurilor scade capacitatea portantă a spumelor. În ultimii ani s-au făcut multe cercetări pe această temă a determinării tenacității la rupere pentru spumele poliuretanică atât în condiții de încărcare statice cât și dinamice. Modelele micromecanice au fost folosite pentru estimarea tenacității la rupere, iar aceste valori au fost verificate experimental, [Marșavina (2010a)].

Prima corelație între tenacitatea la rupere a spumelor poliuretanică și densitate, ( $< 200 \text{ kg/m}^3$ ) a fost propusă de către McIntyre și Anderson (1979) într-o formă liniară. Același comportament a fost obținut atât de către Danielsson (1996) pentru o spumă PVC Divinycel, cât și de către Viana și Carlsson (2002) pe o spumă Diab H. În cadrul încercărilor experimentale s-a utilizat Modul I de rupere și s-a obținut o rupere fragilă fără curgere. De asemenea, o corelare între tenacitatea la rupere statică și densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ , a fost propusă de către Gibson și Ashby (1997). Kabir și alții (2006) au folosit procedura descrisă în standardul ASTM D5045-99, care se referă la determinarea tenacității la rupere a materialelor plastice și au aplicat-o spumelor din policlorură de vinil, (PVC) și poliuretanică, (PUR). Ei au investigat influența densității, efectul de scară, influența vitezei de încărcare și influența orientării celulelor. Densitatea are o influență semnificativă asupra tenacității la rupere, obținându-se creșteri de până la 7 ori ale acesteia la o creștere a densității de 3.5 ori. Burman, (1998) a prezentat tenacitatea la rupere pentru două tipuri comerciale de spume: Rohacell WF51 (cu densitatea de  $52 \text{ kg/m}^3$ ) și Divinycell H100 (cu densitatea de  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Tenacitatea la rupere,  $K_{IC}^*$ , prin Modul I de încărcare a fost obținută pentru probe de încovoiere în trei puncte, (SENB), iar valorile obținute au fost de  $0.08 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$  pentru WF51, respectiv  $0.21$

MPa m<sup>0.5</sup> pentru H100. De asemenea, el a determinat tenacitatea la rupere prin Modul II de rupere folosind epruvete cu crestătură (ENF), iar valorile obținute au fost de 0.13 MPa m<sup>0.5</sup> pentru WF51, respectiv 0.21 MPa m<sup>0.5</sup> pentru H100.

Este știut faptul că exprimarea tenacității la rupere pe baza parametrilor de Mecanica Ruperii este strâns legată de comportarea elastică sau elasto-plastică a materialului. În funcție de caracterul elastic sau elasto-plastic, materialele au fost împărțite în patru categorii, (figura 3.38), pentru fiecare din acestea tenacitatea la rupere exprimându-se prin parametri specificați în Tabelul 3.9.

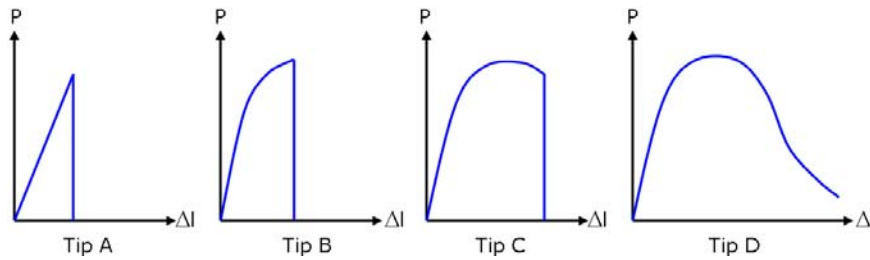


Fig. 3.38. Comportamentul la rupere al diferitelor tipuri de materiale

Tabelul 3.9. Parametrii ce exprimă tenacitatea la rupere, în funcție de tipul materialului

Tipul materialului	Comportarea materialului	Parametrii pe baza cărora se exprimă tenacitatea la rupere
Tip A	Comportare liniar elastică cu rupere fragilă	$K_{IC}$
Tip B	Rupere fragilă după deformație plastică	$J_{C,} \delta_C$
Tip C	Rupere fragilă după deformație plastică și extindere stabilă a fisurii	$J_{u,} \delta_u$
Tip D	Rupere ductilă după o extindere stabilă a fisurii	$J_{IC,} \delta_{IC}$

Pentru spumele poliuretanicе rigide studiate, curbele caracteristice obținute indică faptul că materialele se încadrează în prima categorie, (sunt materiale de tipul A), pentru care tenacitatea la rupere se determină pe baza parametrului  $K_{IC}$  (valoarea tenacității la rupere pentru Modul I de rupere).

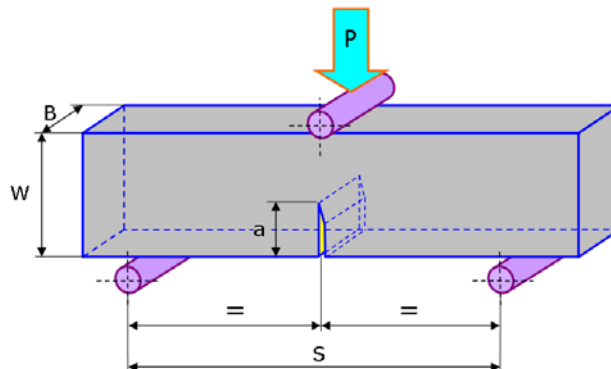


Fig. 3.39. Forma și dimensiunile probelor pentru încercările de încovoiere în trei puncte

Determinarea caracteristicilor mecanice pentru materialele studiate s-a făcut prin încercări de încovoiere în trei puncte pe probe cu creștătură. Forma și dimensiunile probelor utilizate este prezentată în figura 3.39. Datele din tabele sunt trecute conform acestor notații din figura de mai jos.

Încercările mecanice de încovoiere ale spumelor s-au realizat în două regimuri:

- regim static;
- regim dinamic.

### 3.5.1. Determinarea tenacității la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte în regim static

Ruperea fragilă la tracțiune este diferită față de degradarea la compresiune. La compresiune spuma se strivește progresiv, iar în cazul tracțiunii spuma se rupe prin propagarea unei singure fisuri. Spumele fragile (aici fiind incluse spumele rigide polimerice), în cazul tracțiunii se comportă liniar elastic până la rupere, deci ruperea prin tracțiune poate fi tratată cu ajutorul conceptelor din mecanica ruperii liniar elastică.

Factorul de intensitate a tensiunii, reprezintă "valoarea părții principale a singularității câmpului de tensiune într-un corp solid liniar elastic, în vârful unei discontinuități de forma fisurii", și se notează cu  $K$ .

Scopul încercării este determinarea valorii critice a factorului de intensitate a tensiunii  $K_{IC}$  în condițiile stării plane de deformație și deplasarea flancurilor fisurii după Modul I. Principiul încercării constă în aplicarea lentă, continuă, progresivă și fără șocuri a unei solicitări de încovoiere, asupra unei epruvete cu o creștătură. Epruvetele pe care se determină tenacitatea la rupere  $K_{IC}$  sunt epruvete de încovoiere cu o creștătură laterală.

Solicitarea la încovoiere a epruvetelor se produce cu ajutorul unui dispozitiv cu trei role din care două sunt de rezemare, iar una este cea prin care se aplică încărcarea. Distanța dintre centrele celor două role de rezemare trebuie să satisfacă condiția  $S=4W$ . Pentru solicitarea de încovoiere, așezarea epruvetei se face ca în figura 3.34, respectând condiția ca sarcina aplicată să fie la mijlocul distanței dintre centrele celor două role și să aibă o abatere de maximum 0.5% din această distanță, iar abaterea de la paralelism dintre axele rolelor de rezemare și axa creștăturii epruvetei să nu depășească  $2^0$ .

Calculul valorii factorului de intensitate al tensiunii  $K_Q$  se obține conform figurii 3.40, [ASTM D5045-99].

Valoarea calculată a tenacității la rupere se determină pe baza forței critice  $P_Q$ , care se determină astfel: se trasează o dreaptă (AB) având panta egală cu porțiunea liniară a curbei experimentale; se trasează o secantă (AB') având panta cu 5% mai mică decât panta porțiunii inițiale a înregistrării forță-deplasare (AB). Forța ce corespunde intersecției secantei AB' cu curba înregistrată se notează  $P_Q$ . Dacă forța maximă pe care proba a suportat-o,  $P_{max}$ , se încadrează între liniile (AB) și (AB'), se va utiliza  $P_{max}$  pentru a calcula  $K_Q$ . În cazul în care forța maximă  $P_{max}$  se află în afara liniilor (AB) și (AB'), se va utiliza forța  $P_Q$  dată de intersecția dreptei (AB') și curba experimentală pentru calculul lui  $K_Q$ . Pe de altă parte, dacă  $P_{max}/P_Q < 1.1$  se va utiliza  $P_Q$  în determinarea lui  $K_Q$ , iar dacă  $P_{max}/P_Q > 1.1$ , testul nu este valid, [Linul și Marșavina (2011c), Linul și alții (2011b)].



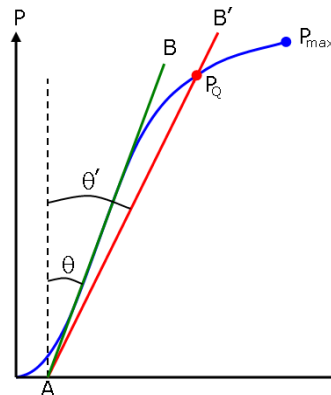


Fig. 3.40. Curba forță-deplasare. Determinarea forței critice

Neliniaritățile ce apar pe porțiunea inițială a înregistrării se neglijează. Calculul lui  $K_Q$  pentru  $L/W=4$  se face astfel:

$$K_Q = \left( \frac{P_Q}{BW^{1/2}} \right) f\left(\frac{a}{W}\right), \text{ cu raportul } 0 < x = \frac{a}{W} < 1 \quad (3.14)$$

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)]}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (3.15)$$

unde  $P_Q$  - este forța de calcul;  $b$  - grosimea epruvetei;  $W$  - înălțimea epruvetei;  $a$  - lungimea fisurii.

După calculul valorii  $K_Q$  se verifică dacă:

$$a, B, (W - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.16)$$

În cazul respectării condiției (3.16) valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii  $K_{IC}$  se consideră ca fiind egală cu valoarea calculată a factorului de intensitate a tensiunii  $K_Q$ , deci:

$$K_{IC} = K_Q \quad (3.17)$$

Dacă nu se respectă condiția (3.17), încercarea trebuie reluată pe epruvete de dimensiuni mai mari, care să respecte condițiile stării plane de deformație. Dimensiunile epruvetei se aleg astfel încât grosimea minimă a epruvetei  $B$  și lungimea fisurii  $a$ , să satisfacă relația (3.16).

### 3.5.1.1. Descrierea mașinii de încercat

Încercările pentru determinarea tenacității la rupere în regim static s-au efectuat în Laboratorul „Ștefan Nădășan”, al Catedrei de Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara pe o mașină de încercări de tracțiune-compresiune Zwick Roell 005 de 5 kN, (figura 3.41), excepție făcând încercările pentru determinarea efectului de scară care s-au realizat în Laboratorul din Lublin menționat mai sus pe o mașină de încercări de tracțiune-compresiune MTS de 2 kN, (figura 3.42). Testele s-au făcut la temperatura camerei, ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ), folosind epruvete cu forma și dimensiunile prezentate în figura 3.39.

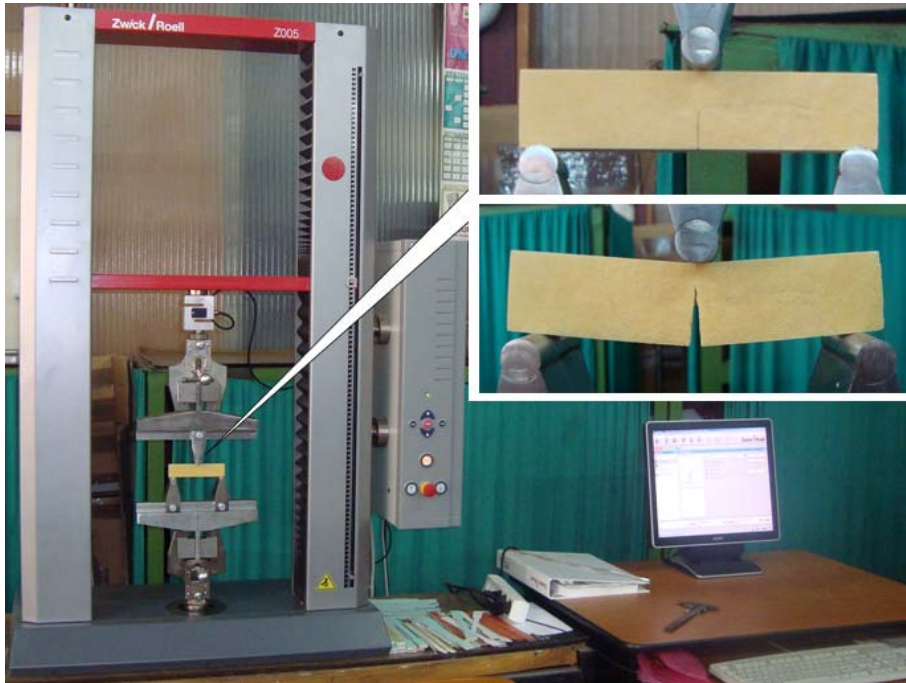


Fig. 3.41. Imaginea de ansamblu a mașinii universale pentru încercări de tracțiune-compresiune Zwick Roell 005 de 5 kN

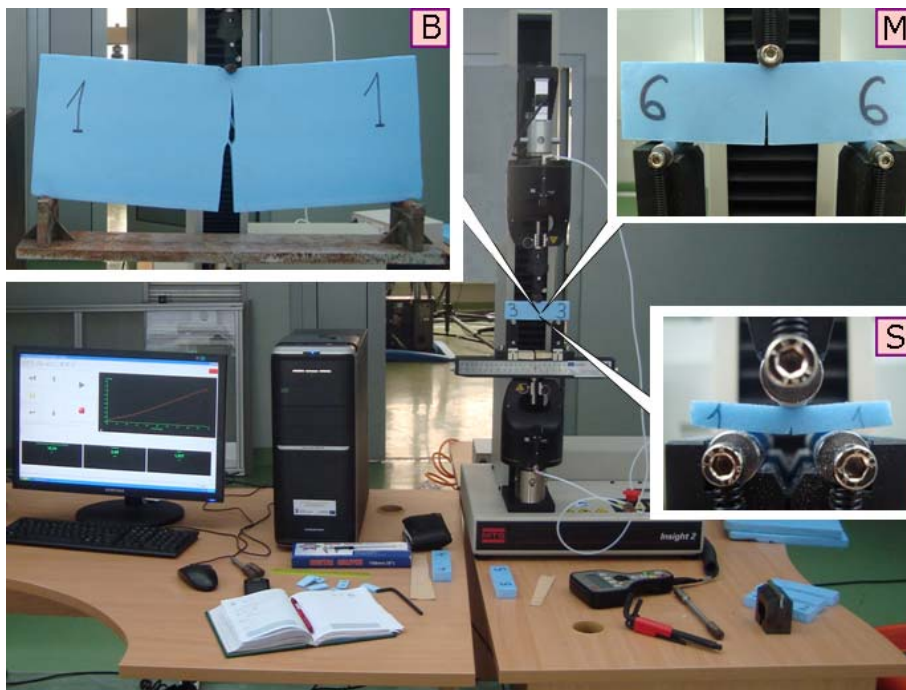


Fig. 3.42. Imaginea de ansamblu a mașinii universale pentru încercări de tracțiune-compresiune MTS de 2kN

Pentru determinarea tenacității la rupere spumele poliuretanicice rigide utilizate în programul experimental au avut următoarele densități: 40, 80, 120, 140, 160, 200, 300, 480, 540, 600 și 620  $\text{kg/m}^3$ . Forma constructivă a epruvetelor utilizate este arătată în figura 3.43.



Fig. 3.43. Epruvetele utilizate în cadrul încercărilor experimentale de încovoiere în trei puncte pentru: influența densității (a-k); influența vitezei de încărcare, (d); influența planului de formare (a); efectul de scară (m).

Probele au fost supuse unei solicitări la încovoiere cu o viteză de încărcare de 2 mm/min, excepție făcând probele pentru determinarea influenței vitezei de încărcare, unde s-au utilizat viteze de încărcare diferite: 2, 20, 200 respectiv 400 mm/min.

Pentru fiecare tip de încercare s-au folosit câte 5 epruvete, iar conform standardului ASTM D 5045-99 s-a ținut cont de faptul că forța trebuie să acționeze exact pe direcția creșterii.

Probele au fost realizate atât în Timișoara, (spumele cu densitate mică), cât și în Laboratorul din Lublin, (spumele cu densitate mare). Probele din spumă de densitate mică au fost tăiate cu ajutorul unei lame cu o grosime de 0.6 mm, iar probele de densitate mare au fost realizate cu ajutorul unei mașini de tăiat Secotom 10, prezentată în figura 3.44.



Fig. 3.44. Mașina de tăiat Secotom 10

De asemenea și în acest caz grosimea discului a fost de 0.6 mm.

### 3.5.1.2. Rezultate experimentale obținute

La încercările de determinare a tenacității la rupere s-au investigat factorii care influențează comportamentul spumelor poliuretanicice rigide:

- influența densității;
- influența vitezei de încărcare ;
- influența planului de formare;
- efectul de scară.

3.5.1.2.1. Influența densității

În urma efectuării încercărilor de încovoiere s-a determinat forța critică cu ajutorul căreia s-a determinat tenacitatea la rupere. Valorile medii obținute în acest caz sunt prezentate în Tabelul 3.10., iar în Tabelele A.12, A.13 și A.14 din Anexe sunt prezentate toate valorile pentru fiecare încercare. Aceste rezultate au fost obținute în urma unei încărcări paralele cu planul de formare la o temperatură de 20°C, [Linul și alții (2009), Marșavina și Linul (2010)].

Tabelul 3.10. Valorile medii ale tenacității la rupere în funcție de densitate

Densitatea $P$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța critică, $P$ [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Tensiunea de curgere, $\sigma_{ys}$ [MPa]
	Lățimea $B$ [mm]	Înălțimea $W$ [mm]	Deschiderea $S$ [mm]	Lungimea Fisurii, $a$ [mm]			
40	13.87	25.55	100	12	7.31	0.03	0.38
80	13.19	24.90	100	12	12.33	0.06	0.48
120	13.01	24.99	100	12	24.85	0.12	0.89
140	13.82	25.85	100	12	36.07	0.16	1.05
160	13.56	30.03	75	12	54.96	0.21	3.00
200	11.61	25.20	100	12	73.39	0.39	4.14
300	13.49	29.99	75	13	158.46	0.59	5.00
480	13.55	29.98	75	13	297.37	1.11	12.0
540	13.51	29.98	75	13	333.97	1.25	20.0
600	13.57	29.99	75	13	368.35	1.34	22.0
620	13.57	30.10	75	13	394.49	1.46	24.0

De asemenea, din datele furnizate de mașina de încercat, s-au trasat diagramele caracteristice convenționale pentru epruvetele încercate,  $F = f(\Delta l)$  [Marșavina și Linul (2010), Linul și alții (2009), Linul și Marșavina (2011a)].

În figura 3.45 este prezentată o comparație a curbelor tipice forță-deplasare pentru toate cele 11 densități ale spumei poliuretanică, iar figura 3.46 prezintă variația tenacității la rupere funcție de densitate.

De pe această diagramă se poate observa că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a tenacității la rupere, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în comportarea la rupere a spumelor poliuretanică rigide. O corelație liniară între tenacitatea la rupere și densitate poate fi identificată.

Spumele poliuretanică rigide prezintă o rupere fragilă, fără deformații plastice așa cum a fost amintit mai sus, (rupere de Tip A - figura 3.38 și Tabelul 3.9).

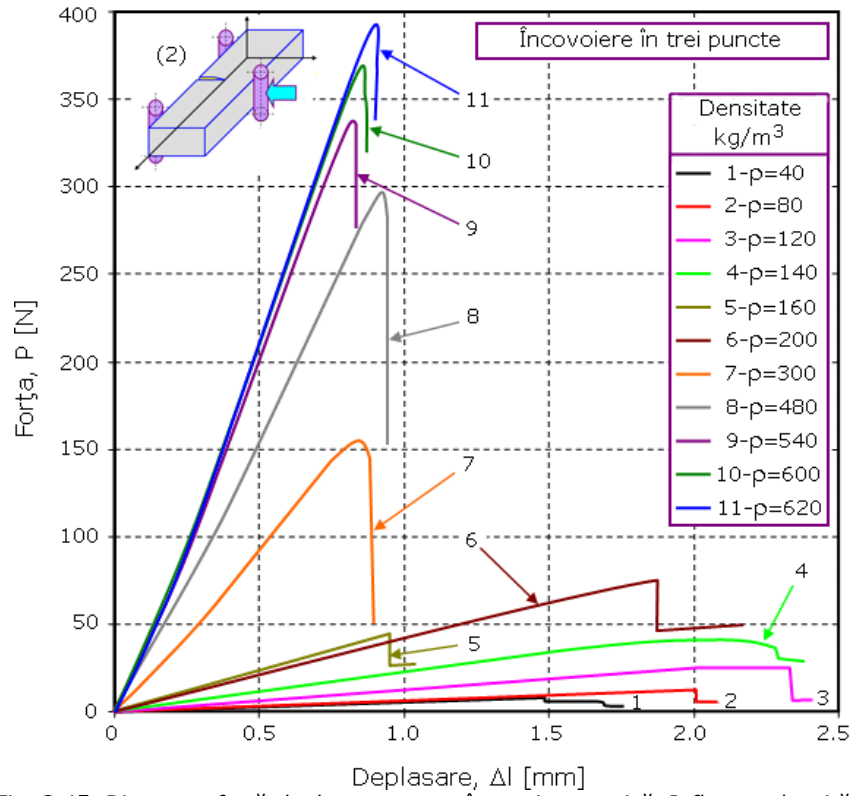


Fig. 3.45. Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența densității

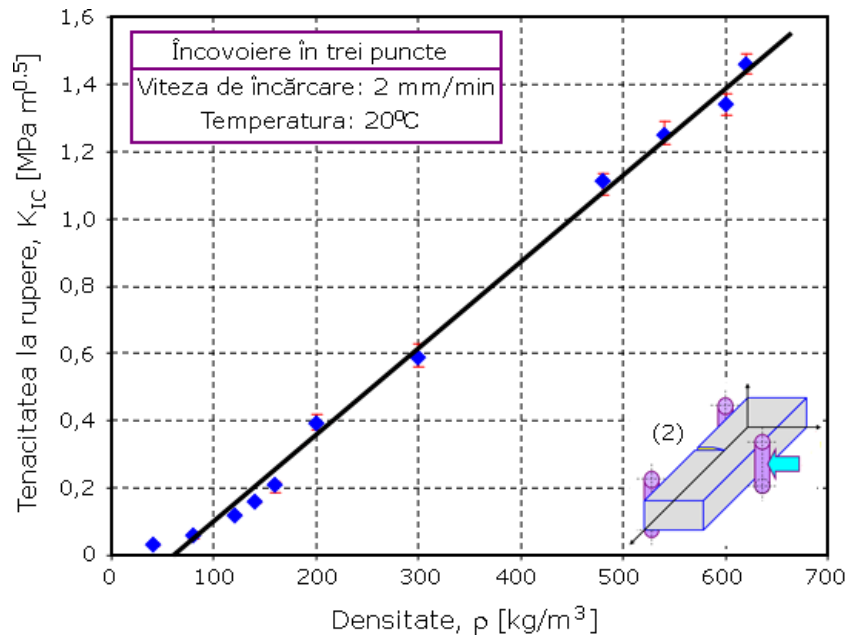


Fig. 3.46. Variația tenacității la rupere funcție de densitate

3.5.1.2.2. Influența vitezei de încărcare

Tabelul 3.11 prezintă valorile medii obținute pentru o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , funcție de viteza de încărcare, iar Tabelul A.15 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare, [Linul și Marșavina (2011c)]

Tabelul 3.11. Valorile medii ale tenacității la rupere în funcție de viteza de încărcare

Densitatea $P, [\text{Kg/m}^3]$	Dimensiunile probelor				Viteza de încărcare, [mm/min]	Forța critică, $P$ [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	$2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$
	Lățimea $B$ [mm]	Înălțimea $W$ [mm]	Deschiderea $S$ [mm]	Lungimea Fisurii, $a$ [mm]				
140	13.9	24.9	100	12	2	36.07	0.156	7.9
	13.1	25.0			20	30.64	0.149	6.9
	14.6	25.1			200	28.50	0.137	4.7
	12.8	24.9			400	25.06	0.130	4.9

Figura 3.47 prezintă diagrama forță-deplasare pentru spuma studiată, iar figura 3.48 prezintă variația tenacității la rupere funcție de viteza de încărcare. Din această diagramă se observă o tendință de ușoară scădere a tenacității cu viteza de solicitare.

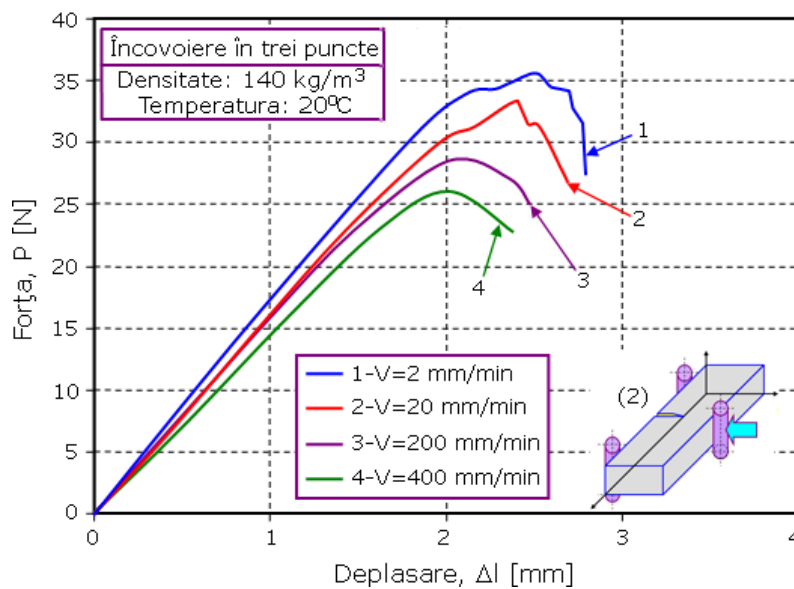


Fig. 3.47. Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența vitezei de încărcare

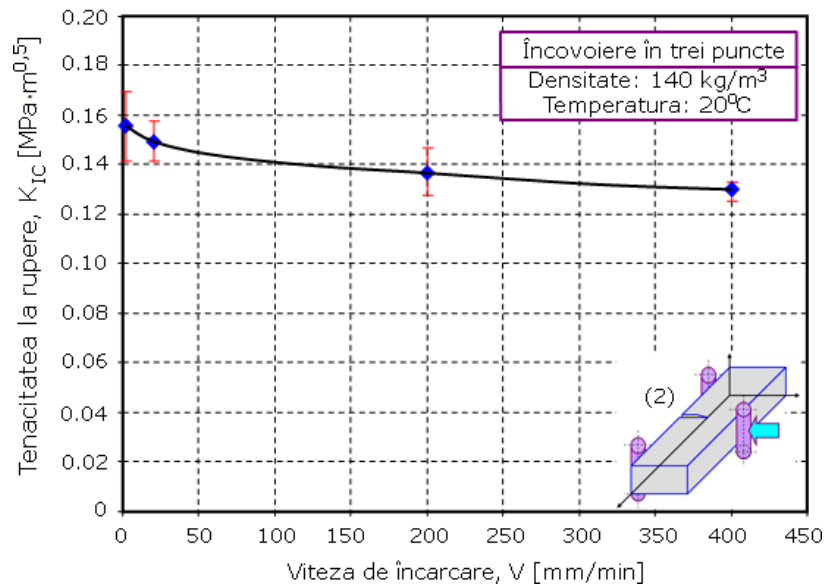


Fig. 3.48. Variația tenacității la rupere funcție de viteza de încărcare

### 3.5.1.2.3. Influența planului de formare

În figura 3.49 este prezentat modul de prelevare al probelor dintr-o placă de semifabricat de secțiune dreptunghiulară, respectiv modul de acționare al forței funcție de planul de formare al spumei, [Chincea (2010), Marșavina (2010a), Tan și alții (2005), Kabir și alții (2006), Jin și alții (2007), Linul și alții (2011b)], iar în figura 3.50 este prezentată influența acestui plan de formare și a direcției forței asupra tenacității la rupere, [Linul și Marșavina (2011c)].

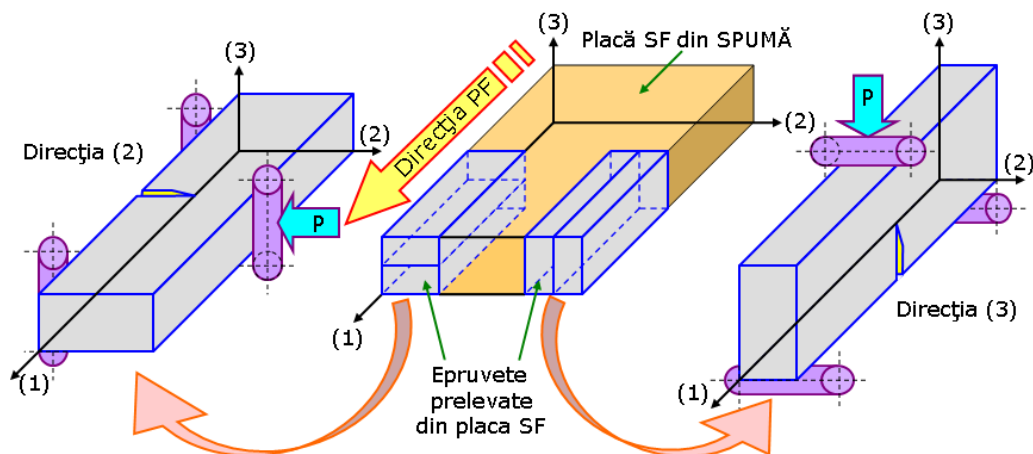


Fig. 3.49. Modul de prelevare al epruvetelor dintr-o placă pentru teste 3PB

În cazul acestei teze toate încercările s-au realizat fie pe direcția (2) de încărcare-plan paralel cu planul de formare, fie pe direcția (3) de încărcare-plan perpendicular pe planul de formare.



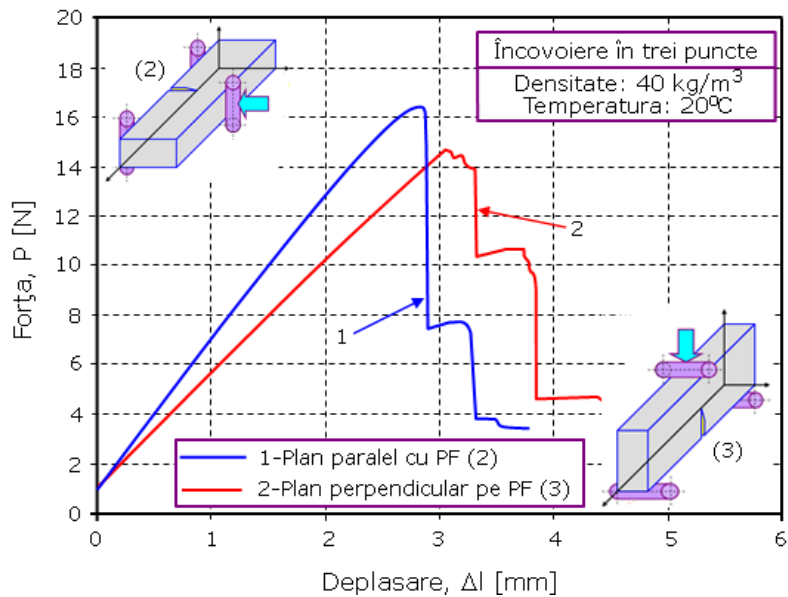


Fig. 3.50. Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența direcției de încărcare

Efectul direcției de încărcare evidențiază comportamentul anizotrop al spumei, figura 3.50. Valorile parametrilor geometrici, respectiv valorile medii ale tenacității la rupere obținute sunt prezentate în Tabelul 3.12, iar Tabelul A.16 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare.

În acest studiu al influenței planului de formare s-a utilizat o spumă cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>. Încercările experimentale s-au realizat la temperatura ambiantă, (20°C), la o viteză de încărcare de 2 mm/min.

Tabelul 3.12. Valorile medii ale tenacității la rupere funcție de planul de formare

Densitatea $\rho$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Direcția de încărcare	Forța critică, P [N]	Tenacitatea la rupere $K_{Ic}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	$2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$
	Lățimea B [mm]	Înălțimea W [mm]	Deschiderea S [mm]	Lungimea Fisurii, a [mm]				
40	25.5	49.4	180	25.0	(2)	16.4	0.0279	20.1
	25.1	50.2			(3)	14.2	0.0276	15.1

După cum se observă în Tabelul 3.12, spuma studiată nu prezintă o influență semnificativă a planului de formare, tenacitatea la rupere având o valoare de 0.0279 MPa m<sup>0.5</sup> pentru un plan de încărcare paralel cu planul de formare, aceasta scăzând până la 0.0276 MPa m<sup>0.5</sup> pentru un plan perpendicular pe planul de formare.

3.5.1.2.4. Efectul de scară

Ruperea spumelor poliuretanică rigide este fragilă, după cum se poate observa foarte ușor din testele realizate pe epruvete crestate dar și de rezultatele raportate de Zenkert (1989) și Zenkert și Bäcklund (1989) (și, de asemenea, parțial a fost sugerat și de către Olurin și alții, (2001) și Fleck și alții (2001)). Este de așteptat ca ruperea fragilă, în general, trebuie să prezinte un efect de scară pronunțat, [Bažant și Planas, (1998); Bažant, (2002)]. Un efect de scară pentru grinzi crestate din spumă a fost propus de către Zenkert și Bäcklund încă din 1989.

Cu toate acestea, efectul de scară este important pentru extrapolarea datelor din laborator pentru structuri reale foarte mari, cum este exemplul bărcilor, nu a fost suficient explorat. Cea mai concludentă descriere analitică a efectului de scară pentru spume poliuretanică este realizată de către Zdenek și alții (2003), care, prezintă formule simple ușor de utilizat în proiectare și care ar putea fi exploatate pentru identificarea convenabilă a proprietăților de material măsurate cu ajutorul efectului de scară pe epruvete crestate din spumă. Ei investighează dacă legea efectului de scară pentru structurile cvasi-fragile cu fisuri, propusă de către Bažant (1984), extinsă de către Bažant și Kazemi (1990), și verificată pentru beton, pietre, gheață, ceramice, fibre compozite și alte materiale cvasi-fragile, (Bažant și Planas, (1998); Bažant, (2002)), poate fi aplicată spumelor polimerice rigide pentru identificarea parametrilor de material. De asemenea ei au studiat legea efectului de scară pentru ruperile rezultate în urma inițierii unor fisuri.

Efectul de scară s-a realizat pe epruvete din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , care prezintă celule închise și este utilizată pe scară largă ca și miez în panourile de tip sandwich. Toate epruvetele au fost tăiate din aceeași placă și au prezentat aceeași grosime  $B=20 \text{ mm}$ . Pentru a determina efectul de scară pentru Modul I de rupere, parametrii geometrici selectați au fost similari în două direcții cu raportul lungime/lățime ales de 5:2. Lățimile probelor au fost  $W=5.33, 36.89$  și  $256 \text{ mm}$  (figura 3.43m). Crestăturile au avut o lungime de  $0.4 W$  și au fost tăiate cu o lamă de grosime  $0.6 \text{ mm}$ .

Încercările experimentale s-au realizat pe o mașină de teste tip MTS de  $2 \text{ kN}$ , ca în figura 3.42. Parametrii geometrici, forțele critice obținute pe baza înregistrărilor forță-deplasare și valorile tenacității la rupere sunt prezentate în Tabelul 3.13, iar Tabelul A.17 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare, [Linul și alții (2011b)].

Tabelul 3.13. Parametrii geometrici și rezultatele medii ale tenacității la rupere. Efectul de scară

Tipul epruvetei	Densitatea $\rho$ , [ $\text{Kg/m}^3$ ]	Dimensiunile probelor				Direcția de încărcare	Forța critică, $P$ [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [ $\text{MPam}^{0.5}$ ]	Tensiunea nominală $\sigma_N$ [MPa]
		Lățimea $B$ [mm]	Înălțimea $W$ [mm]	Deschiderea $S$ [mm]	Lungimea Fisurii, $a$ [mm]				
„S”	40	20	5.33	13.33	2.13	(2)	8.79	0.048	0.083
„M”			36.89	92.22	14.76		44.87	0.093	0.061
„B”			256.0	640.0	102.4		210.17	0.165	0.041

Efectul de scară poate fi definit ca o dependență între rezistența nominală,  $\sigma_N = P_{\max}/bW$ , funcție de mărimea caracteristică a epruvetei (sau dimensiune)  $W$  (în acest caz este luată ca fiind lățimea epruvetei). Astfel, rezistența nominală este un parametru legat de forța maximă, având dimensiunea de tensiune. În analiza limitei plastice precum și celei elastice, rezistența limită,  $\sigma_N$  este în general independentă de  $W$ , care este evident din faptul că formularea matematică a acestor teorii nu conține nici o lungime caracteristică de material.

Efectul de scară este cel mai bine vizualizat într-o reprezentare logaritmică a rezistenței nominale  $\log \sigma_N$  funcție de lățimea probei  $\log W$ . Acest lucru este indicat în figura 3.51.

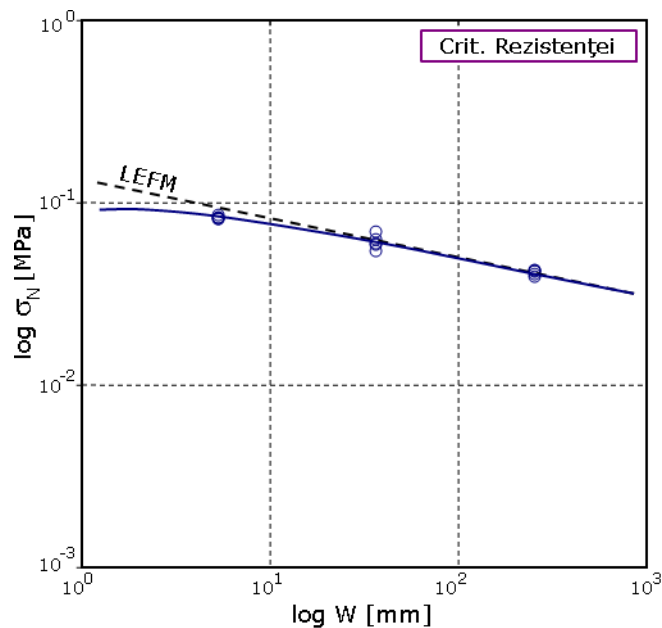


Fig. 3.51. Rezistența nominală funcție de parametrul geometric  $W$ . Efectul de scară rezultat în urma solicitării de încovoiere în trei puncte pentru o spumă

Ar trebui remarcat faptul că dacă comportamentul spumei ar fi ductil, după teoria plasticității care nu prezintă efect de scară, efectul de scară din figura 3.51 ar trebui să fie orizontal.

Până de curând, efectul de scară a fost atribuit distribuției aleatoare din teoria statistică Weibull. În plus, utilizarea teoriei Weibull este justificată doar în cazul în care ruperea este declanșată de un singur defect microscopic apărut aleatoriu într-un volum mare, în timp ce în cazul nostru orice defect semnificativ trebuie să fie foarte aproape de vârful fisurii, (mai multe detalii despre acest aspect sunt tratate de către Bažant, 2002). Deci, media efectului de scară trebuie să fie determinist (variația statistică despre această medie este o altă problemă).

Sunt trei tipuri de efecte de scară deterministe, (energetice) care trebuie distinse, [Bažant, (2002)]. Tipul I este cauzat de creștături relativ mari sau creștături de oboseală formate înaintea încărcării maxime, în timp ce Tipul II se produce la inițierea fisurii și este cauzat de o zonă destul de mare datorată procesului ruperii. Tipul III este cauzat de creșterea mare și stabilă a fisurii în structurile cu geometrie inițial negativă; este destul de similar cu Tipul II.

Dacă ruperea spumei respectă mecanica ruperii liniar elastică, (LEFM), efectul de scară reprezentat logaritmically ar trebui să fie o linie dreaptă cu panta descendentă de  $-1/2$ , după cum se poate vedea în figura 3.51. Rezultatele sunt foarte apropiate de această linie, ceea ce înseamnă că pe scara testelor (și desigur și pe alte scări mai mari), materialul se comportă într-un mod aproape fragil. Termenul "fragil" trebuie înțeles ca și o respectare întocmai a LEFM, în tip ce termenul "cvasi-fragil" se referă la o rupere neliniară coezivă prin înmuiere (neductilă).

Figura 3.52 prezintă forma și dimensiunile probelor utilizate în cadrul studierii efectului de scară, iar în figura 3.53 sunt prezentate curbele forță-deplasare aferente obținute în urma încercărilor de încovoiere.

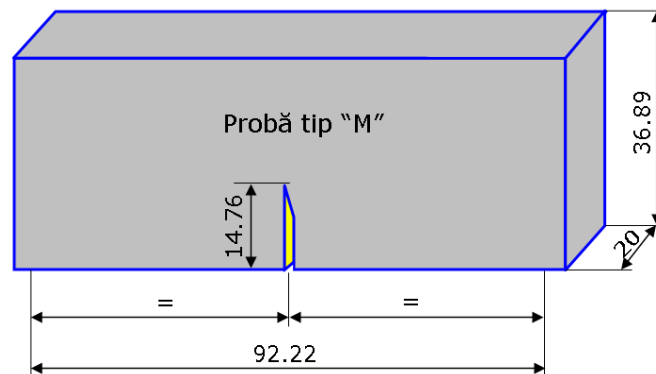


Fig. 3.52. Forma și dimensiunile probelor utilizate pentru studiul efectului de scară

Încercările experimentale s-au realizat la o viteză de încălzire de 2 mm/min, forța acționând într-un plan paralel cu planul de formare al spumei.

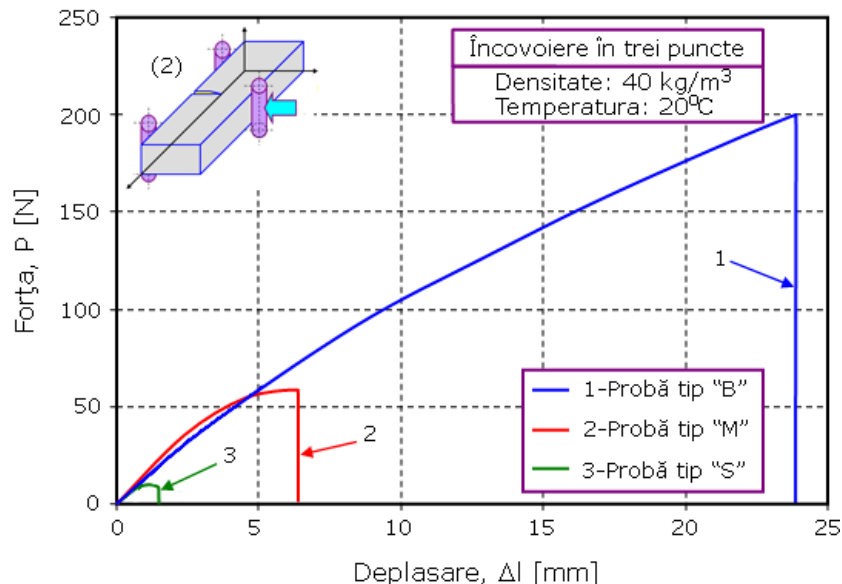


Fig. 3.53. Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Efectul de scară.

După cum se poate observa în figura 3.53 probele au prezentat o rupere fragilă, fără deformații plastice.

În acest caz probele au prezentat aceeași lățime  $B$  (20 mm), dar valori diferite pentru înălțimea probei,  $W$ , deschiderea dintre reazeme,  $S$  și lungimea fisurii,  $a$ .

În figura 3.54 este prezentată variația tenacității la rupere funcție de lungimea fisurii,  $a$ .

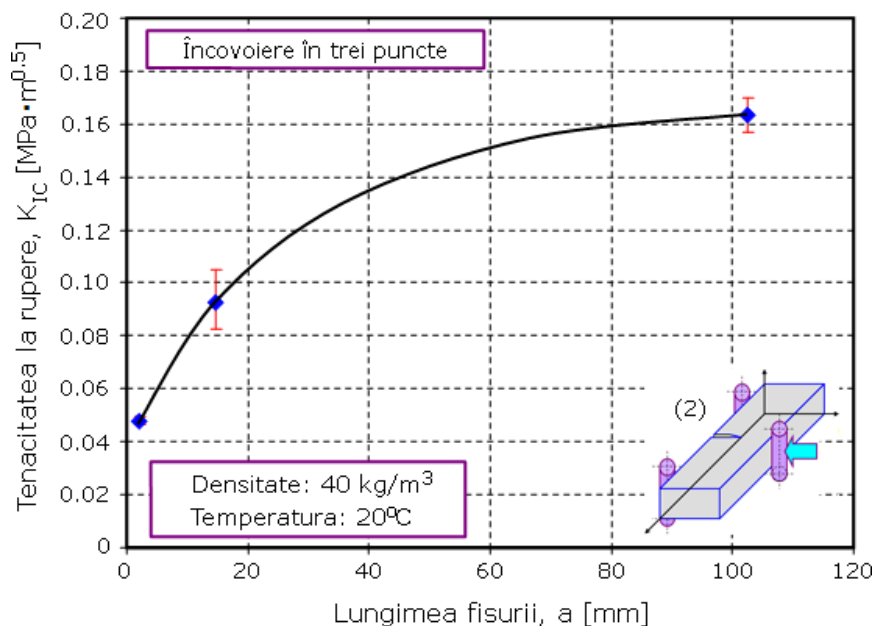


Fig. 3.54. Variația tenacității la rupere funcție de lungimea fisurii

Se poate constata ușor că efectul de scară aduce o influență majoră asupra tenacității la rupere, aceasta variind de la valoarea medie de  $0.048 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru epruvetele de dimensiuni mici (Probe tip „S”),  $0.093 \text{ MPa m}^{0.5}$  la probele de dimensiuni medii (Probe tip „M”), ajungând până la valoarea medie de  $0.165 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru probele de dimensiuni mari (Probe tip „B”).

### 3.5.1.3. Comparație între rezultatele obținute ale tenacității la rupere și bibliografie

Tenacitatea la rupere pentru spumele polimerice fragile a fost determinată experimental de către Fowlkes, (1974); McIntyre și Anderson, (1979); Morgan și alții, (1981), Zwissler și Adams, (1983); Maiti și alții, (1984b); Brezny și Green, (1989b) și Gibson și Ashby, (1997). În figura 3.55 este prezentată o comparație a rezultatelor obținute în cadrul acestei teze cu rezultate din literatura de specialitate.

Din figura 3.55 se poate observa o corelare bună a rezultatelor obținute cu cele prezente în literatură.

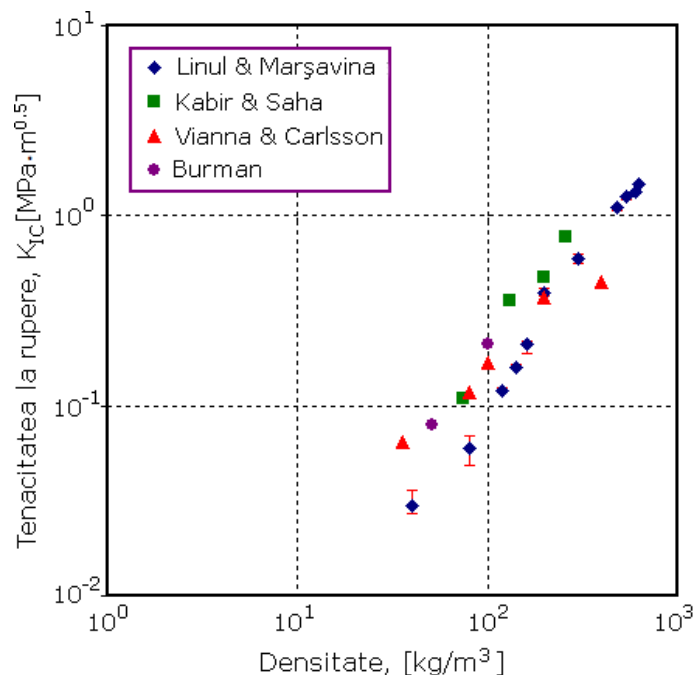


Fig. 3.55. Tenacitatea la rupere funcție de densitate. Comparație cu rezultate din literatura

### 3.5.2. Determinarea tenacității la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte în regim dinamic

Tenacitatea la rupere în regim dinamic a fost investigată de către Kabir și alții, (2006), ei găsind pentru o spuma PVC cu densitatea de  $260 \text{ kg/m}^3$ , o valoare a tenacității la rupere de  $2.74 \text{ MPa m}^{0.5}$ , această valoare fiind de 3.75 ori mai mare decât cea obținută în regim static pentru același tip de spumă. Ei au constatat că ruperea a avut loc în Modul I și că este fragilă, fără deformații plastice. Mills și Kang (1994) au utilizat epruvete compacte de tracțiune pentru determinarea tenacității la rupere în regim dinamic, iar Mills, (2007), a propus de asemenea o corelare între tenacitatea la rupere în regim dinamic și densitatea spumei.

De asemenea, Marşavina și Sadowski (2008) au determinat valoarea tenacității la rupere în regim dinamic pentru o spumă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$  în acest sens spuma a fost studiată atât neimpregnată, cât și impregnată cu poliester respectiv epoxi.

#### 3.5.2.1. Descrierea mașinii de încercat și a probelor utilizate

Testele de încovoiere în trei puncte în regim dinamic s-au efectuat în Laboratorul de Rezistența Materialelor din cadrul Universității de Tehnice din Lublin, Polonia conform standardelor în vigoare, [EN ISO 179-1, EN ISO 179-2].

Pentru determinarea tenacității în regim dinamic s-a utilizat un ciocan Charpy instrumentat, prezentat în figura 3.56. Ciocanul a prezentat următoarele caracteristici: masa  $2.04 \text{ kg}$ , lungimea  $0.386 \text{ m}$ , înălțimea de cădere  $0.742 \text{ m}$ , unghiul maxim de deschidere  $157.32^\circ$ , energia  $14.847 \text{ J}$ , viteza de impact  $3.815 \text{ m/s}$ . Testele s-au efectuat la temperatura camerei.



Fig. 3.56. Ciocanul Charpy

În cadrul programului experimental s-au utilizat epruvete din spumă poliuretanică rigidă (40, 80, 120 și 140 kg/m<sup>3</sup>), cu crestături ca în figura 3.57. De asemenea, s-au utilizat următoarele deschideri între reazeme: 70, 80, 90 și 100 mm.

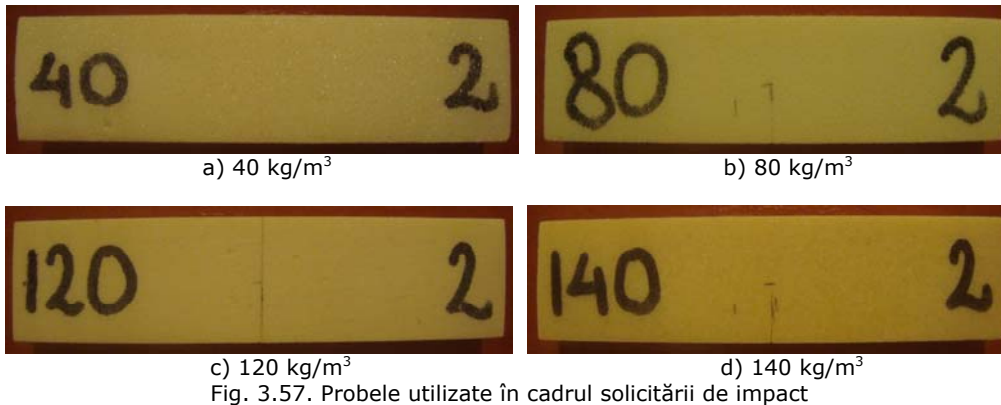


Fig. 3.57. Probele utilizate în cadrul solicitării de impact

### 3.5.2.2. Rezultate experimentale obținute

Forța în timp  $F(t)$  a fost înregistrată utilizând un traductor de forță încorporat în ciocan.

În urma efectuării încercărilor de încovoiere dinamică s-a determinat forța critică cu ajutorul căreia s-a determinat tenacitatea la rupere. Valorile medii

obținute în acest caz sunt prezentate în Tabelul 3.14, iar în Tabelul A.18 din Anexe sunt prezentate toate valorile pentru fiecare încercare. Aceste rezultate au fost obținute în urma unei încărcări paralele cu planul de formare – direcția (2) - la o temperatură de 20°C.

Tabelul 3.14. Valorile medii ale tenacității la rupere în regim dinamic în funcție de densitate

Densitatea $\rho$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța critică, P [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Energia W [J]
	Lățimea B [mm]	Înălțimea W [mm]	Deschiderea S [mm]	Lungimea Fisurii, a [mm]			
40	13.48	25.39	100	12	14.360	0.066	0.084
80	13.91	25.54			29.120	0.129	0.110
120	13.04	25.00			40.606	0.200	0.140
140	13.02	25.70			54.600	0.253	0.196

De asemenea, din datele furnizate de mașina de încercat, s-au trasat diagramele caracteristice convenționale pentru epruvetele încercate,  $F = f(\Delta l)$ .

În figura 3.58 este prezentată o comparație a curbelor tipice forță-deplasare pentru toate cele 4 densități ale spumei poliuretanică, iar figura 3.59 prezintă variația tenacității la rupere funcție de densitate.

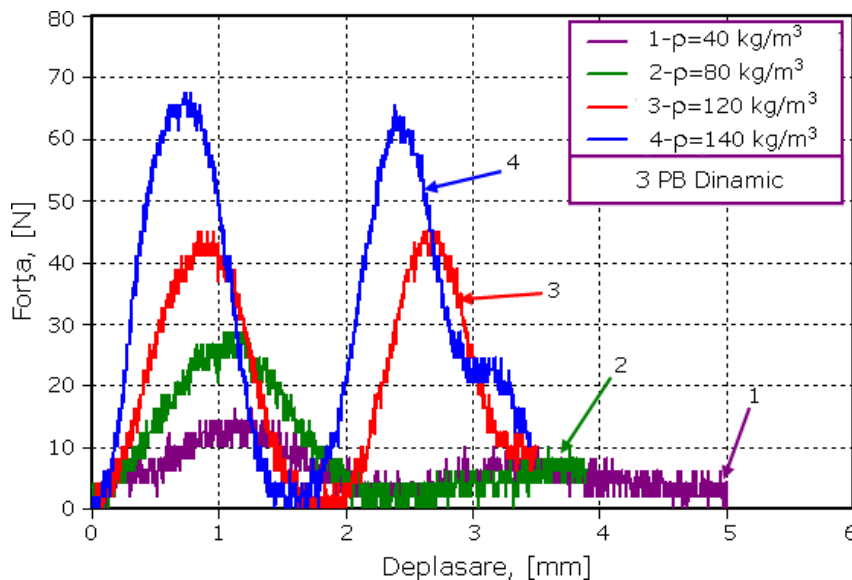


Fig. 3.58. Diagrama forță-deplasare pentru încovoiere statică. Influența densității

După cum se poate observa și în figura de mai sus, densitatea are un rol semnificativ asupra forței de rupere, aceasta crescând odată cu creșterea densității.



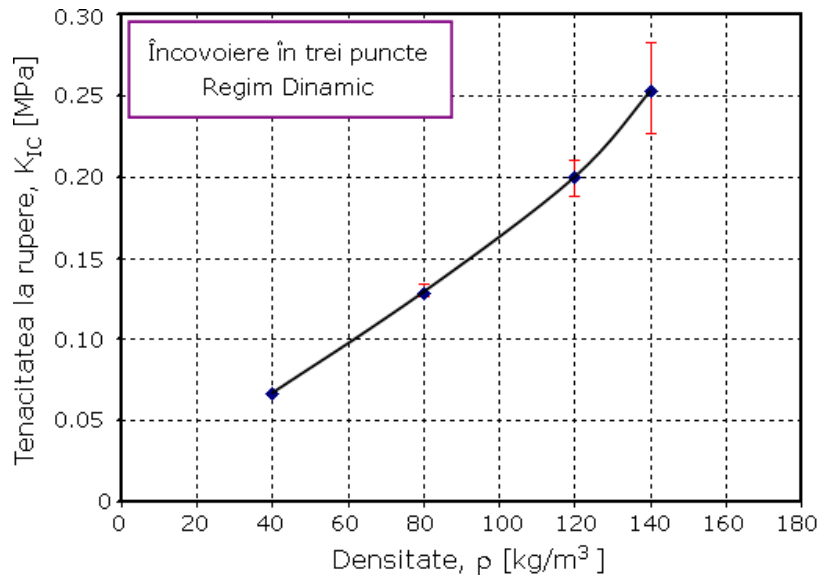


Fig. 3.59. Variația tenacității la rupere funcție de densitate

De pe această diagramă se poate observa că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în determinarea tenacității la rupere. Spumele poliuretanicice rigide prezintă o rupere fragilă, fără deformații plastice așa cum a fost amintit mai sus, (rupere de Tip A) .

În figura 3.60 este prezentată variația energiei în timp funcție de densitate.

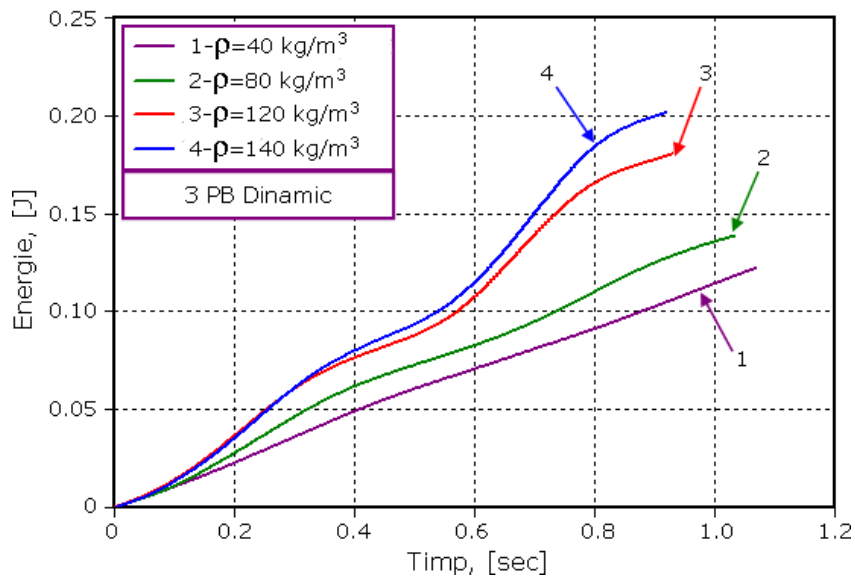


Fig. 3.60. Variația energiei în timp funcție de densitate

De pe diagrama de mai sus se poate observa că energia crește odată cu creșterea densității.

### 3.5.3. Comparație între tenacitatea la rupere statică și cea dinamică

În figura 3.61 este prezentată o comparație a valorilor tenacității la rupere obținute atât în regim static cât și în regim dinamic. Încercările experimentale s-au efectuat pe mai multe densități ale spumei pe epruvete cu creștături solicitate la încovoiere în trei puncte, la o viteză de 2 mm/min pentru încercările statice, respectiv 3.815 m/s pentru încercările dinamice. Atât în regim static cât și în regim dinamic temperatura utilizată a fost de 20°C.

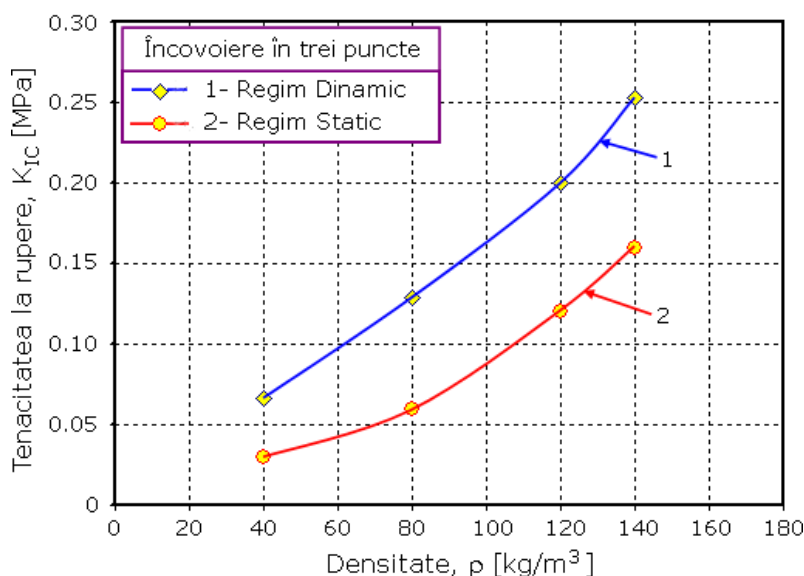


Fig. 3.61. Variația tenacității la rupere în regim static și dinamic

După cum se poate observa și în figura 3.61, spuma poliuretanică rigidă se comportă diferit în cele două regimuri. Tenacitatea la rupere în regim dinamic este aproximativ de două ori mai mare decât cea în regim static.

### 3.6. Analiza microstructurală a suprafețelor de rupere rezultate în urma încercărilor de compresiune și încovoiere în trei puncte

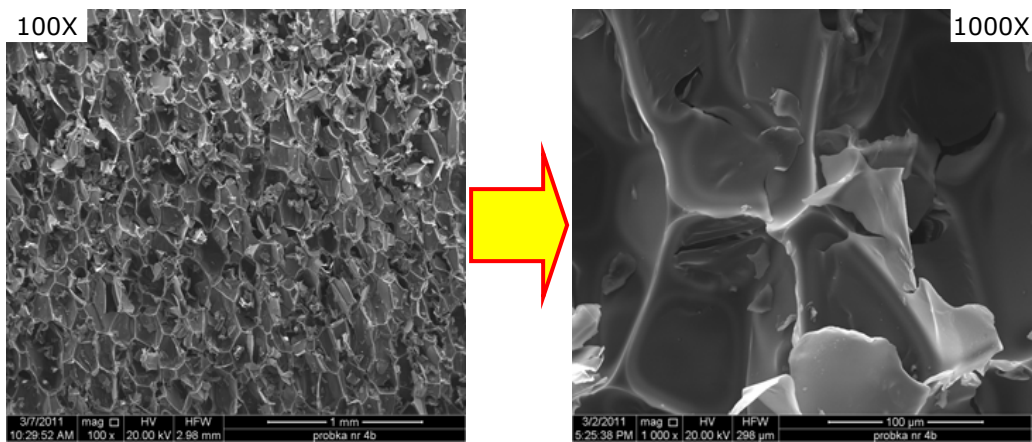
Analiza microstructurală a materialelor utilizate s-a realizat în Laboratorul Universității Tehnice din Lublin. Aparatura utilizată pentru caracterizarea structurală a constat din microscopul electronic cu baleiaj prezentat în figura 3.3.

#### 3.6.1. Analiza microstructurală rezultată în urma testelor de compresiune

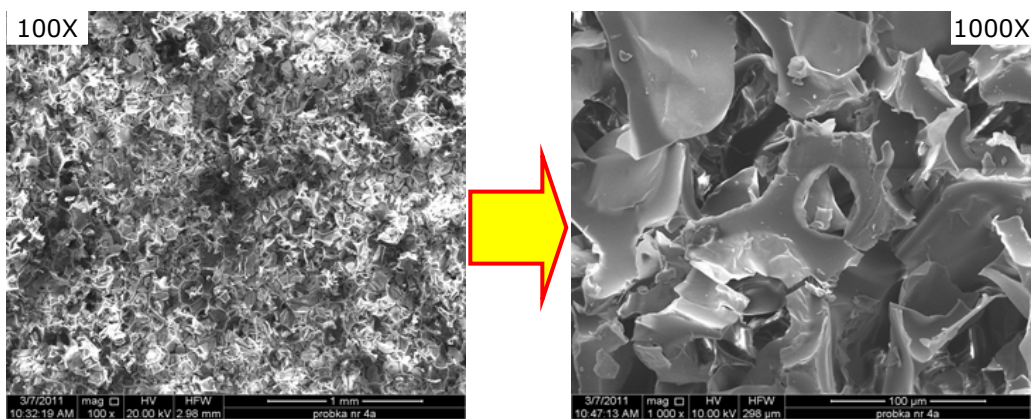
În figura 3.62 este prezentată forma celulelor rezultată în urma testelor de compresiune pentru spumele analizate. Figura 3.62 prezintă o comparație între forma celulelor rezultată în urma încărcării de compresiune într-un plan paralel cu

3.6 – Analiza microstructurală a suprafețelor de rupere 161

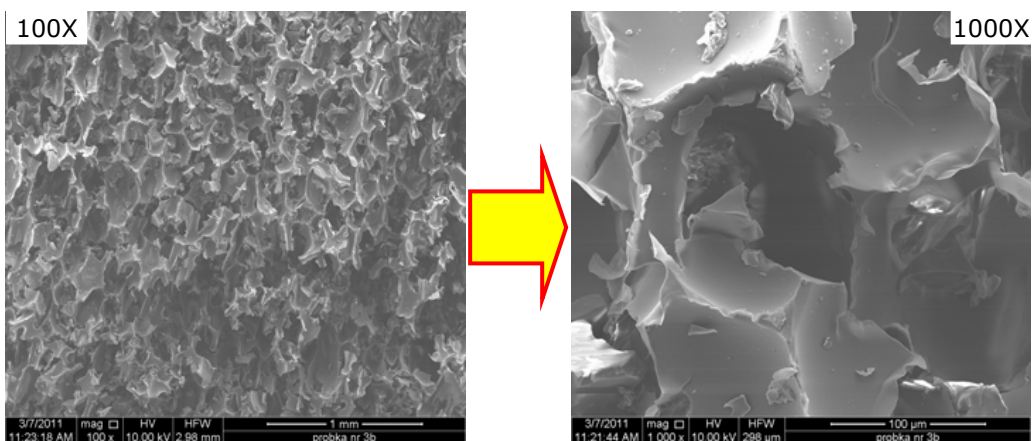
planul de formare, respectiv între forma celulelor rezultată în urma încărcării într-un plan perpendicular pe planul de formare al spumei.



a)  $\rho=40 \text{ kg/m}^3$  plan paralel

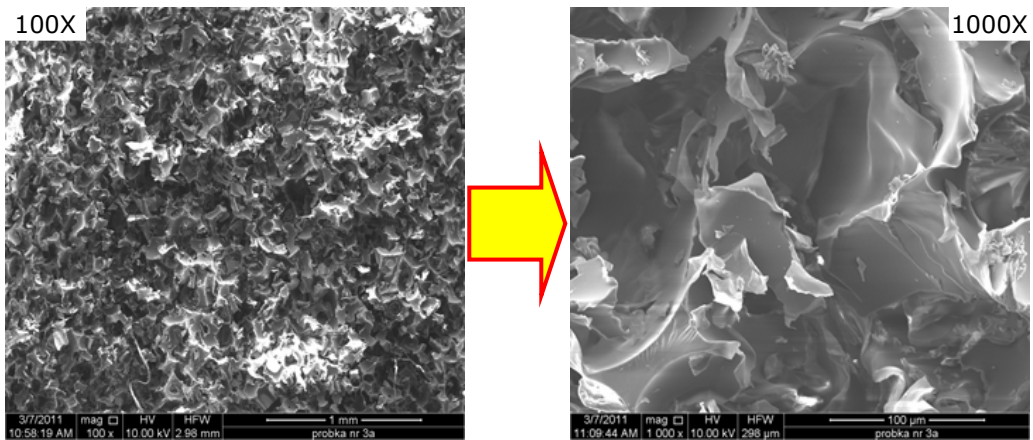


b)  $\rho=40 \text{ kg/m}^3$  plan perpendicular

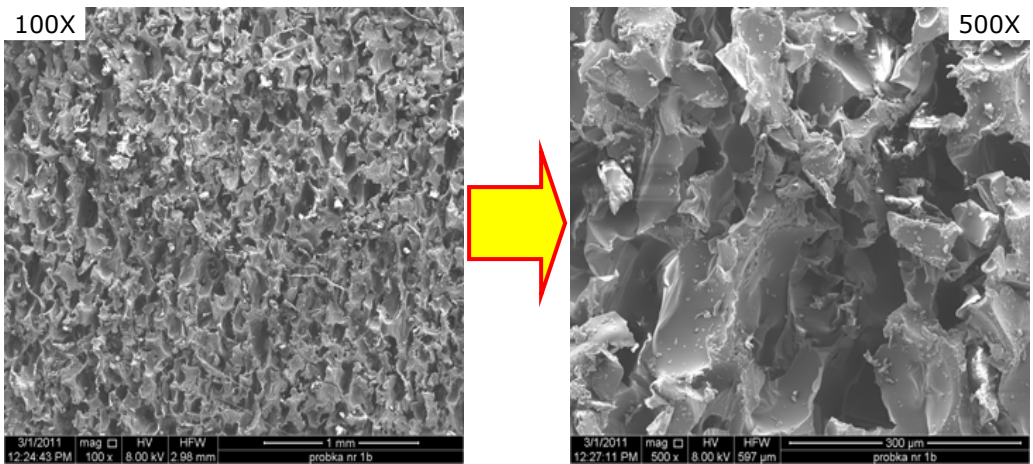


c)  $\rho=80 \text{ kg/m}^3$  plan paralel

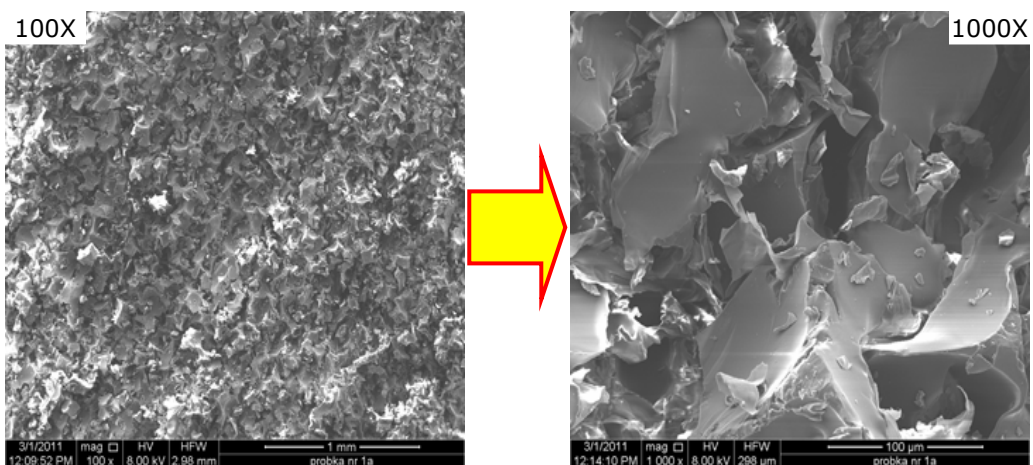
162 Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale PUR – 3



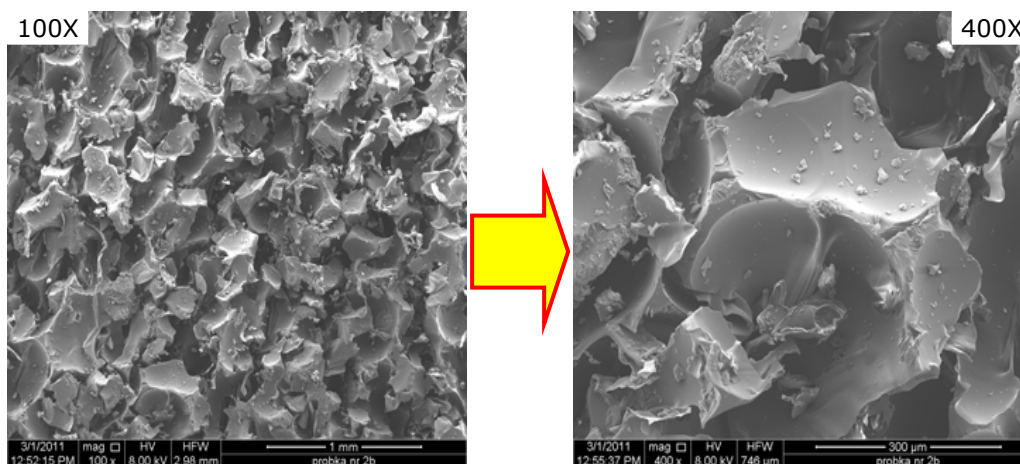
d)  $\rho=80 \text{ kg/m}^3$  plan perpendicular



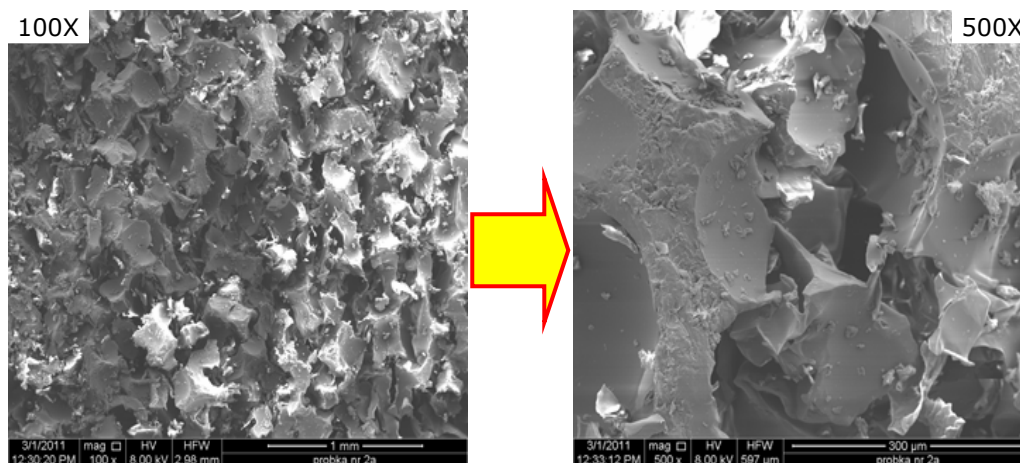
e)  $\rho=120 \text{ kg/m}^3$  plan paralel



f)  $\rho=120 \text{ kg/m}^3$  plan perpendicular



g)  $\rho=140 \text{ kg/m}^3$  plan paralel



h)  $\rho=140 \text{ kg/m}^3$  plan perpendicular

Fig. 3.62. Structura celulară a spumelor rezultată în urma testelor de compresiune pentru cele două plane de încărcare (paralel și perpendicular)

Din figura 3.62 se poate observa că pentru fiecare densitate se obține o deformare diferită pentru cele două direcții de încărcare, acest lucru punând în evidență aspectul anizotrop al spumelor studiate.

De asemenea, pentru spumele prezentate s-a realizat o analiză atât înainte de deformare cât și după deformare. În figura 3.63 este prezentată structura celulară pentru o spumă cu densitatea de  $\rho=140 \text{ kg/m}^3$ , atât înainte cât și după deformare.

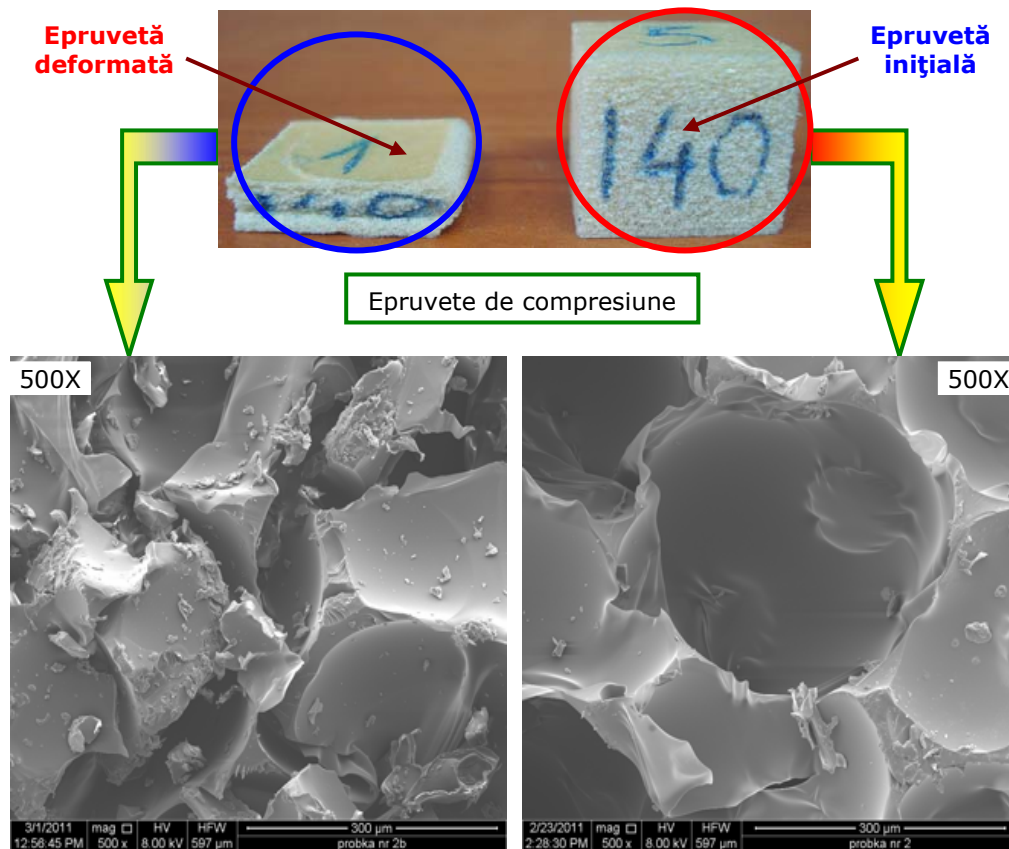


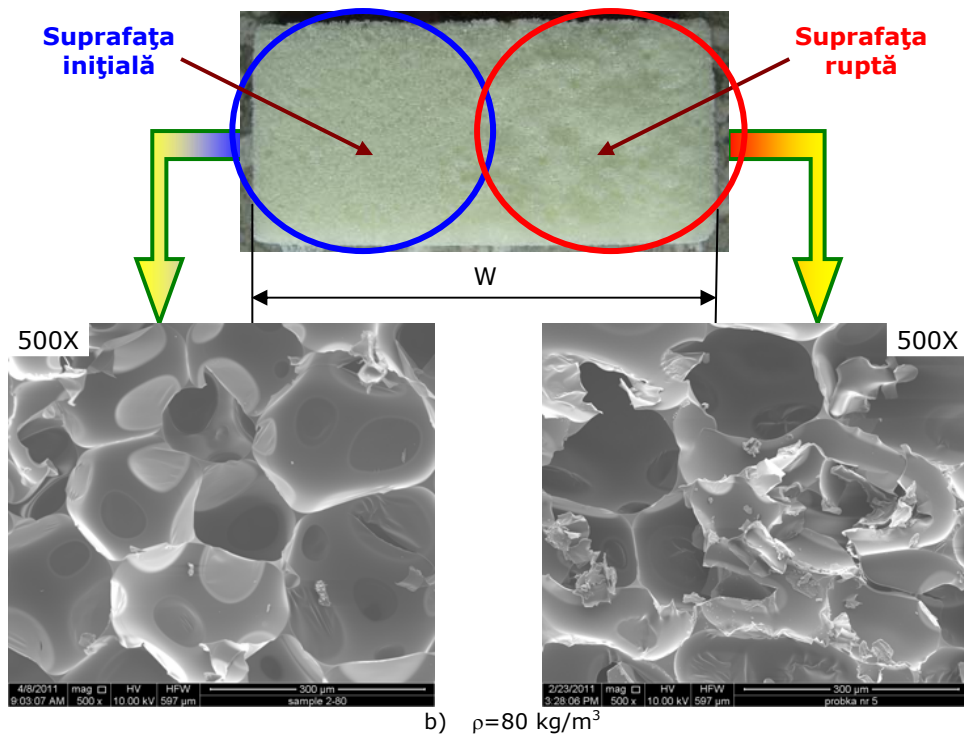
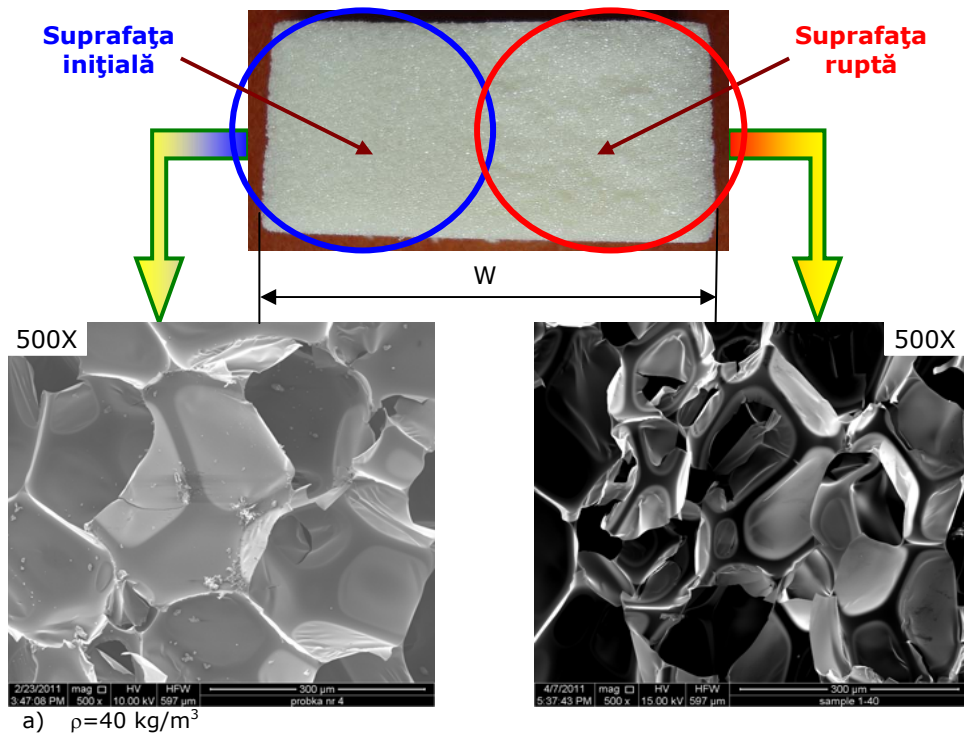
Fig. 3.63. Forma inițială respectiv finală a celulelor (după compresiune) pentru spuma analizată cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$

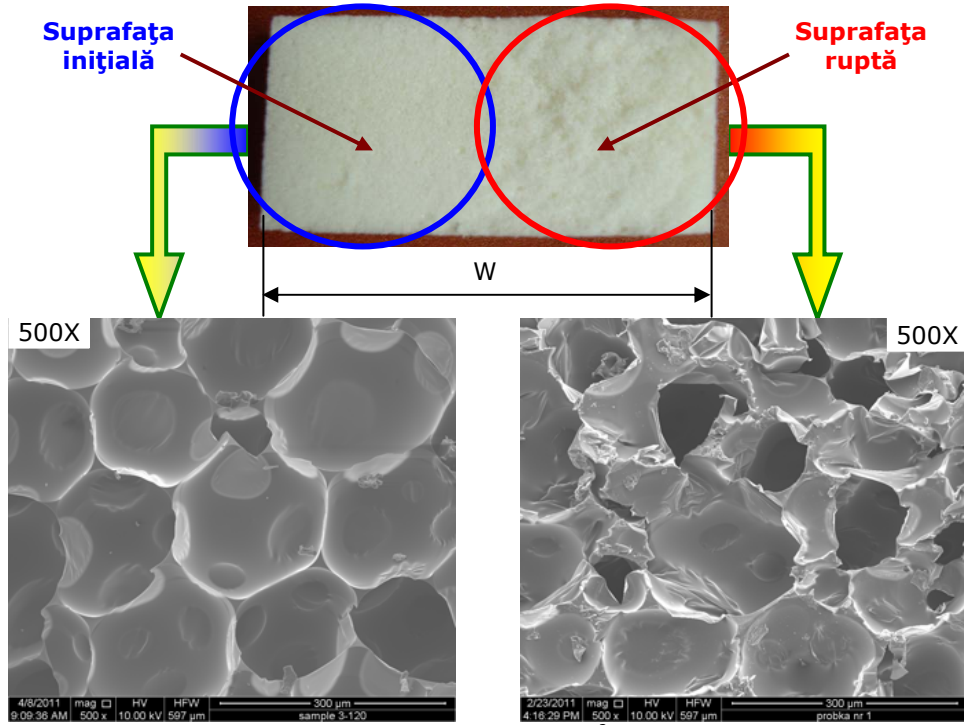
După solicitarea de compresiune spuma prezintă o distrugere totală a celulelor, ceea ce duce la creșterea pronunțată a tensiunii la o deformare aproape constantă (cunoscută sub numele de densificare). În momentul densificării, datorită umplerii golurilor, spuma se comportă asemenea solidului din care este realizată, prezentând aproximativ aceleași proprietăți mecanice.

### 3.6.2. Analiza microstructurală rezultată în urma testelor de încovoiere în trei puncte

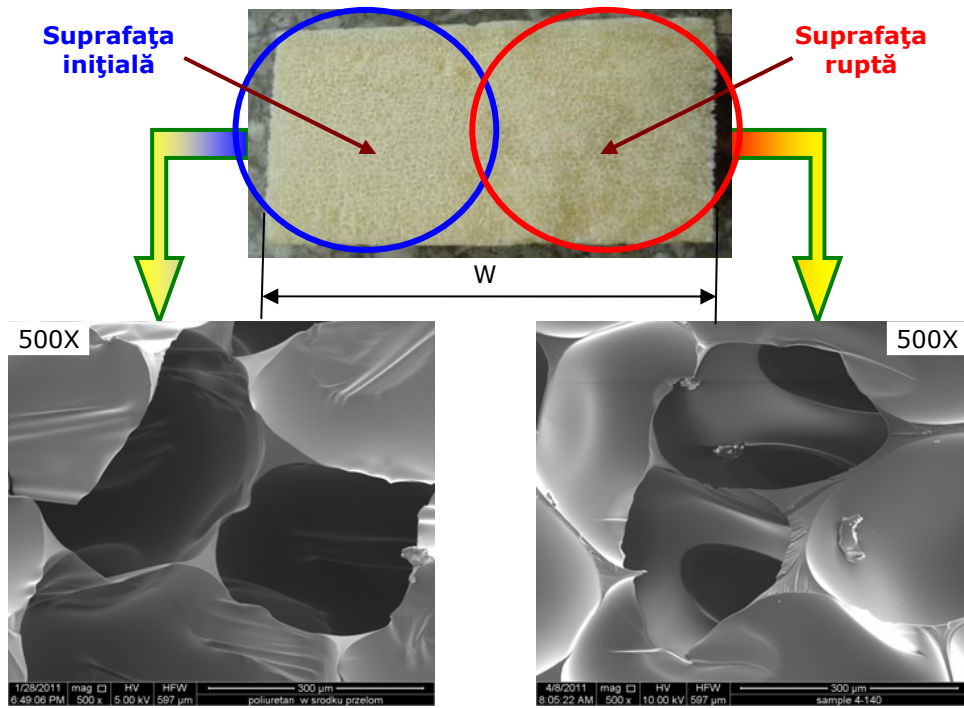
Suprafețele de rupere (inițiale și finale) pentru spumele utilizate în cadrul programului experimental de încovoiere în trei puncte sunt prezentate în figura 3.64. De asemenea, tot în figura 3.64 este prezentată și structura celulară obținută cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj atât înainte de deformare cât și după deformare.

Suprafața de rupere arată faptul că ruperea a fost fragilă, fără deformății plastice, [Linul și alții (2009), Linul și Marșavina (2011c), Linul și alții (2011b)].



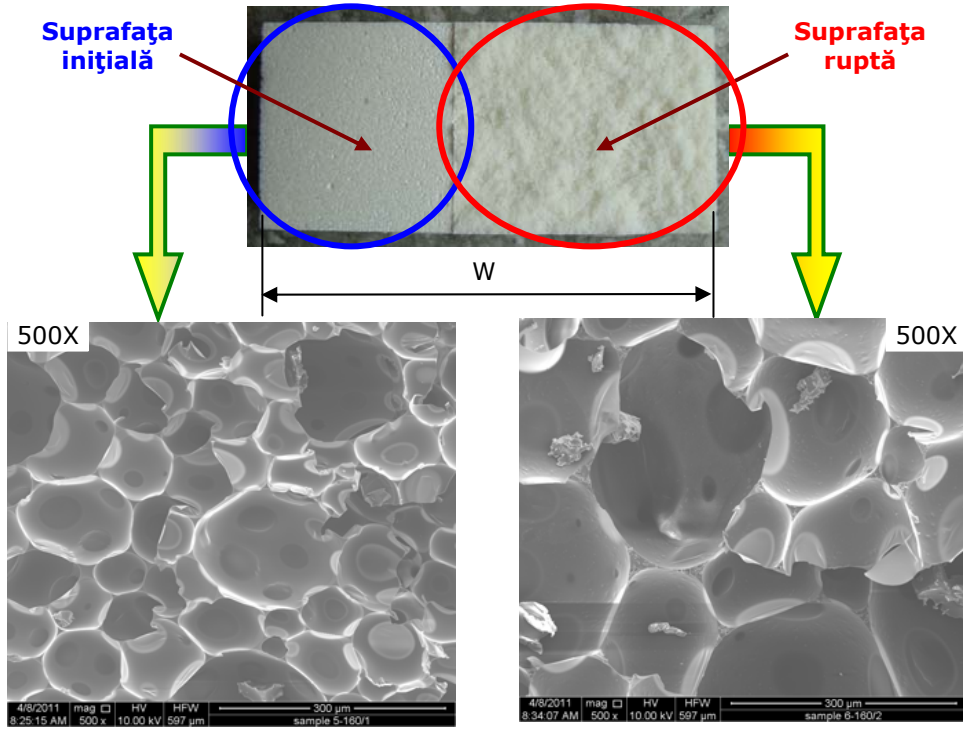


c)  $\rho=120 \text{ kg/m}^3$

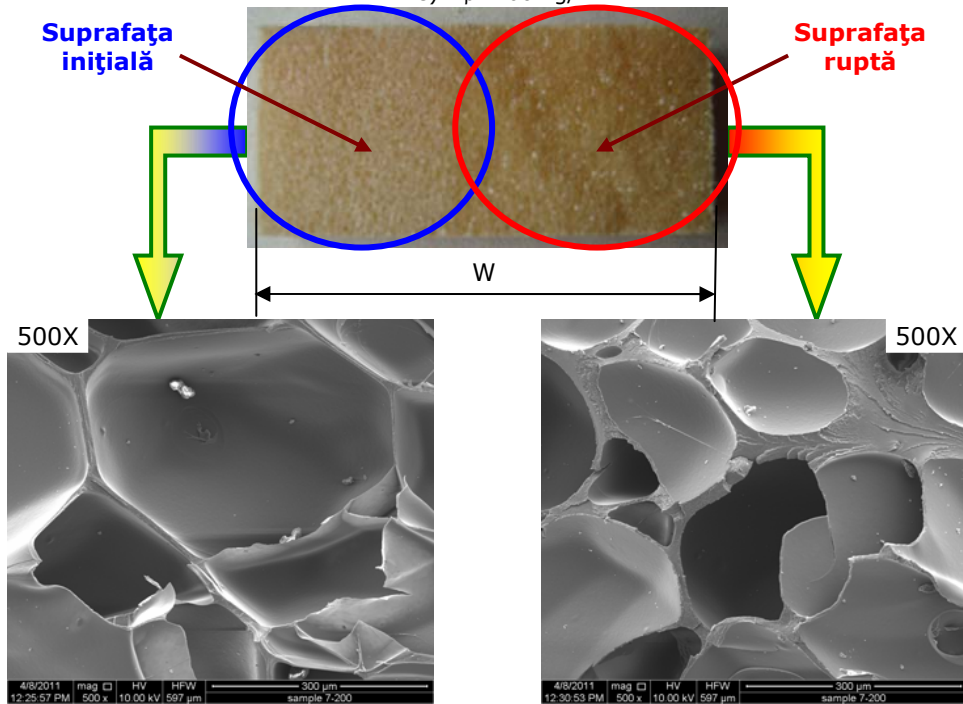


d)  $\rho=140 \text{ kg/m}^3$

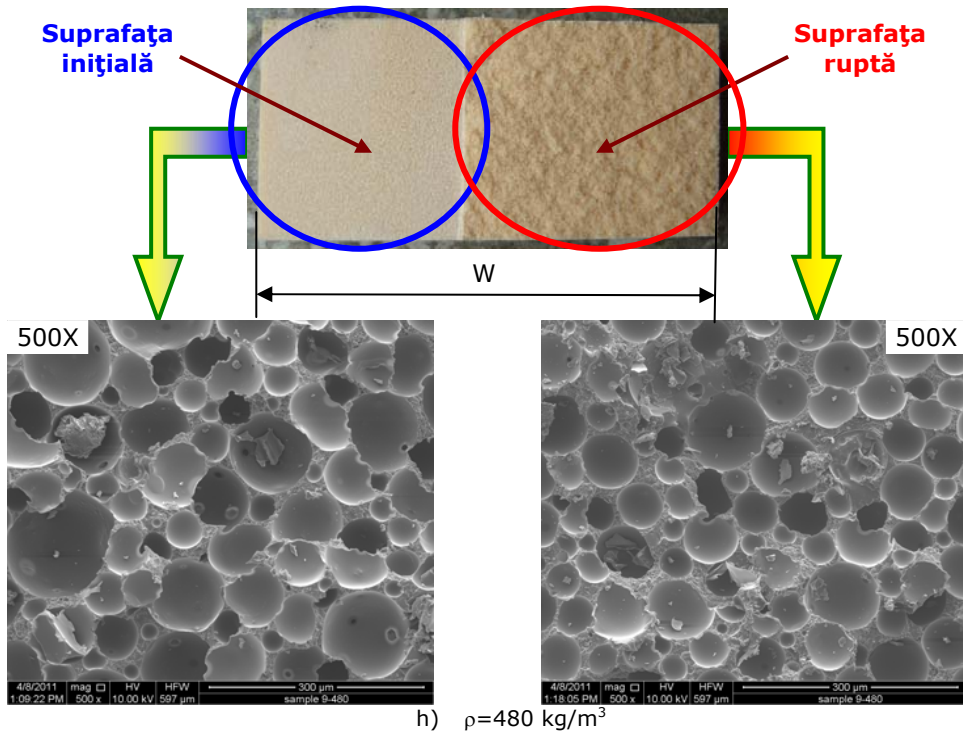
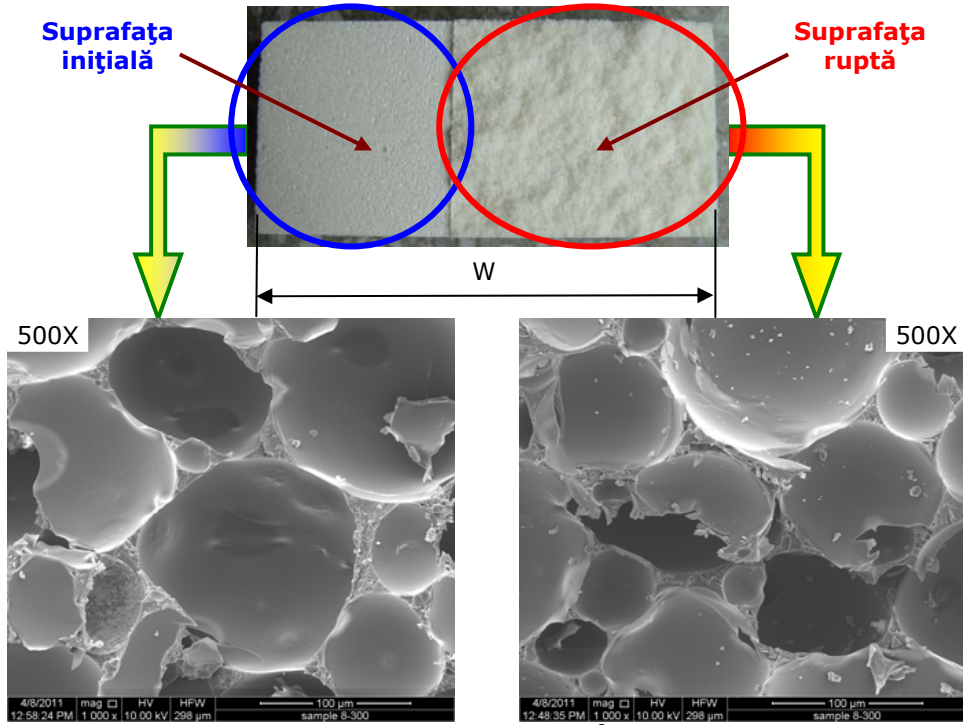


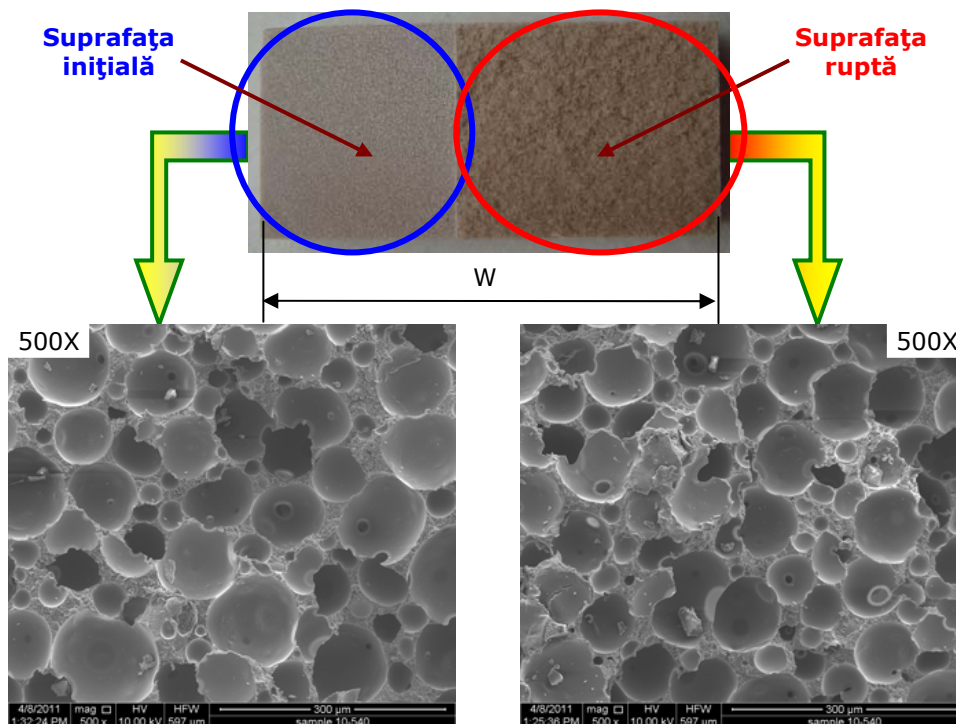


e)  $\rho=160 \text{ kg/m}^3$

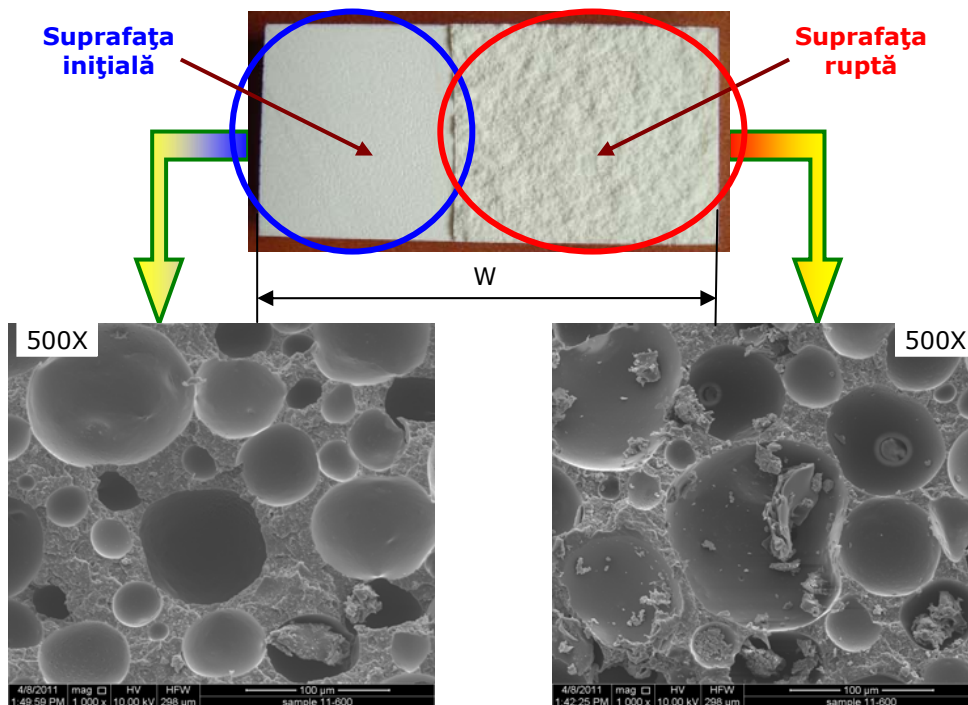


f)  $\rho=200 \text{ kg/m}^3$





i)  $\rho = 540 \text{ kg/m}^3$



j)  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$

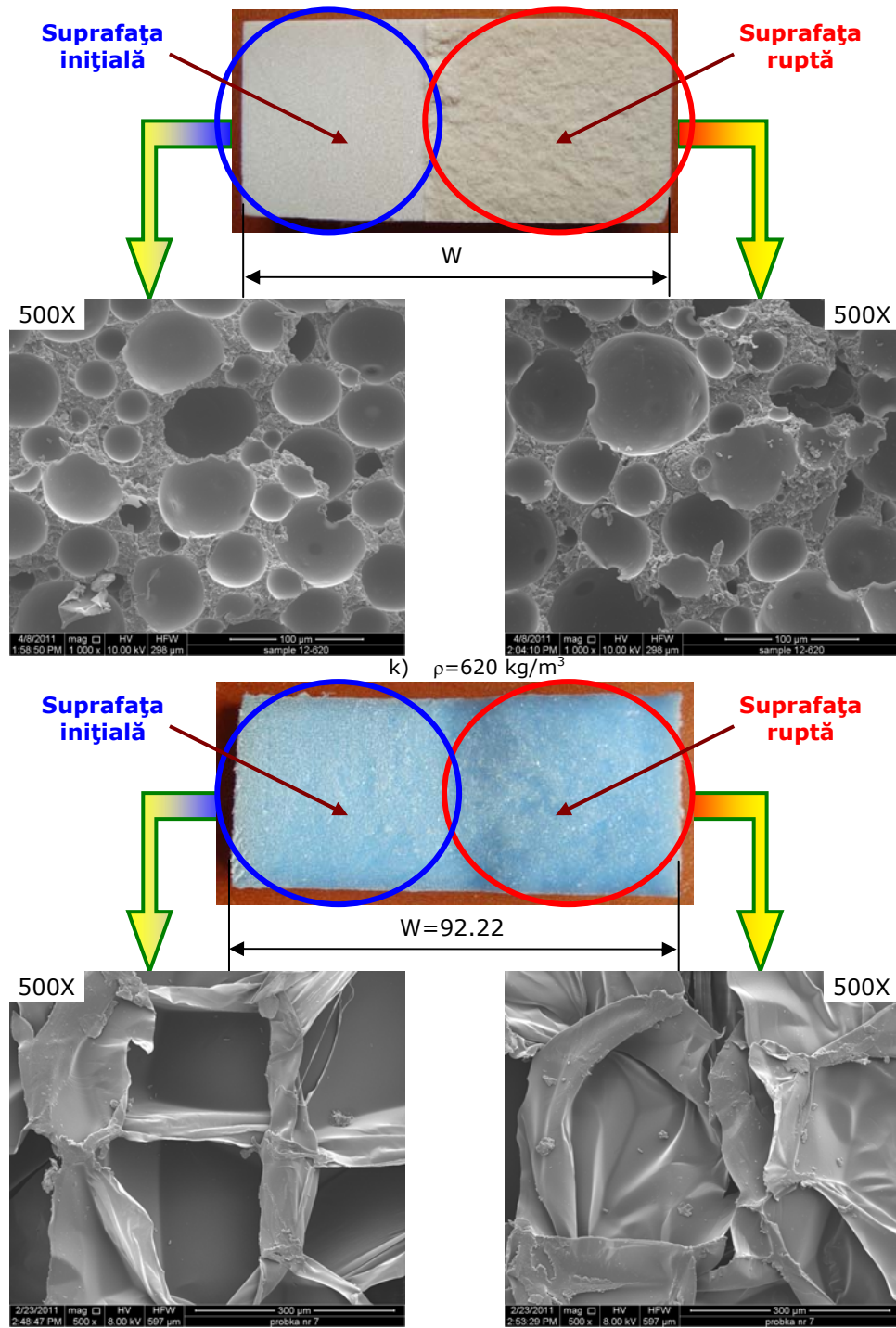


Fig. 3.64. Suprafață de rupere și structura spumelor poliuretanică utilizate în cadrul încercărilor de încovoiere în trei puncte

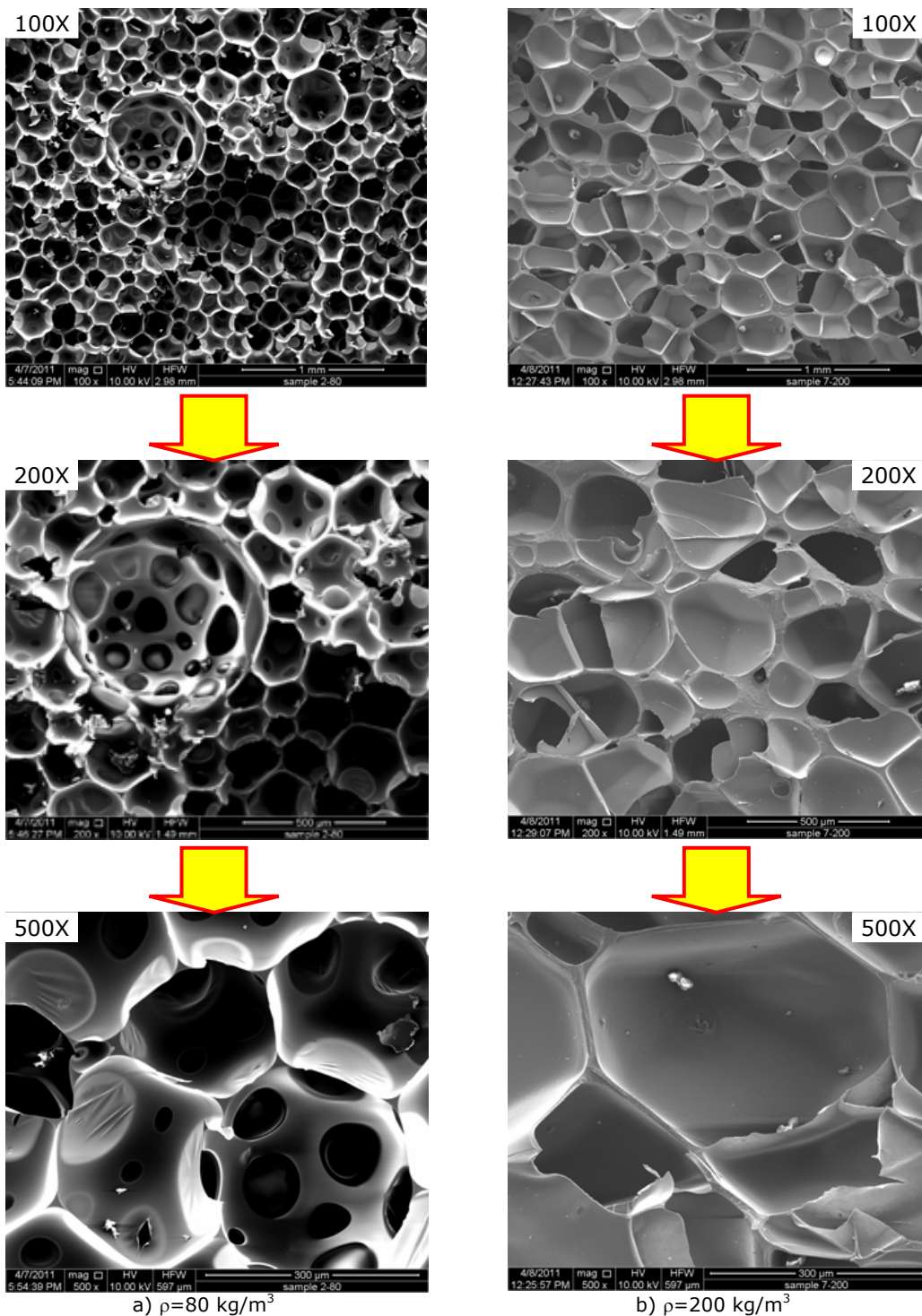


Fig. 3.65. Structura celulară a spumelor poliuretanicе rigide la diferite magnitudini.

În figura 3.65 este prezentată structura celulară a spumelor poliuretanică rigide la diferite magnitudini (100X, 200X și 500X). Analiza microstructurală este realizată pentru două dintre spumele amintite mai sus: spuma cu densitatea de 80, respectiv 200 kg/m<sup>3</sup>.

---

Capitolul 3 este dedicat în totalitate determinărilor experimentale a caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanică rigide. Spumele au fost analizate după un program de încercări special stabilit pentru scopul acestei lucrări. Având în vedere tipul solicitării și al spumei s-au studiat următoarele aspecte: identificarea tipului de spumă, determinarea caracteristicilor la compresiune în regim static și dinamic, determinarea caracteristicilor mecanice la tracțiune, determinarea tenacității la rupere atât în regim static cât și în regim dinamic, respectiv s-a realizat o analiză microstructurală a probelor după deformare.

S-au determinat caracteristicile mecanice la compresiune în regim static și dinamic, prezentându-se totodată atât o comparație a curbelor tensiune-deformație cât și a parametrilor obținuți (modul de elasticitate, tensiune de curgere, tensiune de platou și densificare). Atât în cadrul încercărilor de compresiune cât și în cazul celor de încovoiere în trei puncte pe epruvete crestate (s-a determinat tenacitatea la rupere în static și dinamic), s-a studiat influența densității, vitezei de încărcare, planului de formare, secțiunii transversale, (efectul de scară) și temperaturii pe spume poliuretanică rigide având diferite densități.

În cadrul încercărilor experimentale de tracțiune s-au trasat curbele forță-deplasare, respectiv tensiune-deformație pentru 3 densități (40, 80 respectiv 200 kg/m<sup>3</sup>). De asemenea, s-a determinat modulul de elasticitate și rezistența la rupere la tracțiune.

## **4. ESTIMAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE MATERIALELOR CELULARE FOLOSIND METODE ANALITICE ȘI NUMERICE**

### **4.1. Analiza proprietăților mecanice ale materialelor celulare la compresiune folosind metode analitice**

#### **4.1.1. Noțiuni generale**

Modelele analitice - micromecanice pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale spumelor prezintă o serie de aproximări în ceea ce privește curbele tensiune-deformație. Au fost propuse o serie de formulări pentru determinarea acestor caracteristici, [Sinha și alții (1994); Gibson și Ashby (1997), Rusch (1969x2), (1970), Sherwood și Frost (1992), Zhang și alții (1997), Zhang și alții (1998)]. Rush [Rusch (1969x2), (1970)] a propus un model simplu și general, în timp ce Zhang și alții [Zhang și alții (1997), Zhang și alții (1998)] au dezvoltat criteriul curgerii multiaxiale și au propus formulări generale pentru influența vitezei de încărcare și a temperaturii în spumele polimerice.

Materialele celulare prezintă o serie de caracteristici mecanice, ceea ce duce la alegerea câtorva factori cum ar fi tipul și proprietățile mecanice ale materialului de bază, procesul de realizare al spumei, porozitatea (care este legată direct de densitate) și microstructura, [Gibson și Ashby (1997)]. Anizotropia spumei este un parametru foarte important al spumelor și trebuie luată în considerare în cadrul modelării proprietăților mecanice, [Gdoutos și alții (2002)]. Un model de predicție a proprietăților mecanice pentru spume în termenii anizotropiei este propus de către Huber și Gibson, (1988). Astfel, alegând corect acești factori, se pot obține caracteristicile dorite pentru aplicațiile practice.

Această modelare poate fi uneori destul de complexă, deoarece gestionarea acestor factori necesită o analiză structurală a spumei foarte precisă. Câțiva autori, [Avalle și alții (2001), Goods și alții (1998), Matuana și alții (1998), Iannace și alții (2001), Chen și alții (2002)] au studiat și caracterizat influența densității pentru mai multe tipuri de spume prin identificarea legilor de dependență a densității prezentate de către Gibson și Ashby, sau prin utilizarea altor legi dar care prezintă aplicații limitate. Avalle și alții, (2007) prezintă o procedură de optimizare în vederea identificării parametrilor micromecanici din încercările de compresiune uniaxială pentru diferite tipuri de spume. De asemenea tot în Avalle și alții, (2007), a fost investigat și efectul umplerii. Ramsteiner și alții (2001) au analizat parametrii care influențează proprietățile mecanice ale spumelor. Au fost identificați următorii parametri: structura spumei, matricea de material a spumei, densitatea spumei, orientarea celulelor și temperatura de testare. Comportamentul la strivire al spumei de tip Rohacell a fost investigat de către Li și alții, (2006). Tu și alții, (2001) au prezentat deformațiile plastice ale spumei poliuretanică sub încercări de compresiune și au propus o abordare teoretică pentru a descrie localizarea deformației.

Pentru a realiza o analiză structurală a acestor materiale, nu este necesară întotdeauna o modelare micromecanică cu elemente finite, uneori fiind suficientă o reprezentare bună a curbei tensiune-deformație. Din acest motiv, majoritatea modelelor utilizate pentru simulări numerice sunt modele fenomenologice, aici poate fi inclus modelul lui Rusch [Rusch (1969x2), (1970)], iar pentru a fi utilizate este nevoie doar de o fitare bună cu datele experimentale, ceea ce este destul de dificil deoarece aceste modele nu țin cont toate de influența densității.

Scopul principal în proiectarea componentelor structurale din solide celulare pentru aplicațiile din domeniul impactului este de a face componentele capabile să absoarbă întreaga energie de impact, în timp ce, valorile rezultate ale tensiunii și decelerării nu trebuie să depășească valorile maxime predefinite, [Avalle și alții (2001), Avalle și alții (2004), Avalle și alții (2005)]. Pentru a satisface această cerință, materialul de bază corespunzător, densitatea spumei, forma și dimensiunile componente trebuie să fie selectate pe baza informațiilor disponibile. Aceste informații rezultă în urma încercărilor experimentale și a tehnicilor de modelare. În special, tipul și calitatea modelului poate reduce numărul de teste necesar obținerii informațiilor dintr-un anumit domeniu complet.

În acest subcapitol se prezintă modelele micromecanice cu ajutorul cărora se pot obține curbele tensiune-deformație. De asemenea, sunt prezentate și unele proprietăți de material care influențează comportamentul spumei, dintre care cea mai importantă este cu siguranță densitatea, [Gibson și Ashby (1997), Avalle și alții (2004), Avalle și alții (2005), Lin (1997)].

#### 4.1.2. Modele micromecanice

În momentul de față doar câteva modele micromecanice se bazează pe comportamentul structural al spumelor poliuretanic rigide. Astfel, modelele identificate sunt următoarele, [Avalle și alții (2007)]:

- Modelul Gibson-Ashby;
- Modelul Gibson-Ashby modificat;
- Modelul Rusch;
- Modelul Avalle.

Modelele micromecanice pentru solidele celulare se împart în două categorii: modele fenomenologice și modele micromecanice. Modelele fenomenologice au scopul de a oferi cea mai bună potrivire a comportamentului mecanic fără o legătură directă cu fizica fenomenului. Modelele micromecanice se bazează pe analiza mecanismelor de deformare a structurii micro-celulare sub acțiunea încărcărilor exterioare.

##### 4.1.2.1. Modelul Gibson-Ashby

Modelul Gibson-Ashby, [Gibson și Ashby (1997)] este un model micromecanic în care caracteristica tensiune-deformație este definită prin trei zone, astfel:

- zona liniar-elastică:

$$\sigma = E\varepsilon \text{ pentru } \sigma \leq \sigma_Y; \quad (4.1)$$

- zona de platou:

$$\sigma = \sigma_Y, \text{ pentru } \varepsilon_Y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_D(1 - D^{-1/m}); \quad (4.2)$$

- densificarea:



$$\sigma = \sigma_y \frac{1}{D} \left( \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_D - \varepsilon} \right)^m, \text{ pentru } \varepsilon > \varepsilon_D(1 - D^{-1/m}) \quad (4.3)$$

unde,  $\sigma$  și  $\varepsilon$  sunt tensiunea respectiv deformația nominală care pentru compresiune se consideră pozitive. Modelul prezintă cinci parametri:  $E$  - reprezintă modulul de elasticitate al spumei determinat pe porțiunea liniar-elastică a curbelor tensiune-deformație,  $\sigma_y$  - tensiunea de curgere,  $\varepsilon_D$  - este valoarea deformării caracteristică terminării zonei de platou și începerii densificării, iar  $D$  și  $m$  sunt constante de material în funcție de tipul spumei utilizate ( $D=1.55$  și  $m = 1 \pm 0.4$  sunt recomandate pentru spuma poliuretanică rigidă). Fiecare dintre acești parametri pot fi calculați cu ajutorul formulelor bazate pe deformarea celulelor în modelele micromecanice, prezentate în capitolul 2. Este important de știut că zona de platou este descrisă de către o valoare constantă a tensiunii de curgere,  $\sigma_y$ . Acesta este rezultatul mecanismului adoptat pentru a descrie ruperea celulei bazându-se pe comportamentul la flambaj a unei structuri celulare prezentând o geometrie identică a celulelor.

Gibson și Ashby, (1997), propun determinarea acestor parametri prin ajustarea curbelor experimentale. În studiul realizat, parametrii  $E$ ,  $\sigma_y$  și  $\varepsilon_D$  sunt considerați dependenți de densitate, în timp ce parametrii  $D$  și  $m$  sunt independenți de densitate.

Modelul Gibson-Ashby include influența densității asupra parametrilor ca o consecință a mecanismelor de deformație micromecanice care au la bază modelul însuși, [Gibson și Ashby (1997)]. Prin urmare, teoretic, nu sunt necesare rezultate experimentale pentru a descrie influența densității.

Această caracteristică a modelului Gibson-Ashby este folosită acolo unde sunt disponibile doar un număr mic de rezultate experimentale. Pe de altă parte, disponibilitatea unui număr mic de rezultate experimentale pentru spumelor poliuretanică, la diferite nivele ale densității, poate fi folosită pentru a descrie mai bine efectul real al densității.

#### 4.1.2.2. Modelul Gibson-Ashby modificat

Dacă se analizează cu atenție curbele experimentale tensiune-deformație, [Avalle și alții (2001), Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a)] se observă că în cele mai multe cazuri, (dar nu întotdeauna), zona de platou nu este orizontală, ci prezintă o anumită pantă care este pozitivă, numită și ecruisare. Această creștere a tensiunii pe zona de platou poate fi justificată de către geometria celulei, (care este aleatoare atât pentru lungimea celulelor cât și pentru grosimea pereților), și de ecruisarea materialului solid în timpul deformării. În timp ce, în cazul în care geometria celulei este foarte regulată și materialul de bază este fragil, apare un platou plat.

În vederea luării în considerare a pantei descrise de către formula (4.2), pentru regiunea de platou, modelul Gibson-Ashby este modificat. Astfel, în locul tensiunii constante este utilizată o pantă prezentând o zonă liniară. La deformații mici, de obicei sub 5% comportamentul spumei este liniar elastic, (figura 4.1) [Avalle și alții (2001)]. La o creștere a încărcării, spuma începe să se deformeze plastic și neliniar funcție de proprietățile mecanice ale peretelui celulei, iar ecuația dată pentru regiunea de platou este următoarea:

$$\sigma = \sigma_y + h\varepsilon \quad (4.3)$$

În cazul acestui model, pe lângă cei cinci parametri prezentați mai înainte, ecuația zonei de platou mai introduce unul și anume panta zonei de platou,  $h$ . În concluzie acest model are nevoie de identificarea a șase parametri. Valoarea deformației  $\varepsilon_D(1-D^{-1/m})$ , care reprezintă punctul de intersecție între zona de platou și densificare, nu poate fi exprimată explicit ca și în modelul original Gibson-Ashby, ea trebuind determinată numeric.

Pe curba tensiune-deformație din figura 4.1 sunt prezentate cele trei domenii amintite mai sus (zona liniar-elastică, zona de platou și densificarea), pentru o spumă poliuretanică rigidă.

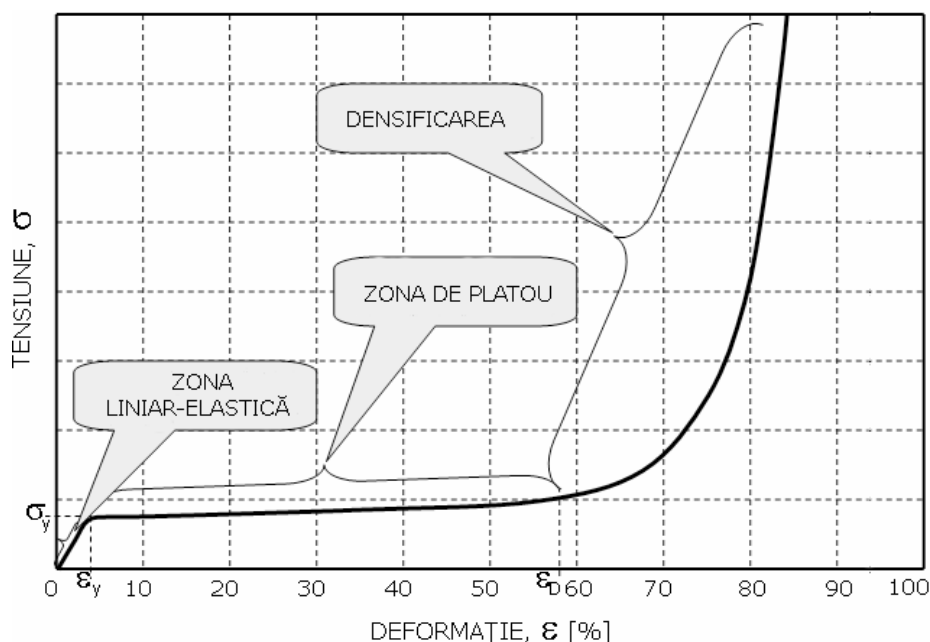


Fig. 4.1. Domeniile curbei tensiune-deformație tipică pentru o spumă poliuretanică rigidă solicitată la compresiune

Pentru cele mai multe tipuri de materiale celulare, regiunea de platou începe de la deformația la curgere,  $\varepsilon_y$ , sau tensiunea de curgere,  $\sigma_y$ , reprezentând inițierea unui nou mecanism de deformare a peretelui celulei, și se termină la deformația critică,  $\varepsilon_D$ , reprezentând începutul densificării.

#### 4.1.2.3. Modelul Rusch

Modelul Rusch [Rusch (1969x2) și (1970)] este un model fenomenologic simplu dat de către suma a două legi de putere:

$$\sigma = A\varepsilon^m + B\varepsilon^n \quad (4.4)$$

unde,  $0 < m < 1$  și  $1 < n < \infty$ .

De asemenea, în acest caz  $\sigma$  și  $\varepsilon$  sunt tensiunea respectiv deformația nominală care pentru compresiune se consideră pozitivă. Primul termen este ajutător pentru a realiza o potrivire cât mai bună a zonelor liniar-elastice și de

platou, pe când cel de-al doilea termen este utilizat pentru densificare. Parametrii  $A$  și  $B$  sunt considerați ca fiind dependenți de densitate, în timp ce parametrii  $m$  și  $n$  se consideră independenți.

Un dezavantaj al acestui model este inexactitatea lui de a descrie faza densificării atunci când, ca urmare a comprimării, golurile interne dispar progresiv, iar materialul se comportă ca un material solid, cu un modul de elasticitate în creștere. Totuși, chiar și în această fază, deformația nu poate depăși valoarea de unu.

#### 4.1.2.4. Modelul Avalle

Modelul Avalle este un model empiric, având următoarea formulare:

$$\sigma = A(1 - e^{(-E/A)\varepsilon(1-\varepsilon)^m}) + B\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^n \quad (4.5)$$

unde,  $\sigma$  și  $\varepsilon$  sunt tensiunea respectiv deformația nominală care pentru compresiune se consideră pozitive. Ca și în cazul modelului Rusch, primul termen este utilizat pentru fitarea zonelor liniar-elastică și cea de platou, în timp ce al doilea termen este utilizat pentru densificare. Pentru primul termen sunt fundamentale câteva caracterizări pentru descrierea caracteristicilor acestui model. Derivând în raport cu deformația, obținem:

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[ A(1 - e^{(-E/A)\varepsilon(1-\varepsilon)^m}) \right] = E \left[ e^{(-E/A)\varepsilon(1-\varepsilon)^m} \left( (1-\varepsilon)^m - \varepsilon(1-\varepsilon)^{m-1} \right) \right] \quad (4.6)$$

care pentru  $\varepsilon = 0$ , devine:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[ A(1 - e^{(-E/A)\varepsilon(1-\varepsilon)^m}) \right] \right|_{\varepsilon=0} = E \quad (4.7)$$

Aceasta înseamnă că în apropierea originii curbei tensiune-deformație, modulul tangent este egal cu parametrul  $E$ , care poate fi considerat modulul de elasticitate inițial al spumei.

Primul termen prezintă de asemenea o asimptotă orizontală pentru valori ridicate ale deformației:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \left[ A(1 - e^{(-E/A)\varepsilon(1-\varepsilon)^m}) \right] = A \quad (4.8)$$

Aceasta înseamnă că peste o anumită deformație, tensiunea definită de acest termen este aproape constantă și egală cu parametrul  $A$ , care poate fi considerat ca fiind tensiunea de platou a spumei.

Utilizarea funcției exponențiale dă o îmbunătățire relevantă în potrivirea curbei între zona liniar-elastică și cea de platou, ca o consecință a alegerii corespunzătoare a exponentului  $m$ .

Principalele caracteristici ale modelului Avalle sunt:

- se utilizează același număr de parametri ca și în cazul modelului Gibson-Ashby:  $A$ ,  $E$ ,  $m$ ,  $B$  și  $n$
- parametrii  $E$  și  $A$  au același efect asupra curbei rezultate ca și parametrii  $E$  și  $\sigma_y$  din modelul Gibson-Ashby, ei având același sens fizic: modulul de elasticitate și tensiunea de platou a spumei;
- al doilea termen este o modificare a celui de-al doilea termen din modelul Rusch și a fost introdus pentru a avea o asimptotă verticală corespunzătoare limitei

fizice la compresiune ( $\varepsilon = 1$ ). Este ușor de observat că al doilea termen din modelul Avalle este similar cu cel de-al treilea din modelul Gibson-Ashby;

➤ fiecare parametru influențează o zonă particulară asemenea modelului Gibson-Ashby, dar formularea este unică, nefiind compusă de către o formulă pentru fiecare zonă.

Parametrii  $E$ ,  $A$  și  $B$  sunt considerați dependenți de densitate în timp ce parametrii  $m$  și  $n$  sunt independenți.

#### 4.1.3. Obținerea curbelor tensiune-deformație cu ajutorul modelelor micromecanice

În cadrul acestei teze s-au utilizat doar două dintre modelele micromecanice prezentate mai sus: Modelul Gibson-Ashby și Modelul Gibson-Ashby modificat. De asemenea pentru prelucrarea datelor s-au considerat următoarele caracteristici ale poliuretanului (materialul solidului): densitatea solidului  $\rho_s = 1170 \text{ kg/m}^3$ , modulul de elasticitate  $E_s = 1600 \text{ MPa}$  și tensiunea de curgere  $\sigma_{ys} = 53.4 \text{ MPa}$ .

În figura 4.2 este prezentată curba tensiune-deformație, pentru o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby.

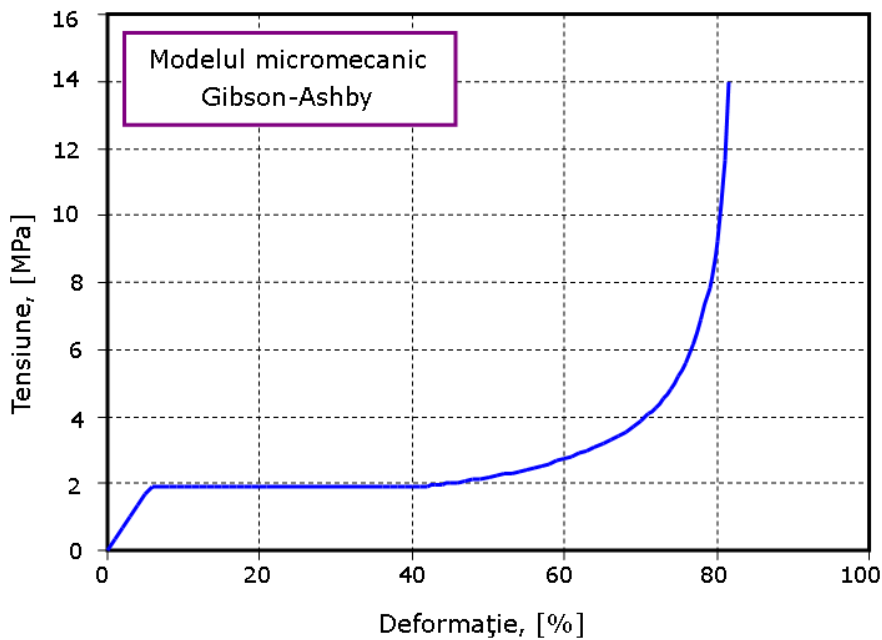


Fig. 4.2. Curba tensiune-deformație obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby

Din figura 4.2, prima concluzie care se poate trage este că zona de platou este orizontală.

Figura 4.3 prezintă de asemenea curba tensiune-deformație, pentru o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , dar de această dată obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby modificat.

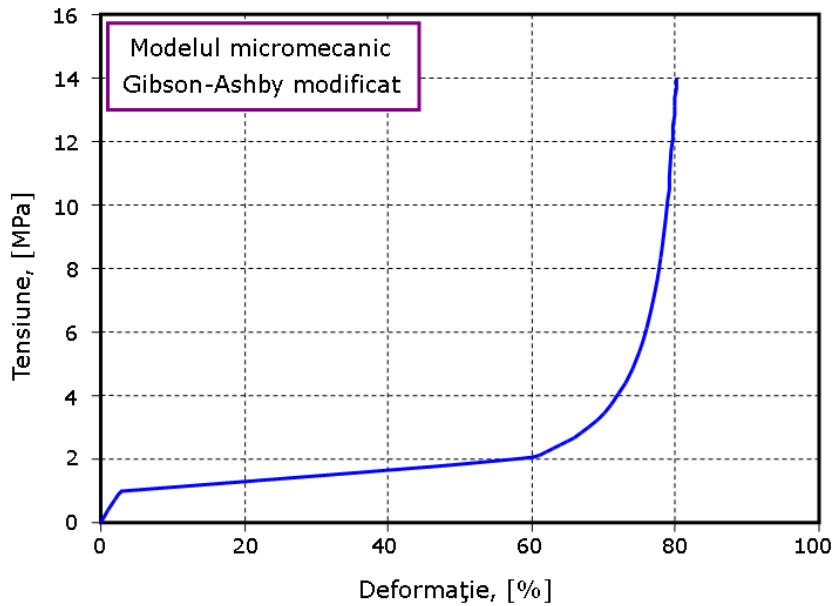


Fig. 4.3. Curba tensiune-deformație obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby modificat

În acest caz se poate observa cu ușurință că zona de platou nu mai este orizontală, ci prezintă o pantă care are următoarea valoare:  $h=1.8725$ .

În figura 4.4 este prezentată o comparație a celor două curbe tensiune-deformație, pentru același tip de spumă având densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , obținută cu ajutorul modelului micromecanic Gibson-Ashby, respectiv Gibson-Ashby modificat.

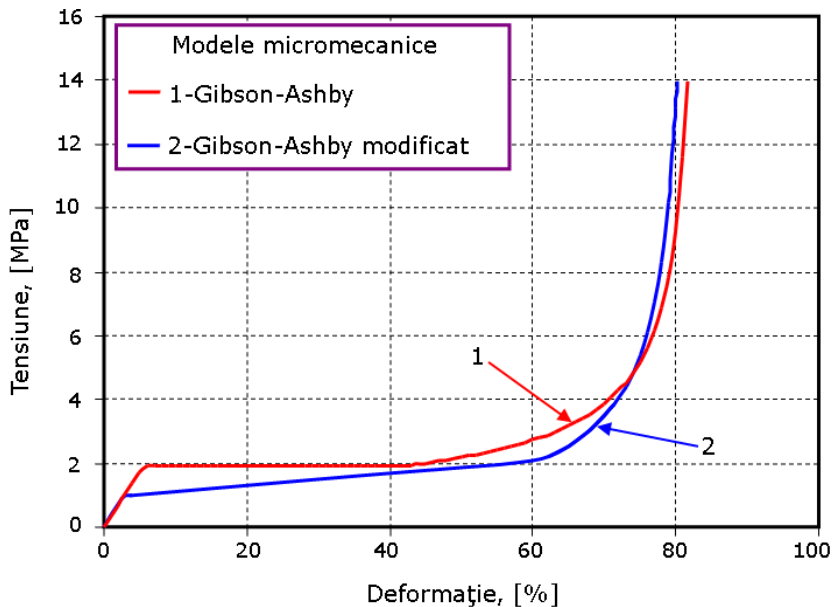


Fig. 4.4. Comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și Gibson-Ashby modificat

Analizând cele două modele prezentate mai sus (Gibson-Ashby și Gibson-Ashby modificat) s-au obținut următorii parametri prezentați în Tabelul 4.1:

Tabelul 4.1. Parametrii la compresiune obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice

Densitate $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Model Gibson-Ashby			Modelul Gibson-Ashby modificat		
	E [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]
40	12.14	0.44	0.44	-	-	-
140	57.62	1.92	1.92	30.25	1.12	1.31
200	113.36	3.71	3.71	-	-	-

## 4.2. Analiza cu elemente finite pentru determinarea tenacității la rupere a materialelor celulare

### 4.2.1. Noțiuni generale

Odată cu dezvoltarea și extinderea Metodei Elementului Finit (FEM) în tot mai multe domenii ale ingineriei o serie de studii au fost raportate în literatura de specialitate cu privire la diferite aplicații ale acestei metode în domeniul materialelor celulare pentru determinarea tenacității la rupere, [Mills și Zhu (1999), Gupta și Ricci (2006), Ren și Silberschmidt (2008), Choi și Lakes (1996), Choi și Sankar (2005)], folosind diferite modele.

Materialele celulare sunt formate dintr-o rețea interconectată de straturi solide cu forma muchiilor și fețelor celulelor bine definite, [Gibson și Ashby (1997)]. Având în vedere proprietățile acestor materiale, un obiectiv important la nivel micromecanic constă în estimarea proprietăților materialelor celulare, pe baza geometriei și proprietăților fazelor individuale, cunoscut sub numele de omogenizare. Avantajul omogenizării constă în faptul că materialele celulare pot fi analizate pentru a li se determină comportamentul fără testare experimentală.

Modelele de tip rețea sunt adesea folosite ca și instrumente micromecanice, Ostoja-Starzewski (2002). De asemenea, modelele micromecanice pot arată mult mai bine proprietățile multiaxiale și răspunsul materialelor celulare, care de obicei sunt anizotrope, [Grenestedt (1999), Onck și alții (2001), Viana și Carlsson (2002), Christensen (2007), Saint-Michel și alții (2006x2)]. Metodele de modelare cu elemente finite, în cea mai mare măsură au rolul de a descrie comportamentul și proprietățile mecanice ale structurilor, [Daxner (2010)]. Astfel de proprietăți sunt uneori destul de dificil de determinat experimental, dar ele sunt necesare pentru proiectarea de astfel de structuri. Teoria modelelor micromecanice trebuie să fie în concordanță cu rezultatele experimentale, [Lin (1997), Zhu și alții (1997x2), Andrews și alții (2001), Linul și Marşavina (2011b), Linul și Marşavina (2011d)]. Analiza micromecanică permite evaluarea tensiunii locale și a câmpurilor de deplasare în faze. Aceste detalii despre microstructură sunt în special importante pentru a înțelege și pentru a descrie deteriorarea și ruperea materialelor, [Mills și Zhu (1999), Gupta și Ricci (2006), Ren și Silberschmidt (2008)].

Studii mai aprofundate despre modelele micromecanice pentru materialele celulare sunt prezentate mai detaliat de către Gibson și Ashby (1997) și Mills (2007), în lucrare fiind prezentate doar relațiile legate de mecanica ruperii.

În ultimii ani, analiza cu elemente finite este folosită pe scară largă, având ca scop rezolvarea problemelor legate de modelele micromecanice, [Ableidinger (2000), Choi și Sankar (2005), Arakere și alții (2008), Lee și alții (2007)]

Modelele micromecanice pentru determinarea tenacității la rupere a spumelor poliuretanică rigide  $K_{IC}$ , sunt bazate pe rezistența la rupere a pereților celulei  $\sigma_{fs}$  și densitatea relativă  $\rho/\rho_s$ . Caracteristicile geometrice ale materialelor celulare cu celule deschise sunt: lungimea celulei  $l$  și grosimea peretelui celulei  $t$ , sunt prezentate în figura 2.5.

Gibson și Ashby (1997) au considerat că la scara dimensiunii celulelor, o fisură se poate extinde într-un mod discret. De fiecare dată rîndul de celule de-a lungul frontului fisurii se rupe și frontul fisurii avansează cu lungimea unei celule, ca în figura 2.19. În cazul în care spuma este solicitată, pereții celulei se deformează elastic. Încărcarea este transmisă prin spumă ca un set discret de forțe și momente prin intermediul muchiilor celulelor. Aceste forțe și momente pot fi calculate pe baza câmpului de tensiune liniar elastic continuu din vecinătatea fisurii. Spumele fragile (aici fiind incluse spumele rigide polimerice), în cazul tracțiunii se comportă liniar elastic până la rupere, deci ruperea prin tracțiune poate fi tratată cu ajutorul conceptelor din Mecanica Ruperii Liniar Elastică.

Gibson și Ashby (1997) presupun că vârful fisurii este situat la jumătatea lungimii muchiei și utilizează Modul I de rupere pentru determinarea câmpului de tensiuni din jurul fisurii. Ei consideră că peretele primei celule nefisurate este supus doar la încovoiere, în timp ce în realitate este prezentă o forță axială importantă, rezultând o solicitare compusă de întindere excentrică.

Comparând cu datele experimentale pentru materialele celulare cu celule deschise și diferite materiale, Fowlkes (1974) pentru poliuretan, McIntyre și Anderson (1979) pentru poliuretan, Maiti și alții (1984) pentru PMMA, Brezny și Green (1989) pentru spume ceramice a rezultat o constantă  $C=0.65$ , și relația între tenacitatea la rupere și densitatea relativă:

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_{fs}\sqrt{\pi l}} = 0.65 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (4.9)$$

Rezultatele experimentale privind spumele de carbon, arată că relația (4.9) este valabilă doar pentru fisuri relativ lungi raportul  $a/l > 10$ , [Hunag and Gibson, (1991)].

O corelare similară a fost propusă de către Green (1985):

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_{fs}\sqrt{\pi l}} = 0.28 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.3} \quad (4.10)$$

Un alt model a fost propus de către Choi și Lakes (1996). Pentru un tetracaidecaedru regulat, cu celulele aranjate și având relația între densitatea relativă și dimensiunile celulei :

$$\left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) = 1.06 \left( \frac{h}{l} \right)^2 \quad (4.11)$$

tenacitatea la rupere va fi dată de relația:

$$\frac{K_I}{\sigma_{fs}\sqrt{\pi l}} = 0.19 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4.12)$$

Un alt model micromecanic a fost propus de către Choi și Shankar (2005),

care au considerat că pentru Modul I în primul perete al celulei dinaintea fisurii apare atât încovoiere cât și tracțiune, iar pentru Modul II apare doar forfecare. Ei au propus o expresie semi-empirică pentru tenacitatea la rupere funcție de rezistența la tracțiune a materialului, dimensiunile celulelor (lungime și grosime) și lungimea fisurii.

Choi și Sankar au propus un model micromecanic determinat prin analiză cu elemente finite de tip grinzi, (figura 4.5) și au investigat Modul I, Modul II și Modul mixt de încărcare. Valoarea tenacității la rupere obținută pentru Modul I în raport cu densitatea relativă a fost redată pentru două cazuri după cum urmează:

- pentru lungimea constantă a celulei,  $l = 200 \mu\text{m}$

$$K_{IC} = 1.96l \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.045} \quad \text{și} \quad K_{IIC} = 6.95 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.32} \quad (4.13)$$

- pentru grosimea peretelui celulei constantă,  $h = 20 \mu\text{m}$

$$K_{IC} = 7.82 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{0.788} \quad \text{și} \quad K_{IIC} = 2.76 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.07} \quad (4.14)$$

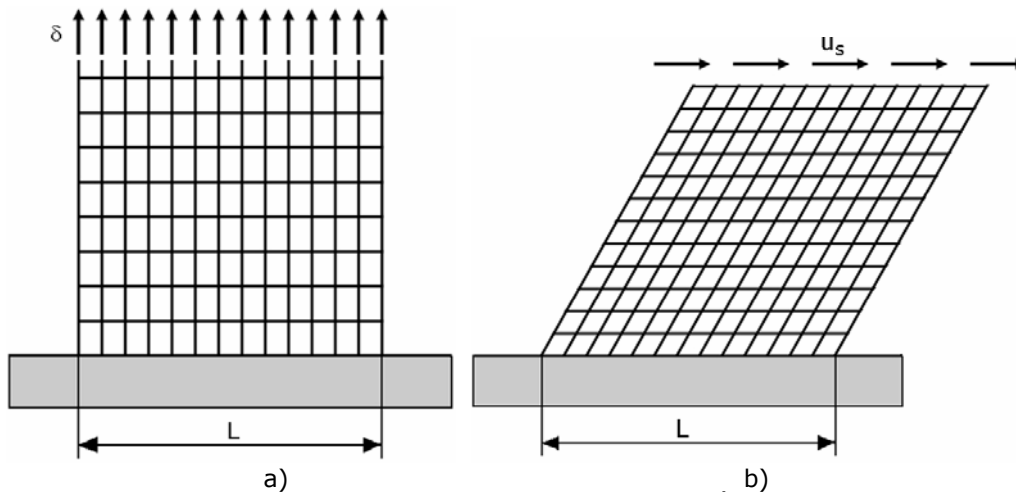


Fig. 4.5. Modelul cu elemente finite de tip grindă: a) Încărcat în Modul I; b) Încărcat în Modul II

Ableidinger (2000), analizează epruvete compacte, realizate din spumă de aluminiu cu celule deschise supuse unei încărcări uniforme. Zona din jurul vârfului fisurii a fost modelată cu o micro-geometrie cu celule deschise de tipul tetracaedraedrului 3D, discretizat cu elemente de tip grindă.

Arakere și alții, (2008), au utilizat un model 3D pentru determinarea tenacității la rupere pentru o spuma BX-265 cu densitatea de  $32.5 \text{ kg/m}^3$ , materialul de izolare fiind utilizat pentru un rezervor. Materialul a fost considerat anizotrop, iar analizele tensiunilor și a ruperii au inclus influența direcției de încărcare asupra proprietăților materialului.

Câmpul de tensiuni singular, [Gibson și Ashby (1997), Choi și Sankar (2005)] și nesingular [Choi și Lakes (1996)], au fost luate în considerare în fața fisurii. Tenacitatea la rupere a fost obținută ținând cont de mărimea fisurii în



momentul în care tensiunea în peretele primei celule nefisurate atinge valoarea rezistenței la rupere a solidului. Tenacitatea la rupere depinde de rezistența la rupere a peretelui sau materialului celulei care pentru materialele fragile prezintă un efect de scară. Variația tenacității la rupere în raport cu densitatea relativă este investigată pentru diferite tipuri de rețele de celule, [Lipperman și alții (2007X2)]. Aceasta este aproape liniară și este în acord cu datele publicate. Tenacitatea la rupere obținută pentru Modul II este mai mică decât cea obținută prin Modul I în majoritatea cazurilor investigate.

În general, luarea în considerare a trei moduri de rupere diferite este suficientă pentru a descompune orice încărcare arbitrară cu privire la modul de propagare al fisurii. În figura 4.6 sunt prezentate acele moduri de încărcare: Modul I prin care fisura este deschisă, Modul II este în planul de forfecare și Modul III este în afara planului de forfecare, [Ableidinger (2000)]. În cele mai multe aplicații ingineresti ruperea fragilă a structurilor are loc în Modul I.

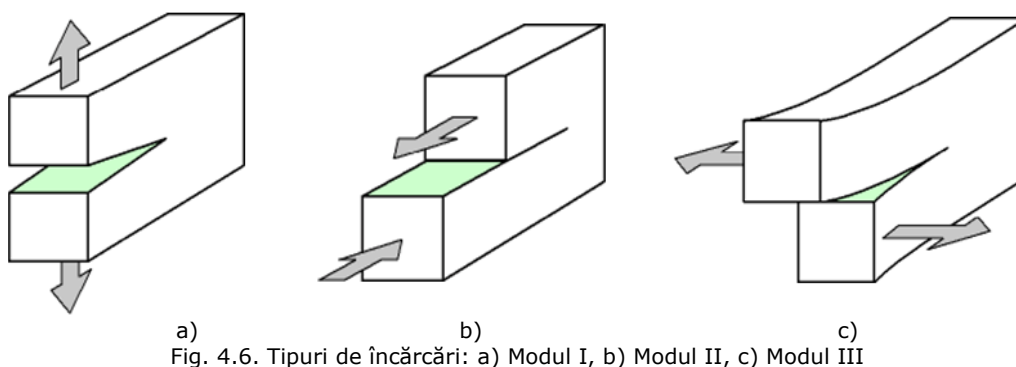


Fig. 4.6. Tipuri de încărcări: a) Modul I, b) Modul II, c) Modul III

Toate micromodelele relatate mai sus se referă la tenacitatea la rupere a spumelor având rezistența la rupere a materialului solid din care este fabricată spuma și parametrii microstructurii: lungimea celulei și densitatea relativă. Avantajele și dezavantajele acestor metode sunt redată în Marșavina (2010a). Cu toate acestea, Modul II de determinare a tenacității la rupere a fost prezentat doar de către Choi și Sankar (2005), pentru un model cu elemente finite de tip grindă.

#### 4.2.2 Modele micromecanice cu elemente finite pentru determinarea tenacității la rupere

Lucrarea de față propune un model simplu cu elemente finite solide 2D pentru estimarea tenacității la rupere pentru Modul I, respectiv Modul II. Este prezentat de asemenea un studiu de convergență și rezultatele obținute pentru influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere. La final este prezentată o comparație cu alte modele micromecanice propuse în literatură.

##### 4.2.2.1. Prezentarea modelelor micromecanice utilizate

Pentru acest studiu al determinării tenacității la rupere s-a folosit programul de modelare cu elemente finite FRANC 2D. La un nivel microstructural, materialele celulare de tipul spumelor poliuretanică sunt considerate materiale omogene ortotrope, iar stratul de material este considerat izotrop, liniar elastic și fragil.

Simularea s-a realizat pentru trei tipuri de materiale diferite:

- spumă poliuretanică rigidă (PUR);
- polimetilmetacrilat (PMMA);
- policlorură de vinil (PVC).

Fiecare material a fost simulat pentru Modul I și Modul II de rupere, fiind considerate următoarele două cazuri:

- lungimea cvasi-constantă a celulei  $l=0.52-0.60$  mm, iar grosimea peretelui celulei,  $t$ , variabilă (0.1, 0.05, și 0.02 mm),
- grosimea constantă a peretelui celulei  $t=0.05$  mm, iar lungimea celulei,  $l$ , variabilă (0.55, 0.75 și 0.95 mm).

De asemenea, s-a mai utilizat un model micromecanic cu celule hexagonale. În acest caz lungimea celulei este  $l=0.346$  mm, iar grosimea peretelui celulei  $t=0.1$  mm, obținându-se o densitate relativă de 0.33(3). Pentru acest caz, simularea s-a realizat doar pentru Modul I de rupere.

Caracteristicile mecanice ale materialului solid (densitatea  $\rho_s$ , rezistența la rupere  $\sigma_{fs}$ , modulul de elasticitate  $E$ , coeficientul lui Poisson  $\nu$ ), folosite pentru determinarea tenacității la rupere sunt trecute în Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Caracteristicile mecanice ale solidelor

Material	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{fs}$ [MPa]	E [MPa]	$\nu$ [ - ]
PUR	1170	130	1600	0.40
PMMA	1200	95	3300	0.36
PVC	1400	60	3000	0.40

Modelul micromecanic cu celule pătrate utilizat pentru Modul I de rupere este prezentat în figura 4.7, iar în figura 4.8 este prezentat modelul micromecanic cu celule hexagonale pentru Modul I de rupere. De asemenea, în figura 4.9 este prezentat modelul micromecanic cu celule pătrate utilizat pentru Modul II de rupere.

Au fost impuse condiții de simetrie pe contur. Pentru a obține tenacitatea la rupere, modelul micromecanic a fost încărcat progresiv cu  $\sigma$  pentru Modul I, respectiv cu  $\tau$  pentru Modul II, până în momentul în care tensiunea maximă în peretele primei celule nefisurate atinge rezistența la rupere a materialului solid (130, 95 respectiv 60 MPa). Tenacitatea la rupere obținându-se cu relațiile [Murakami (1987)]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F_I(a/W) = K_{IC} \quad (4.15)$$

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} F_{II}(a/W) = K_{IIC} \quad (4.16)$$

unde,

$$F_I(a/W) = \frac{1 - 0.5(a/W) + 0.37(a/W)^2 - 0.044(a/W)^3}{\sqrt{1 - a/W}} \quad (4.17)$$

$$F_{II}(a/W) = 1.50 + 0.569(a/W) - 6.282(a/W)^2 - 38.157(a/W)^3 + 21.01(a/W)^4 \quad (4.18)$$

$a$  [mm]- lungimea fisurii,

$W$  [mm]- lățimea modelului micromecanic utilizat.

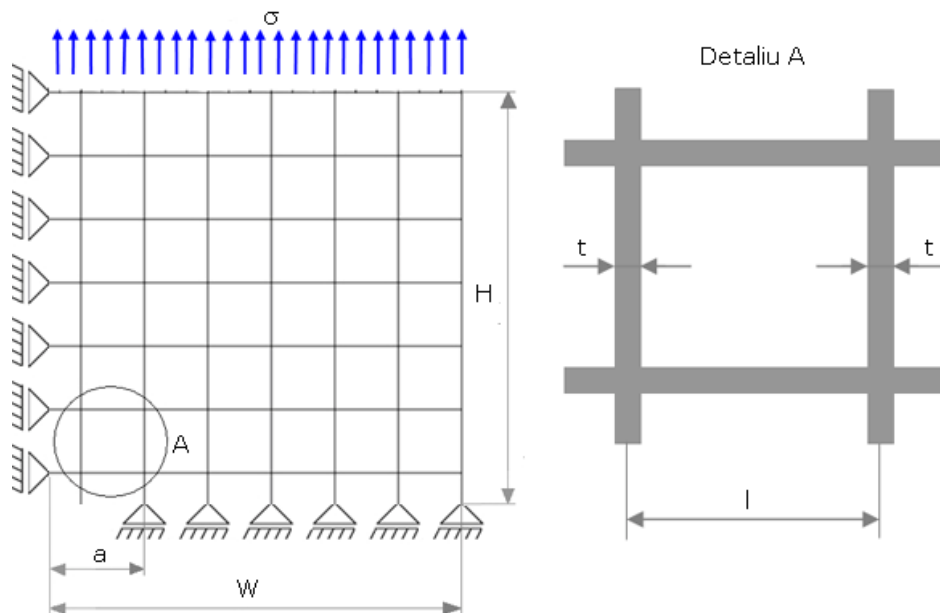


Fig. 4.7. Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul I de încărcare. Celule pătrate

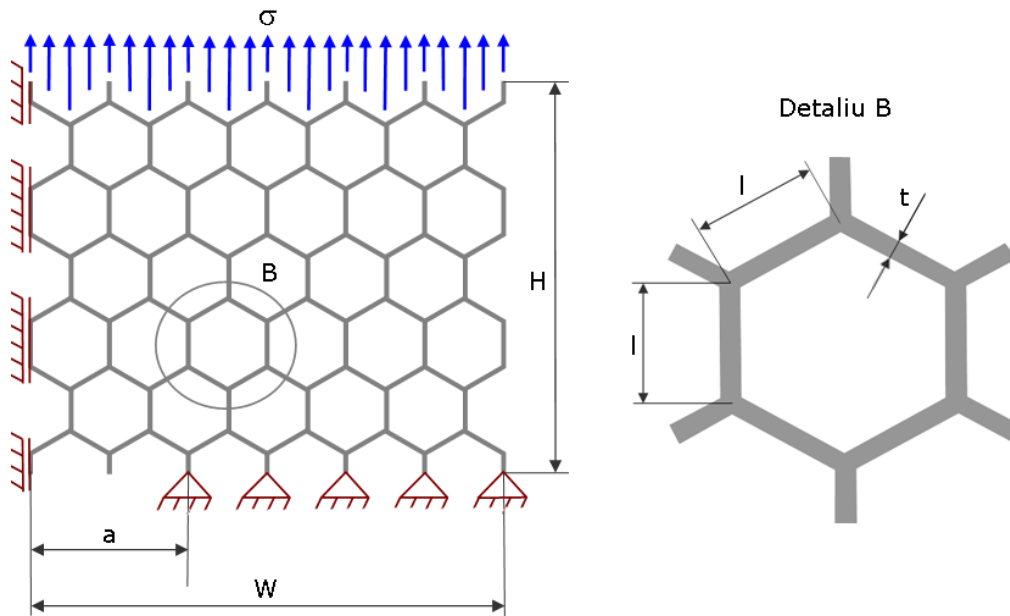


Fig. 4.8. Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul I de încărcare. Celule hexagonale

În Tabelul 4.3 sunt trecute dimensiunile modelului micromecanic utilizat precum și elementele rețelei de discretizare (număr elemente și număr noduri). Astfel, au fost analizate un număr de 276 de modele.

Tabelul 4.3. Dimensiunile modelului micromecanic cu celule pătrare

Model (txl) [mmxmm]	Densitatea relativă ( $\rho^*/\rho_s$ )	Numărul de celule	Dimensiunile modelului		Numărul de elemente	Numărul de noduri
			W=H [mm]	Lungimea fisurii a [mm]		
0.1x0.6	0.333	16	2.15	0.85; 1.45	624	2456
		25	2.75	0.85; 1.45; 2.05	1000	3925
		36	3.35	0.85; 1.45; 2.05	1464	5736
		49	3.95	0.85; 1.45; 2.05; 2.65	2016	7889
		64	4.55	0.85; 1.45; 2.05; 2.65; 3.25	2656	10384
		81	5.15	0.85;1.45; 2.05; 2.65; 3.25;3.85	3384	13221
		100	5.75	0.85;1.45; 2.05; 2.65; 3.25;3.85	4200	16400
0.05x0.55	0.182	16	1.95	0.8; 1.35	624	2456
		25	2.5	0.8; 1.35; 1.9	1000	3925
		36	3.05	0.8; 1.35; 1.9	1464	5736
		49	3.6	0.8; 1.35; 1.9; 2.45	2016	7889
		64	4.15	0.8; 1.35; 1.9; 2.45; 3	2656	10384
		81	4.7	0.8; 1.35; 1.9; 2.45; 3; 3.55	3384	13221
		100	5.25	0.8; 1.35; 1.9; 2.45; 3; 3.55	4200	16400
0.02x0.52	0.077	16	1.86	0.77; 1.29	2864	11416
		25	2.35	0.77; 1.29; 1.81	4600	18325
		36	2.87	0.77; 1.29; 1.81	6744	26856
		49	3.39	0.77; 1.29; 1.81; 2.33	9296	37009
		64	3.91	0.77; 1.29; 1.81; 2.33; 2.85	12256	48784
		81	4.43	0.77;1.29; 1.81; 2.33; 2.85;3.37	15624	62181
		100	4.95	0.77;1.29; 1.81; 2.33; 2.85;3.37	19400	77200
0.05x0.75	0.133	16	2.65	1.1; 1.85	1632	6488
		25	3.4	1.1; 1.85; 2.6	2620	10405
		36	4.15	1.1; 1.85; 2.6	3840	15240
		49	4.9	1.1; 1.85; 2.6; 3.35	5292	20993
		64	5.65	1.1; 1.85; 2.6; 3.35; 4.1	6976	27664
		81	6.4	1.1; 1.85; 2.6; 3.35; 4.1; 4.85	8892	35253
		100	7.15	1.1; 1.85; 2.6; 3.35; 4.1; 4.85	11040	43760
0.05x0.95	0.105	16	3.35	1.4; 2.35	2080	8280
		25	4.3	1.4; 2.35; 3.3	3340	13285
		36	5.25	1.4; 2.35; 3.3	4896	19464
		49	6.2	1.4; 2.35; 3.3; 4.25	6748	26817
		64	7.15	1.4; 2.35; 3.3; 4.25; 5.2	8896	35344
		81	8.1	1.4; 2.35; 3.3; 4.25; 5.2; 6.15	11340	45045
		100	9.05	1.4; 2.35; 3.3; 4.25; 5.2; 6.15	14080	55920

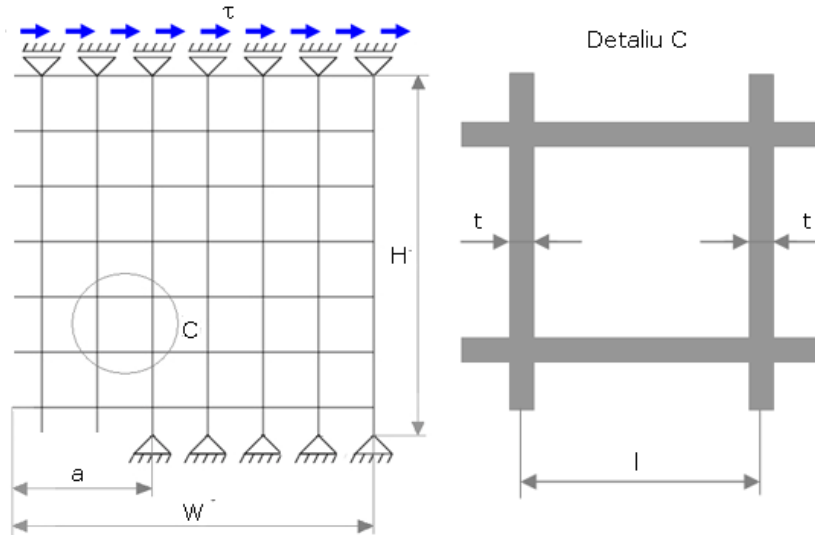


Fig. 4.9. Dimensiunile modelului micromecanic și condițiile pe contur pentru Modul II de încărcare. Celule pătrate

#### 4.2.2.2. Studiul de convergență și influența lungimii fisurii

Un studiu de convergență a fost efectuat pe un model micromecanic compus din 4x4 celule până la 10x10 celule. În figura 4.10 sunt prezentate rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I și Modul II de rupere pentru o spumă poliuretanică rigidă cu densitatea relativă de 0.105 în funcție de numărul de celule.

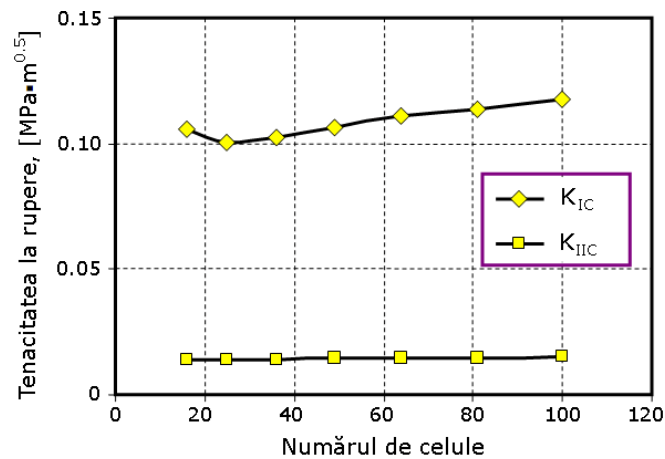


Fig. 4.10. Influența numărului de celule asupra tenacității la rupere

Diferențele relative între valorile tenacității la rupere sunt de 14.3 % pentru Modul I și de 7.9 % pentru Modul II. Această diferență scade de la modelele cu 64 de celule la cele cu 100 de celule până la 5.4 % pentru Modul I și 3.3 % pentru Modul II. Cu toate acestea, în calcule influența este nesemnificativă, utilizându-se în continuare modelul cu 100 de celule pentru evaluarea tenacității la rupere.

În figura 4.11 este prezentată influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere pentru o spumă poliuretanică rigidă cu densitatea relativă de 0.105. În acest caz au fost luate în considerare șase lungimi ale fisurii: 1.4; 2.35; 3.3; 4.25; 5.2 și 6.15 mm, păstrând constantă mărimea modelului. Diferențele relative pentru tenacitatea la rupere au fost 1.3% pentru Modul I și 4.3% pentru Modul II indicând faptul că tenacitatea la rupere prezisă este independentă de lungimea fisurii și poate fi considerată o constantă de material.

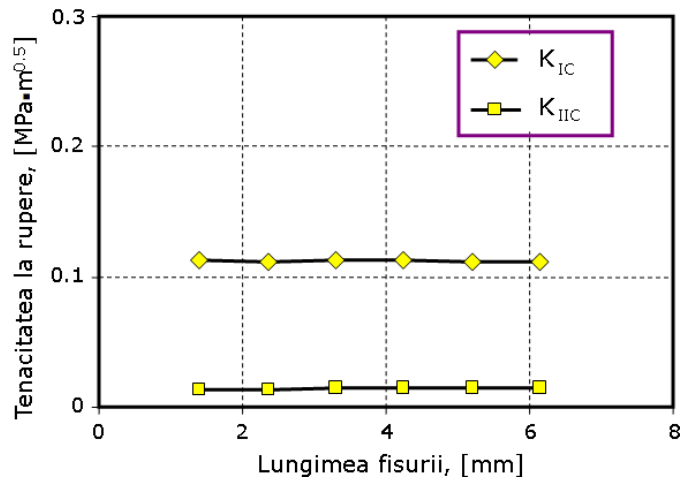


Fig. 4.11. Influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere

Figura 4.12 prezintă deformata pentru o lungime a fisurii  $a = 0.85$  mm și un număr diferit de celule (de la 16 celule până la 100 celule), încărcate în Modul I.

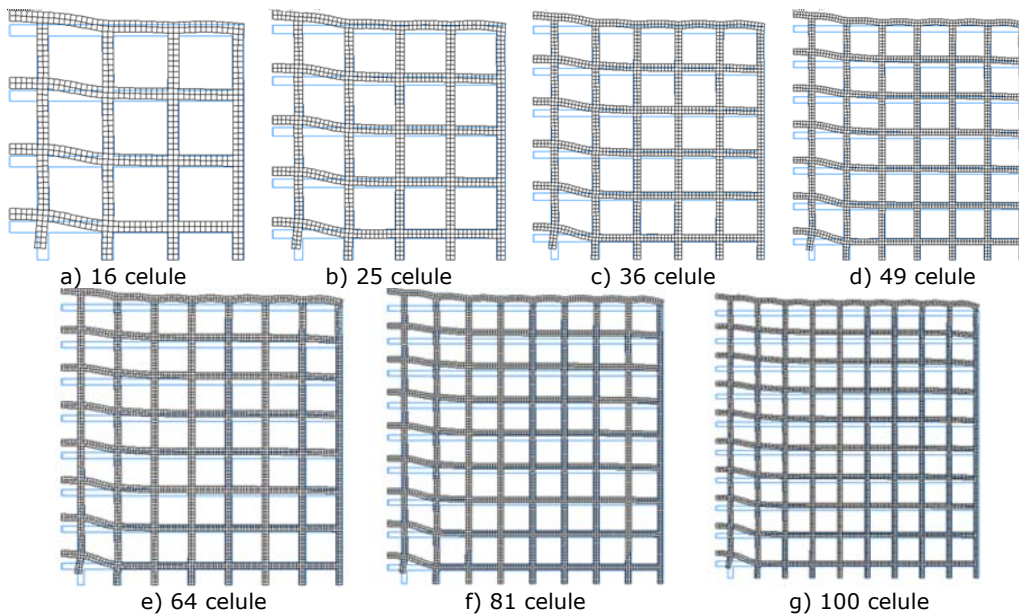


Fig. 4.12. Deformata modelului micromecanic încărcat prin Modul I de rupere pentru o lungime a fisurii  $a=0.85$  mm

#### 4.2.2.3. Determinarea tenacității la rupere prin Modul I de încărcare

Fisura se presupune a fi perpendiculară pe direcția de încărcare. Fisura este creată prin ruperea legăturilor dintre celule, [Choi și Sankar (2003)]. Figura 4.13 prezintă deformata pentru o spumă poliuretanică cu  $l=0.6$  mm și  $t=0.1$  mm, fisura având diferite lungimi.

Tenacitatea la rupere pentru Modul I a fost obținută prin încărcări progresive ale modelului cu încărcarea aplicată  $\sigma$  până în momentul în care tensiunea maximă în peretele primei celule nefisurate atinge rezistența la rupere a solidului  $\sigma_{fs}$ , (figura 4.14). Această valoare a încărcării aplicate a fost utilizată în ecuația (4.9), pentru a calcula tenacitatea la rupere pentru Modul I de încărcare,  $K_{IC}$ .

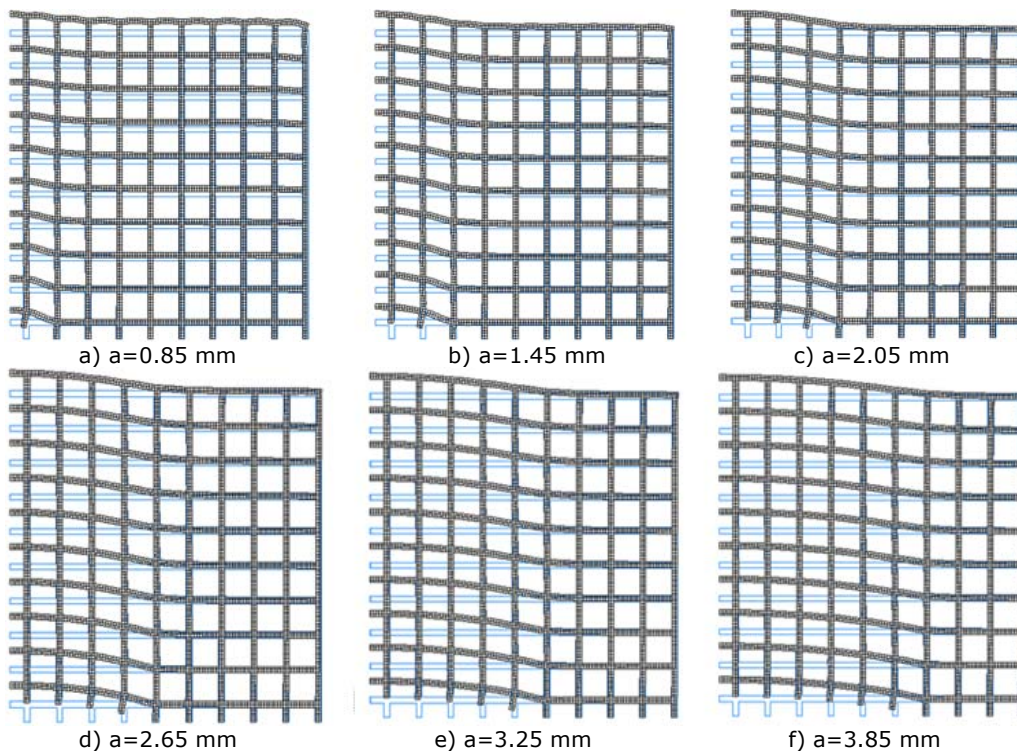


Fig. 4.13. Modelul deformat pentru Modul I de încărcare

În figura 4.14a,b este prezentată distribuția tensiunii  $\sigma_y$  în primul perete nerupt dinaintea fisurii pentru cele două tipuri de celule (pătrate și hexagonale), iar în figura 4.15 este arătată variația acestei tensiunii pe grosimea peretelui celulei. Valoarea încărcării aplicate  $\sigma$ , care produce tensiunea  $\sigma_{y,max} = \sigma_{fs}$ , a fost utilizată în ecuația (4.9) pentru estimarea tenacității la rupere.

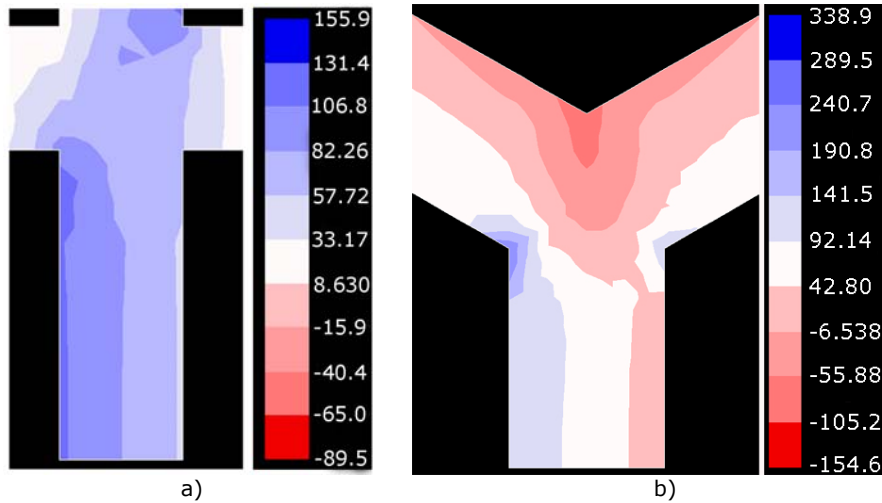


Fig. 4.14 Distribuția tensiunilor  $\sigma_y$  în primul perete nerupt pentru Modul I de rupere: a) model cu celule pătrate; b) model cu celule hexagonale;

În peretele primei celule nefisurate apare o solicitare compusă de întindere și încovoiere (figura 4.15), [Linul și Marsavina (2011b,d)], ceea ce confirmă ipoteza modelului micromecanic al lui Choi și Sankar, (2005), și infirmă modelul propus de Gibson și Ashby, (1997), care iau în considerare doar tensiunea dată de încovoiere.

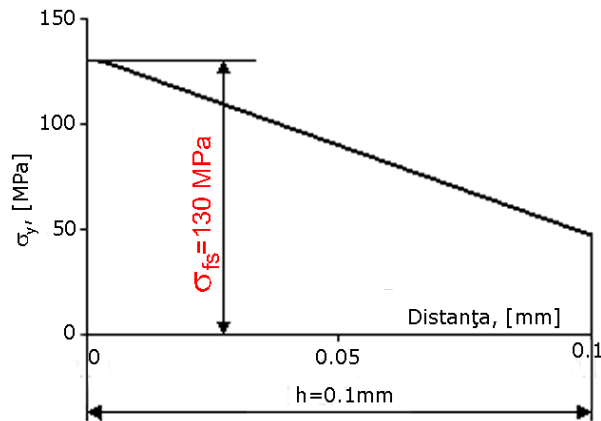


Fig. 4.15. Variația tensiunilor  $\sigma_y$  în primul perete nerupt pentru Modul I de rupere

Întrucât densitatea relativă depinde de lungimea celulei  $l$  și de dimensiunea secțiunii transversale a peretelui celulei  $t$ , tenacitatea la rupere a fost calculată prin două metode. În primul caz, lungimea celulei  $l$  a fost cvasi-constantă, (0.6; 0.55 și 0.52 mm), iar dimensiunea secțiunii transversale a peretelui celulei  $t$  a fost considerată variabilă, (0.1, 0.05, 0.02 mm), în timp ce pentru al doilea caz, dimensiunea secțiunii transversale a peretelui celulei  $t$  a fost constantă, (0.05 mm), iar lungimea celulei  $l$  a fost considerată variabilă, (0.55, 0.75, 0.95 mm). Variația tenacității la rupere funcție de densitatea relativă pentru Modul I de rupere pentru o spumă poliuretanică este arătată în figura 4.16.



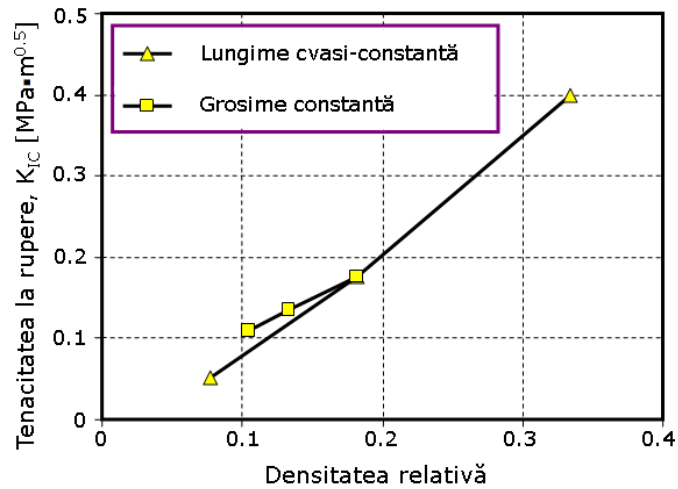


Fig. 4.16. Tenacitatea la rupere obținută prin Modul I de rupere funcție de densitatea relativă pentru cele două cazuri studiate (lungime cvasi-constantă, grosime constantă)

Valorile tenacității la rupere obținute pentru o spumă poliuretanică s-au încadrat între  $0.051 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (pentru densitatea relativă de 0.077) și  $0.384 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (pentru densitatea relativă de 0.333).

#### 4.2.2.4. Determinarea tenacității la rupere prin Modul II de încărcare

Analiza tenacității la rupere prin Modul II este similară cu cea prezentată la Modul I. Un exemplu de deformare prin Modul II de rupere pentru o spumă poliuretanică cu  $l=0.55 \text{ mm}$  și  $t=0.05 \text{ mm}$ , este arătată în figura 4.17a, iar în figura 4.17b este prezentată în detaliu zona fisurii.

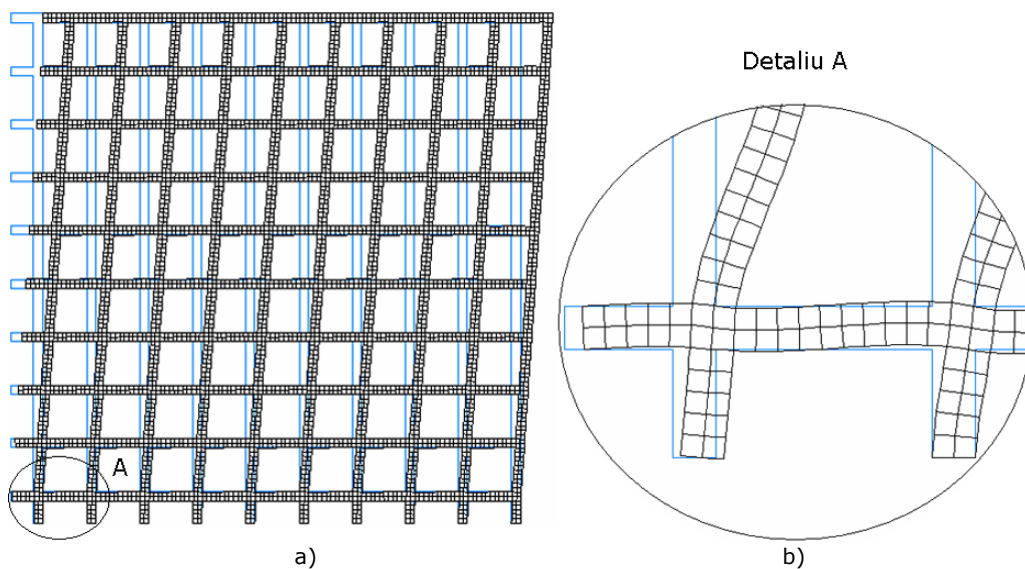


Fig. 4.17. Deformarea spumei pentru Modul II de rupere pentru  $a=0.85 \text{ mm}$

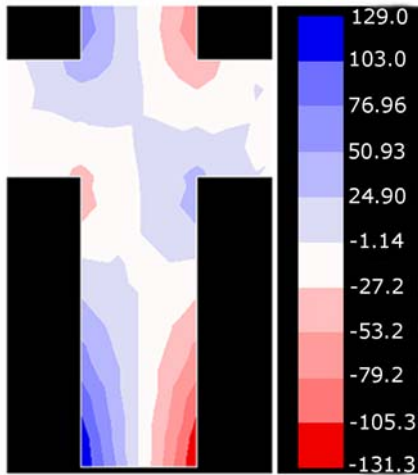


Fig. 4.18. Distribuția tensiunilor  $\sigma_y$  în peretele primei celule nefisurate pentru Modul II de rupere

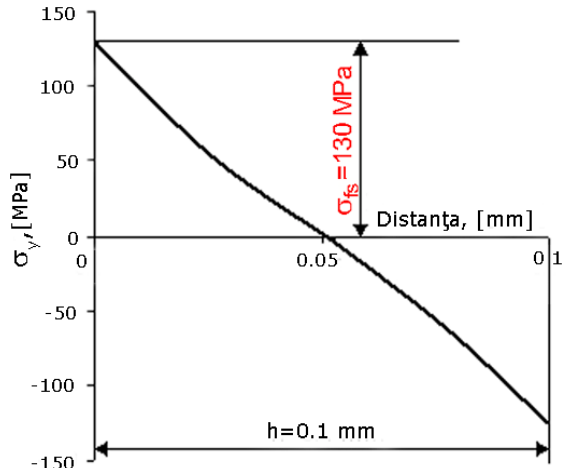


Fig. 4.19. Variația tensiunilor  $\sigma_y$  în peretele primei celule nefisurate pentru Modul I de rupere

În figura 4.18 se poate observa distribuția tensiunii  $\sigma_y$  în peretele primei celule nefisurate pentru Modul II de rupere, iar în figura 4.19 variația tensiunii pe grosimea peretelui. Încovoierea pură apare acolo unde tensiunea la întindere este maximă, adică în apropierea vârfului fisurii. Valoarea încărcării aplicate  $\tau$ , care produce tensiunea  $\sigma_{y,max} = \sigma_{fs}$ , a fost utilizată în ecuația (4.13) pentru estimarea tenacității la rupere pentru Modul II.

Figura 4.20 prezintă tenacitatea la rupere funcție de densitatea relativă pentru o spumă poliuretanică pentru Modul II de rupere.

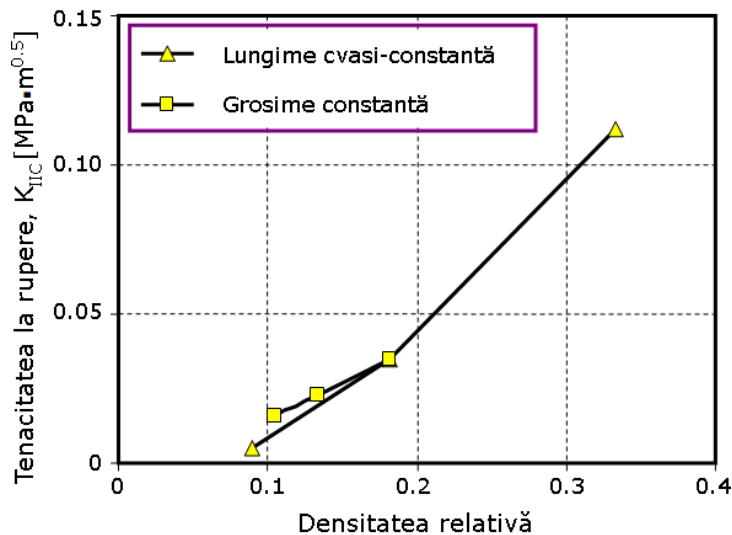


Fig. 4.20. Tenacitatea la rupere obținută prin Modul II de rupere funcție de densitatea relativă pentru cele două cazuri studiate (lungime cvasi-constantă, grosime constantă)

Valorile tenacității la rupere obținute prin Modul II de rupere sunt cuprinse între  $0.006 \text{ MPa m}^{0.5}$  (pentru spuma cu densitatea relativă de 0.077) și  $0.105 \text{ MPa m}^{0.5}$  (pentru spuma cu densitatea relativă de 0.333).

#### 4.2.3. Rezultate și discuții

Atât tenacitatea la rupere cât și rezistența la rupere la tracțiune pentru spumele fragile depind de rezistența la rupere a materialului solidului, [Gibson și Ashby (1997)]. În figura 4.21 sunt prezentate valorile normalizate ale tenacității la rupere pentru PUR în comparație cu modelul Gibson-Ashby pentru Modul I de rupere. Tenacitatea la rupere este normalizată în ceea ce privește rezistența la rupere a materialului solidului  $\sigma_{fs}$  și mărimea celulei,  $l$ , fiind prezentată funcție de densitatea relativă  $\rho^*/\rho_s$ . Linia continuă indică modelul Gibson-Ashby pentru celule deschise și are o pantă de  $3/2$ . Se poate observa un acord foarte bun între tenacitatea la rupere din studiul prezentat și modelul Gibson – Ashby.

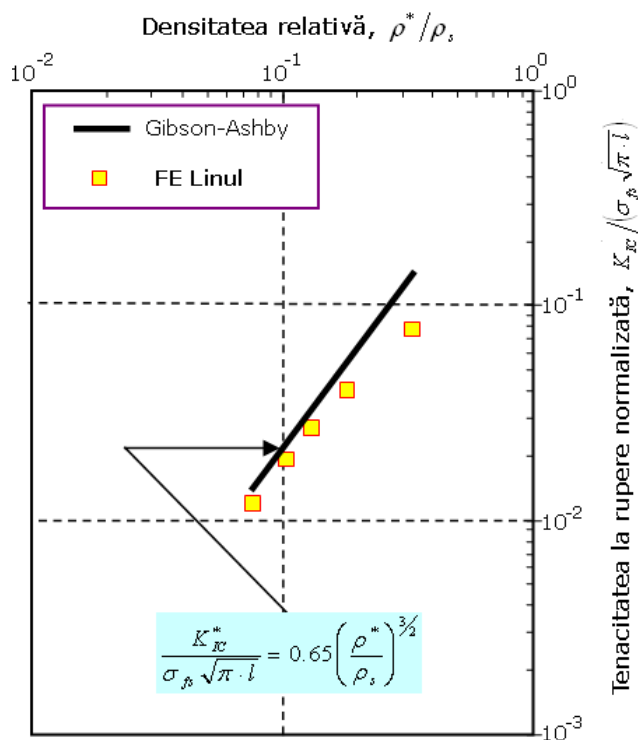


Fig. 4.21. Tenacitatea la rupere normalizată funcție de densitatea relativă pentru Modul I de rupere

Figura 4.22 prezintă valorile estimate ale tenacității la rupere pentru Modul II de rupere comparativ cu modelul micromecanic al lui Choi și Shankar, (2005).

De asemenea, se poate observa că rezultatele obținute în cadrul acestui studiu se încadrează între cele două limite propuse de către Choi și Shankar prin modelul lor micromecanic. Pentru valori ale raportului  $\rho^*/\rho_s < 0.1$ , rezultatele prezentate sunt mai mici decât rezultatele prezise de alte modele micromecanice.

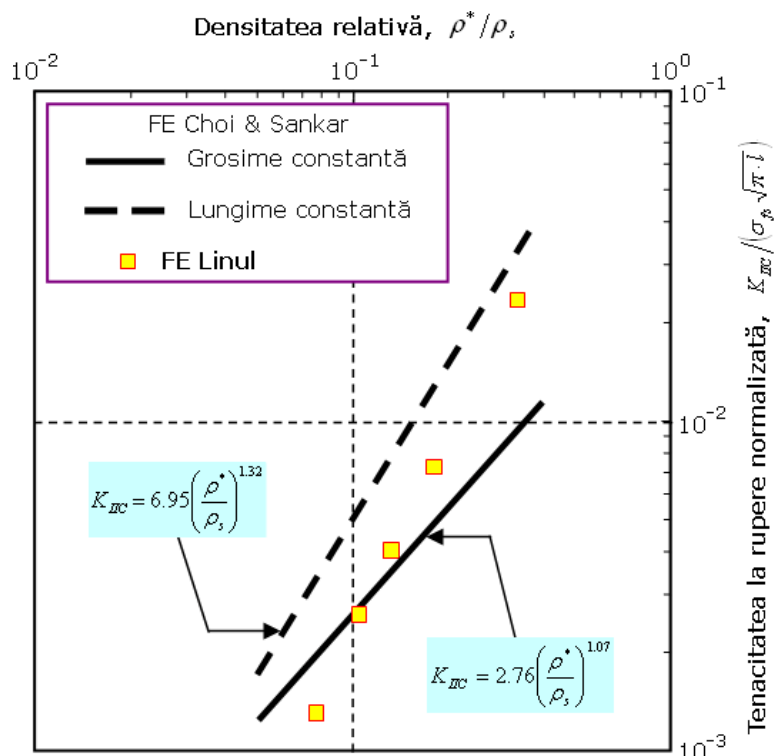


Fig. 4.22. Tenacitatea la rupere normalizată funcție de densitatea relativă pentru Modul II de rupere

Metodologia prezentată mai sus a mai fost aplicată încă pentru două tipuri de materiale celulare: PMMA și PVC. Valorile tenacității la rupere pentru Modul I de rupere sunt trecute în Tabelul 4.4, iar Tabelul 4.5 prezintă valorile tenacității obținute pentru Modul II de rupere.

În Tabelele A.19 – A.23 din Anexe sunt prezentate toate valorile tenacității la rupere obținute pentru cele trei tipuri de materiale (PUR, PMMA și PVC), atât pentru Modul I de rupere cât și pentru Modul II de rupere, pentru diferite valori ale densității relative, (0.077; 0.105; 0.133; 0.182, respectiv 0.333).

Tabelul 4.4. Valorile tenacității la rupere pentru Modul I de rupere

l [mm]	t [mm]	$\rho/\rho_s$ [-]	$K_{IC,PUR}$ [MPa√m]	$K_{IC,PMMA}$ [MPa√m]	$K_{IC,PVC}$ [MPa√m]
0.52	0.02	0.077	0.051	0.041	0.033
0.60	0.10	0.333	0.384	0.347	0.218
0.55	0.05	0.182	0.186	0.163	0.102
0.75	0.05	0.133	0.141	0.131	0.081
0.95	0.05	0.105	0.112	0.109	0.069
0.35	0.10	0.333	0.402 <sup>#</sup>	-	-

<sup>#</sup> valoarea obținută este pentru celule hexagonale

Tabelul 4.5. Valorile tenacității la rupere pentru Modul II de rupere

l [mm]	t [mm]	$\rho/\rho_s$ [-]	$K_{IIC,PUR}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	$K_{IIC,PMMA}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	$K_{IIC,PVC}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]
0.52	0.02	0.077	0.006	0.004	0.003
0.60	0.10	0.333	0.105	0.080	0.048
0.55	0.05	0.182	0.032	0.024	0.015
0.75	0.05	0.133	0.021	0.015	0.010
0.95	0.05	0.105	0.015	0.011	0.007

### 4.3. Comparație între modelele micromecanice și rezultatele experimentale

Modelele micromecanice reprezintă unelte cu ajutorul cărora se poate prezice comportamentul materialelor celulare, [Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a), Avalle și alții (2007)]. De asemenea, modelele micromecanice pot arăta mult mai bine proprietățile multiaxiale și răspunsul materialelor celulare. Astfel, pentru a avea o credibilitate destul de mare, aceste rezultate obținute cu ajutorul modelelor micromecanice trebuie validate experimental. Acest capitol prezintă o comparație a parametrilor mecanici obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei obținuți în urma programului experimental.

#### 4.3.1. Comparație între modelele micromecanice și rezultatele experimentale obținute la compresiune

Teoretic, plecând de la proprietățile solidului și densitatea spumei, se pot obține caracteristicile mecanice ale spumei studiate, (modulul de elasticitate, tensiunea de curgere, tensiunea de platou și densificarea).

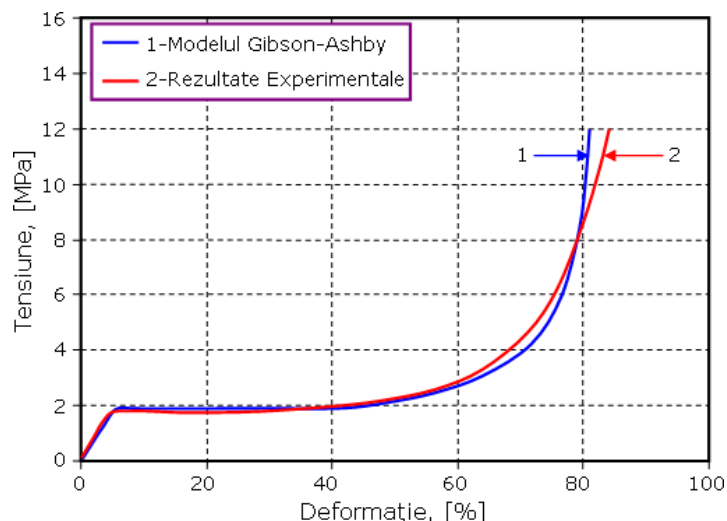


Fig. 4.23. Comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și rezultatele experimentale

În figura 4.23 se prezintă o comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și o spumă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$  încărcată într-un plan paralel cu planul de formare, [Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a), Marșavina și alții (2009)]. De asemenea, o comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby modificat și o spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$  încărcată într-un plan perpendicular cu planul de formare, [Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a)] este prezentată în figura 4.24.

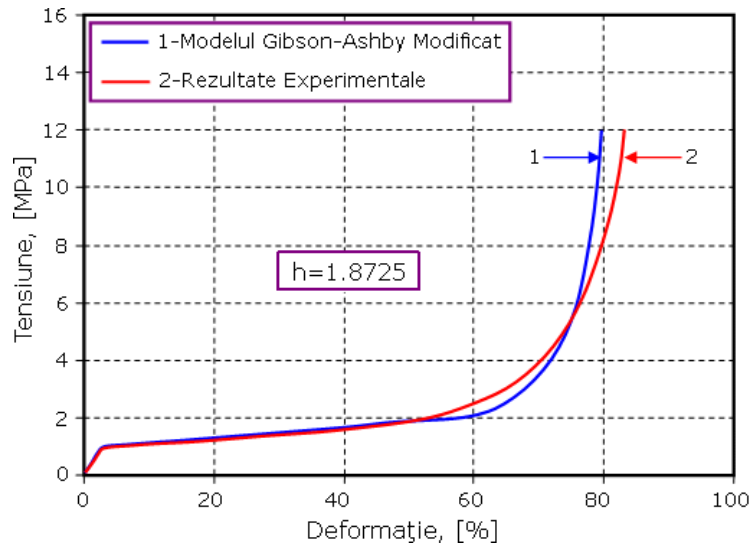


Fig. 4.24. Comparație între modelul micromecanic Gibson-Ashby și rezultatele experimentale

Din exemplul prezentat mai sus se poate observa foarte ușor că pentru aceeași densitate a spumei, odată cu schimbarea direcției de încărcare asupra planului de formare se obține un comportament diferit, rezultând totodată proprietăți diferite.

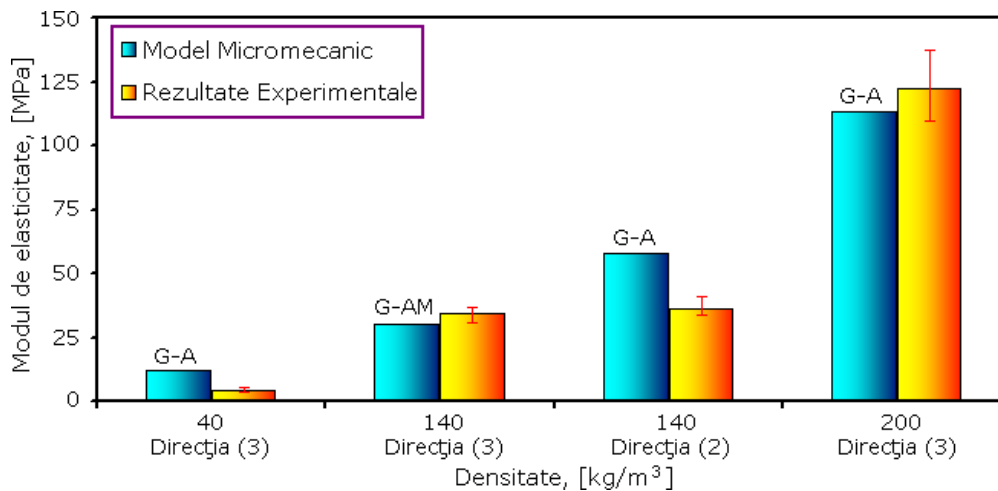


Fig. 4.25. Comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei rezultați în urma testelor. Modulul de elasticitate

În figurile 4.25, 4.26 și 4.27 sunt prezentate comparații ale parametrilor obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei obținuți experimental (modulul de elasticitate, tensiunea de curgere și tensiunea de platou), [Linul și alții (2010a), Linul și Marșavina (2011a)].

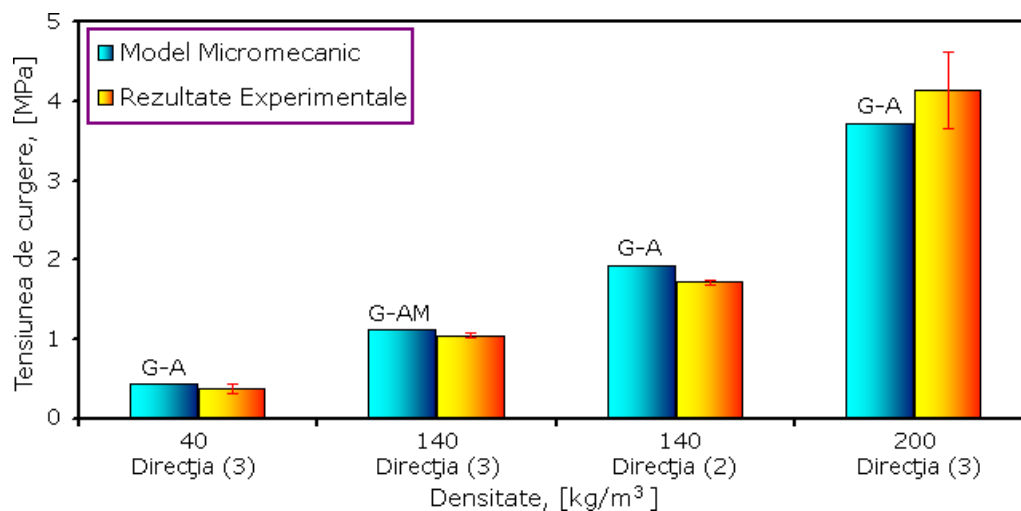


Fig. 4.26. Comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei rezultați în urma testelor. Tensiunea de curgere

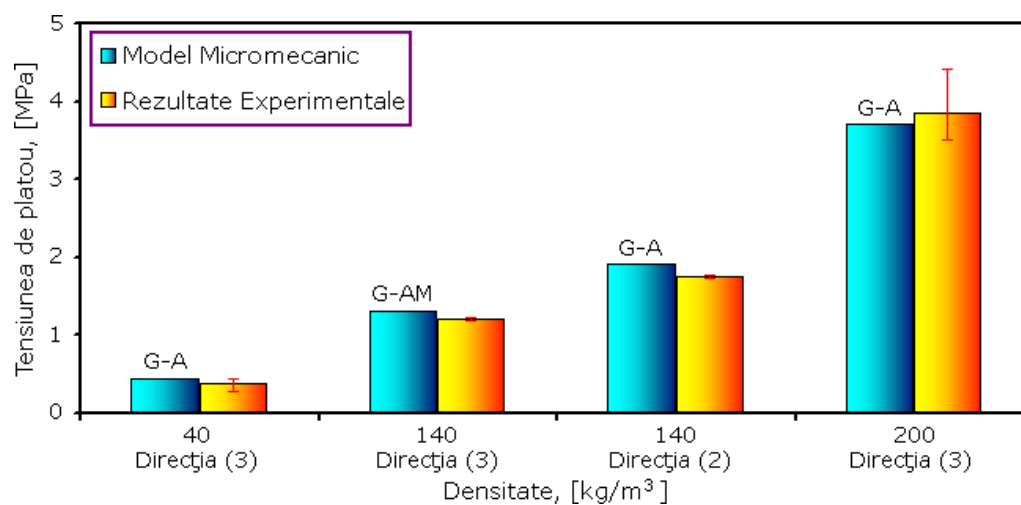


Fig. 4.27. Comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și cei rezultați în urma testelor. Tensiunea de platou

Din diagramele prezentate mai sus se observă că valorile estimate ale caracteristicilor mecanice cu ajutorul modelelor micromecanice sunt validate de rezultatele obținute în urma încercărilor experimentale.

Notațiile din figură reprezintă următoarele:

- G-A (Modelul Gibson-Ashby),
- G-AM (Modelul Gibson-Ashby Modificat),

Modelele micromecanice studiate (Modelul micromecanic Gibson-Ashby și Modelul micromecanic Gibson-Ashby Modificat), se aleg astfel încât să se obțină o fitare cât mai bună a rezultatelor. Având în vedere că spuma prezintă un comportament anizotrop, încercările experimentale s-au realizat pe două direcții diferite (fie pe Direcția (2) - încărcarea este paralelă cu planul de formare, fie pe Direcția (3) - încărcarea este perpendiculară pe planul de formare - a se vedea Capitolul 3), în consecință trebuie ales modelul micromecanic cel mai apropiat de rezultatele experimentale.

#### 4.3.2 Comparație între modelele micromecanice și rezultatele experimentale privind tenacitatea la rupere

Viana și Carlsson, (2002), respectiv Kabir și alții, (2006), au utilizat procedura descrisă de standardul ASTM D5045 și au determinat tenacitatea la rupere atât pentru policlorura de vinil (PVC) cât și pentru diferite densități ale spumei poliuretanică rigidă (PUR). Ei au investigat influența densității, efectul de scară, influența vitezei de încărcare și influența orientării celulelor. Marșavina și Linul (2010) au studiat experimental influența densității asupra tenacității la rupere pentru spumele poliuretanică rigidă. De asemenea, efectul de scară, influența densității, a planului de formare și a vitezei de încărcare au fost investigate de către Linul și Marșavina, (2011c) și de către Linul și alții, (2011b). Rezultatele experimentale ale tenacității la rupere funcție de densitatea relativă sunt prezentate în figura 4.28 împreună cu valorile estimate ale tenacității la rupere obținute cu ajutorul modelelor micromecanice.

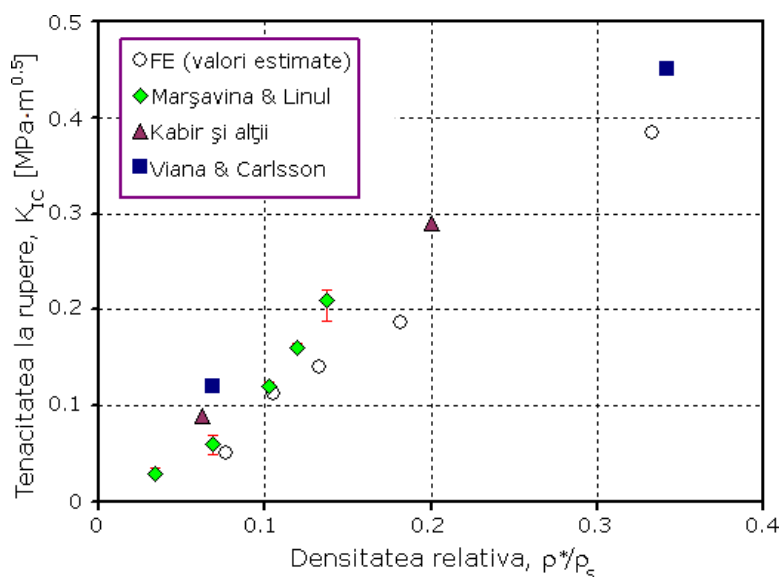


Fig. 4.28. Comparație între valorile estimate cu ajutorul modelelor micromecanice și cele obținute experimental ale tenacității la rupere pentru Modul I de rupere

Din figura prezentată mai sus se poate observa o bună corelare a rezultatelor estimate cu ajutorul modelelor micromecanice de analiză cu elemente finite pentru densități relative scăzute sub 0.15, ceea ce înseamnă că valorile estimate sunt validate experimental. Peste aceste valori există mai puține date



experimentale și în general forma celulelor este diferită de cea tip fagure sau celule pătrate utilizate în simulare ceea ce explică diferențele mai mari între valorile experimentale și cele obținute numeric.

-----

În prima parte a acestui capitol s-au prezentat ecuațiile care au stat la baza determinării curbelor tensiune-deformație la compresiune cu ajutorul a două modele micromecanice (Modelul Gibson-Ashby și Modelul Gibson-Ashby modificat). S-a realizat o comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și rezultatele experimentale la compresiune. Parametrii care au fost luați în considerare sunt reprezentați de: modulul de elasticitate, tensiunea de curgere și tensiunea de platou.

Folosind metoda elementelor finite și programul Franc 2D s-a realizat o predicție a tenacității la rupere pentru materialele celulare (PUR, PMMA și PVC), atât pentru Modul I cât și pentru Modul II de rupere. S-a realizat atât un studiu de convergență cât și influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere pentru o spumă poliuretanică rigidă. De asemenea, s-a prezentat o comparație între rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I și Modul II de rupere estimate cu ajutorul modelelor micromecanice și rezultatele experimentale din bibliografie.

## 5. ABSORBȚIA DE ENERGIE ÎN MATERIALELE CELULARE

### 5.1. Noțiuni generale

Absorbția de energie este extrem de importantă pentru domeniul ambalării. Mâncarea este ambalată, coletele poștale sunt ambalate, și chiar noi înșine suntem "ambalati" cu atenție într-o mașină. Este greu de estimat cât se cheltuiește cu aceste ambalaje sau care este valoarea bunurilor deteriorate din cauza ambalajelor necorespunzătoare, dar cu siguranță sumele implicate sunt considerabile, iar profitul rezultat în urma oricărei îmbunătățiri este mare.

Esența unei ambalări cât mai eficace constă în capacitatea de a transforma energia cinetică într-un alt tip de energie (de obicei, căldură), prin plasticitate, vâscozitate, vâsco-elasticitate sau frecare; iar acest lucru trebuie făcut prin păstrarea forței maxime care duce la deteriorare. De cele mai multe ori, în aplicațiile practice, direcția de impact nu poate fi anticipată, în acest caz ambalajul trebuie să protejeze conținutul prin absorbția energiei de impact din orice parte. Deoarece ambalajul trebuie transportat cu obiectul pe care îl protejează, acesta trebuie să prezinte o greutate redusă. Având în vedere că, cele mai multe ambalaje se elimină, ele trebuie să fie cât mai ieftine.

Utilizate în acest scop, spumele prezintă caracteristici foarte bune la un preț scăzut. În figura 5.1 este prezentată capacitatea de absorbție a energiei a unei spume comparativ cu solidul din care este făcută.

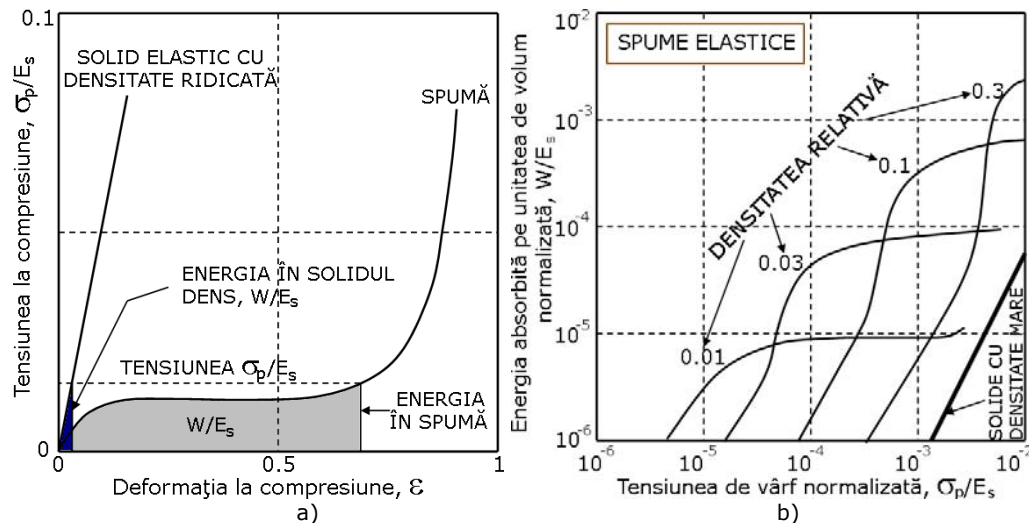


Fig. 5.1. a) Curbele tensiune-deformație pentru un solid elastic și pentru o spumă realizată din același solid, prezentând energia pe unitatea de volum; b) Energia absorbită pe unitatea de volum funcție de tensiunea de vârf, la impact, atât pentru solid cât și pentru spuma realizată din el, [Gibson și Ashby (1997)]

Pentru aceeași energie absorbită, spuma generează întotdeauna o forță maximă mai mică decât solidul din care este făcută. Energia este absorbită în momentul în care pereții celulei se deformează plastic, flambează sau se rup (funcție de materialul din care este realizată spuma), iar în acest caz tensiunea este limitată de un platou lung și plat, care se poate vedea în curba tensiune-deformație (figura 2.1). Prin alegerea corectă a materialului peretelui celulei și a densității relative, spuma poate fi adaptată pentru a da cea mai bună combinație de proprietăți pentru un ambalaj dat.

La o anumită tensiune de vârf,  $\sigma_p$ , spumele absorb întotdeauna o cantitate mai mare de energie decât solidele. În figura 5.1b ambele axe sunt normalizate.

În acest domeniu, al utilizării spumelor pentru ambalare și amortizare literatura este destul de vastă. Sunt scrise cărți și articole pe aceasta temă de către Mustin (1968), Hilyard (1982), Lockett, Cousins și Dawson (Cousins, 1976ab) și Lockett și alții (1981), Green și alții (1969), Rusch (1970, 1971), Lee și Williams (1971), Melvin și Roberts (1971), Meinecke și Schwaber, (1970); Meinecke și alții (1971); Schwaber și Meinecke, (1971); Schwaber, (1973). De asemenea, scrieri mai recente au fost realizate de către Mills (1994) și Ghibson și Ashby (1997).

## 5.2. Mecanismele energiei de absorbție

În momentul în care o spumă este încărcată, lucrul mecanic este realizat de către forțele aplicate. Lucrul mecanic pe unitatea de volum în deformarea spumei la o deformație  $\varepsilon$  este reprezentat de aria de sub curba tensiune-deformație până la deformația  $\varepsilon$  (figura 5.2). O cantitate foarte mică de energie este absorbită în zona liniar-elastică, deoarece această zonă este relativ mică (sub 5%). După cum se vede și în figura 5.2, marea parte a energiei este absorbită în zona de platou, deoarece aici au loc flambajul, curgerea sau ruperea celulelor, acestea permițând o absorbție mare a energiei de impact la o încărcare aproape constantă.

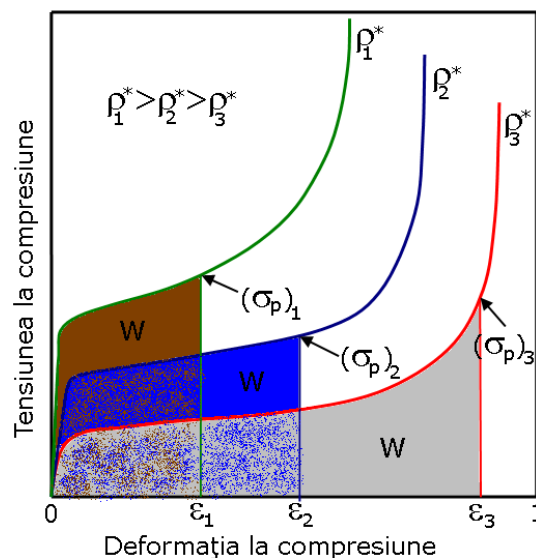


Fig. 5.2. Tensiunile de vârf [  $(\sigma_p)_1$ ,  $(\sigma_p)_2$  și  $(\sigma_p)_3$  ], generate într-o spumă cu trei densități diferite, absorbind aceeași cantitate de energie W.

Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $\rho_3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W$ , generează tensiunea de vârf cea mai mare,  $(\sigma_p)_3$ . Spuma cu densitatea cea mai mare ( $\rho_1$ ), generează de asemenea o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_1$  înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W$ . Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $\rho_2$ ), care absoarbe aceeași energie  $W$ , generând o tensiune de vârf de valoare mai mică,  $(\sigma_p)_2$ .

Uniformitatea acestui platou depinde de materialul și densitatea spumei și de viteza de deformare. Din acest motiv, trebuie să se înțeleagă bine care este diferența între vitezele de deformare "mici", "intermediare" și "mari" și vitezele de impact. De obicei, echipamentele din laboratoarele de întindere sau compresiune, asigură viteze de deformare "mici": intervalul fiind de aproximativ  $10^{-8}$ - $10^{-2}$  m/s. Convertită la o viteză de impact pentru o spumă compresibilă cu grosimea de 100 mm, obținem o viteză de  $10^{-9}$ - $10^{-3}$  m/s. În practică, aproape toate ambalajele trebuie să facă față la viteze de impact mult mai mari decât aceasta, rezultând că datele obținute în acest mod nu sunt relevante.

Căderea liberă de la o înălțime mai mare de 1 m, dă o viteză de impact de peste 4 m/s, cu o viteză de deformare de aproximativ 40 m/s. Aceste viteze de deformare "intermediare", sunt reproduse în laborator cu echipamente de testare servo-hidraulice de mare viteză și cu ajutorul ciocanului Charpy. Proiectările auto necesită protecție împotriva unor viteze de impact de până la 40 m/s; iar impactul balistic poate fi de 50 de ori mai mare decât acesta, corespunzând unei viteze de deformare de ordinul  $10^4$  m/s. Dispozitivele de încărcare dinamică, cum ar fi armele cu gaze și echipamentele cu încărcătură explozivă, permit investigarea vitezelor "mari" de impact.

Un anumit număr de mecanisme lucrează împreună pentru absorbția de energie în spume, [Schwaber, (1973)]. Unele sunt legate de deformarea elastică, plastică sau fragilă a pereților celulei, iar altele sunt legate de comprimarea sau curgerea fluidului din interiorul celulelor. Mecanismele relevante pentru o anumită spumă depind de comportamentul materialului peretelui celulei și de faptul dacă celulele sunt închise sau deschise.

Tensiunea de platou pentru spumele elastomerice (folosite pentru amortizare și căptușeli), este determinată de flambajul elastic al celulelor (Capitolul 2). Spumele plastice și cele fragile prezintă comportament diferit. Aceste materiale sunt deosebit de eficiente în aplicațiile de ambalare de înaltă performanță, ducând la absorbția de energie mari și controlate.

De asemenea, se mai pot adăuga la acestea și alte mecanisme cum ar fi cele legate de "deformarea" fluidului din interiorul celulelor. În spumele cu celule deschise, fluidul dintre pori este expulzat dând naștere la o disipare vâscoasă. Trebuie ținut cont că această disipare de energie este puternic legată de viteza de deformare. Excepție de la această regulă este cazul în care celulele sunt mici și fluidul din celule este foarte vâscos, ea devenind importantă numai la viteze mari ( $10^3$  m/s sau mai mult). În spumele cu celule închise, fluidul din celule este comprimat pe măsură ce spuma se deformează, stocând energia care este în mare parte recuperată în momentul în care spuma nu mai este descărcată. Spre deosebire de disiparea vâscoasă, acest mecanism de înmagazinare este aproape independent de viteza de deformare.

În cele ce urmează se va studia modul de absorbție a energiei în spume și, de asemenea, se vor prezenta ecuațiile simple pentru fiecare mecanism.

### 5.2.1. Platoul de absorbție în spumele cu celule deschise

Lucrul mecanic efectuat la comprimarea unei spume cu celule deschise este realizat de către flambajul elastic, curgerea plastică sau strivirea fragilă a pereților celulei.

Fiecare mecanism prezentat mai sus are loc la o încărcare aproape constantă până în momentul în care spuma este complet strivită; urmând apoi o creștere bruscă a încărcării. Energia absorbită pe unitatea de volum, până la o deformație,  $\varepsilon$ , este dată de relația următoare:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5.1)$$

Acolo unde platoul este plat (orizontal), tensiunea de platou  $\sigma^*$ , este aproape constantă, iar energia absorbită este dată de o relație aproximativă:

$$W \approx \sigma^* \varepsilon \quad (5.2)$$

Energia,  $W$ , și tensiunea,  $\sigma^*$ , depind de viteza de deformație,  $\dot{\varepsilon}$ , și de temperatura,  $T$ . Dar din moment ce  $W$  este proporțional cu  $\sigma^*$ , ecuația (5.2) rămâne valabilă deoarece  $\dot{\varepsilon}$  și  $T$  nu apar în mod explicit.

### 5.2.2. Disiparea vâscoasă în spumele cu celule deschise

În momentul în care o spumă cu celule deschise este comprimată, fluidul vâscos din pori este eliminat [Kosten și Zwikker, (1939); Gent și Rusch, (1966a,b); Hilyard și Kanakkannatt, (1970)]. Contribuția fluidului asupra rezistenței unei spume cu celule deschise, este dată de relația:

$$\sigma_g^* = \frac{C\mu\dot{\varepsilon}}{(1-\varepsilon)} \left(\frac{L}{l}\right)^2 \quad (5.3)$$

unde,  $C$ , este o constantă de proporționalitate cu valoare apropiată cu unitatea,  $\dot{\varepsilon}$  este viteza de deformație,  $L$ , dimensiunile probei,  $l$ , mărimea celulei, iar  $\mu$ , este vâscozitatea dinamică a fluidului dată de relația:

$$\mu = \mu_0 \exp Q/RT \quad (5.4)$$

unde,  $Q$ , este energia de activare a curgerii vâscoase, iar  $R$ , este constanta gazelor.

Lucrul mecanic efectuat la comprimarea fluidului într-o spumă cu celule deschise, la o deformație  $\varepsilon_f$ , cu o viteză de deformație constantă este:

$$W_g = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_g^* d\varepsilon = C\mu\dot{\varepsilon} \left(\frac{L}{l}\right)^2 \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon_f}\right) \quad (5.5)$$

Presupunând că viteza de deformație începe la  $\varepsilon_i$  dar scade liniar la zero la o deplasare  $\varepsilon_f$ , atunci putem scrie că:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_i(\varepsilon_f - \varepsilon)}{\varepsilon_f} \quad (5.6)$$

și

$$W_g = C\mu \dot{\varepsilon}_i \left(\frac{L}{l}\right)^2 \left[ 1 + \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_T}\right) \ln(1 - \varepsilon_f) \right] \quad (5.7)$$

În ambele cazuri, energia disipată crește pe măsură ce vâscozitatea fluidului crește și respectiv mărimea celulei descrește.

### 5.2.3. Comprimarea fluidului din porii spumelor cu celule închise

În momentul în care o spumă cu celule închise este comprimată, fluidul din interiorul celulei este comprimat. Aproape întotdeauna acest fluid este un gaz, iar el se opune comprimării spumei. Presiunea exercitată în celule după o deplasare axială  $\varepsilon$  este următoarea:

$$p = p_0 \left[ \frac{(1 - \rho^*/\rho_s)}{1 - \varepsilon(1 - 2\nu^*) - \rho^*/\rho_s} \right] \quad (5.8)$$

unde  $p_0$ , este presiunea inițială (de obicei presiunea atmosferică). Lucrul mecanic efectuat în comprimarea gazului la o deplasare  $\varepsilon_f$ , este:

$$W = \int_0^{\varepsilon_f} (p - p_0) d\varepsilon = p_0 \left\{ \left( \frac{1 - \rho^*/\rho_s}{1 - 2\nu^*} \right) \ln \left[ \frac{1 - \rho^*/\rho_s}{1 - \rho^*/\rho_s - (1 - 2\nu^*)\varepsilon_f} \right] - \varepsilon_f \right\} \quad (5.9)$$

La toate vitezele de deformație, dar în principiu, la vitezele mari de deformație ( $\dot{\varepsilon} > 100$  m/s), compresiunea este în esență izotermă deoarece masa termică a polimerului care formează pereții celulei este mult mai mare decât cea a gazului din interiorul celulelor. Astfel, comprimarea porilor cu gaz dă o contribuție elastică suplimentară curbei de încărcare și totodată energiei stocate, care este independentă de viteza de deformație.

### 5.3. Metode în caracterizarea energiei de absorbție în spume

După cum s-a menționat, scopul ambalajelor este de a absorbi energia cinetică a obiectului ambalat, păstrând în același timp forța sub anumite limite. Pentru un ambalaj dat se folosește o anumită densitate optimă a spumei. Teoretic vorbind, spuma "ideală" este cea spumă care prezintă tensiunea de platou sub nivelul critic de distrugere, și cu o arie aflată sub curba tensiune-deformație extinsă până în momentul unde începe desificarea,  $\varepsilon_D$ , aceasta fiind egală cu energia cinetică absorbită pe unitatea de volum a materialului ambalat.

Există mai multe metode pentru caracterizarea mai exactă a spumelor. Unele, cum ar fi coeficientul lui Janssen,  $J$ , și coeficientul de amortizare,  $C$  (descrie mai înainte), care măsoară "eficiența" unei spume; dar le lipsește generalitatea: o nouă diagramă este necesară pentru fiecare spumă, și pentru fiecare energie de impact. O abordare alternativă este cea a diagramei energiei de absorbție care permite ca spuma optimă să fie concepută pentru o aplicație dată în ambalare, utilizând informații cum ar fi tensiunea maximă admisibilă, energia totală absorbită și viteza de deformație.

### 5.3.1. Coeficientul lui Janssen, $J$

Decelerația  $a$ , a unui obiect de masă,  $m$ , ambalat în spumă este dată de legea lui Newton:

$$a = \frac{F}{m} \quad (5.10)$$

Forța,  $F$ , care acționează asupra obiectului ambalat este dată de tensiunea de compresiune a spumei, care ia naștere la contactul dintre spumă și obiect. O modalitate de estimare a eficienței unei spume reale pentru absorbția unei energii de impact date, este de a compara decelerația de vârf, pe care o produce,  $a_p$ , cu cea cauzată de o spumă ideală,  $a_i$ , pentru o energie de impact dată (figura 5.3a). Spuma ideală absoarbe energia la o decelerație constantă  $a_i$ ; ea este calculată în felul următor:

$$\frac{1}{2}mv^2 = ma_it \quad (5.11)$$

de unde rezultă că:

$$a_i = \frac{v^2}{2t} \quad (5.12)$$

Eficacitatea spumei la absorbția energiei de impact este măsurată cu ajutorul raportului următor și poartă numele de coeficientul lui Janssen,  $J$ :

$$J = \frac{a_p}{a_i} \quad (5.13)$$

Coeficientul lui Janssen pentru o spumă dată depinde de energia de impact. Acest coeficient este mare atât la energii joase cât și la energii înalte, o valoare minimă obținându-se la unele energii intermediare.

În figura 5.3a este prezentată variația acestui coeficient cu variația energiei de impact. Această reprezentare este construită pentru o anumită spumă, prin măsurarea accelerației de vârf în spumă pe parcursul testelor de impact. Exemple cum se obține această formă se pot găsi în lucrările scrise de către Woolam (1968) și Hilyard și Djiauw (1971). Acest coeficient  $J$ , este util pentru a compara eficiența diferitelor tipuri de spume în absorbția energiei. Dar pentru că este o mărime empirică, acest coeficient necesită o cantitate mare de colectate a datelor (fiecare grosime a spumei, de asemenea și fiecare densitate necesită o curbă nouă) și nu prezintă capacitatea de absorbție a energiei pentru mecanismele prin care spuma se deformează.

### 5.3.2. Coeficientul de amortizare

Deoarece există o mare cantitate de date înregistrate pentru spume, este util să se prezinte eficiența unei spume pentru absorbția de energie în funcție de comportamentul uniaxial tensiune-deformație. Cel mai simplu mod de a face acest lucru este de a reprezenta grafic energia absorbită până la o anumită tensiune dată,  $\sigma_p$ . O variație a metodei este de a normaliza această energie cu tensiunea de vârf,  $\sigma_p$ , și de a reprezenta grafic tensiunea de vârf împărțită la energia de absorbție, funcție de tensiune. O astfel de reprezentare grafică ne dă coeficientul de absorbție,  $C$ , pentru o spumă [Gordon, (1974)]. În figura 5.3c este prezentată forma tipică a acestui coeficient.

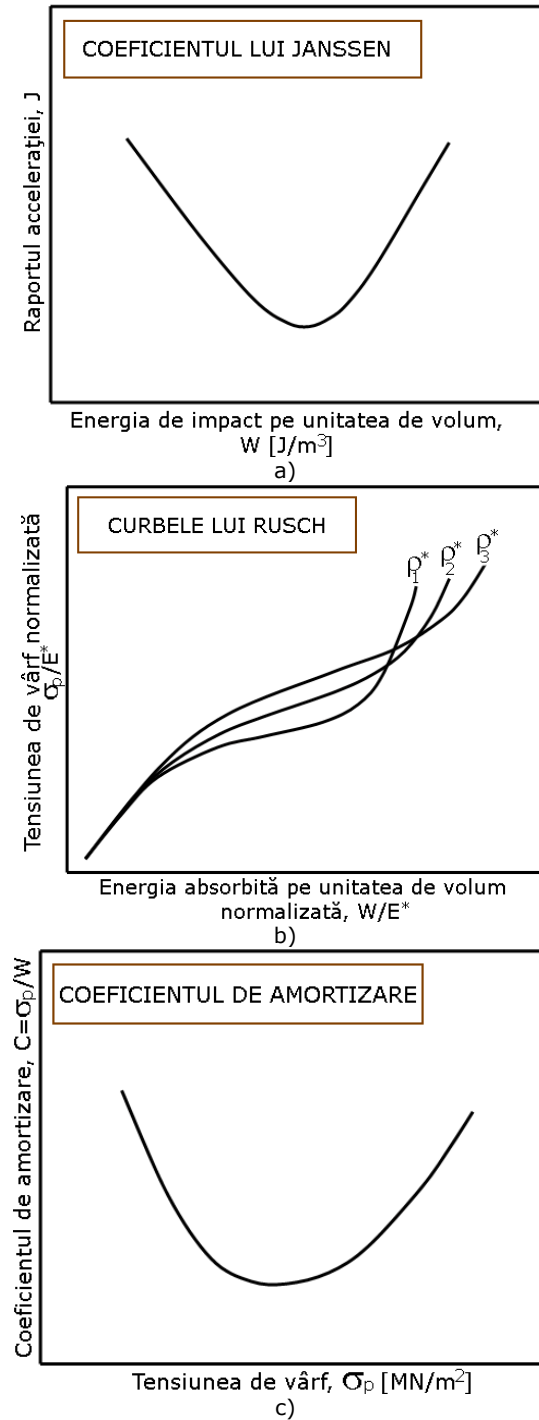


Fig. 5.3. Diagramele de caracterizare a energiei de absorbție în spume: a) coeficientul lui Janssen,  $J$ ; b) curbele construite din ecuațiile tensiune-deplasare ale lui Rusch [1970, 1971]; c) factorul de amortizare,  $C$ .



### 5.3.3 Curba lui Rusch

Rusch (1970, 1971), a îmbunătățit această metodă. El observă că forma curbei tensiune-deformație pentru o spumă poate fi definită de un coeficient de formă empiric,  $\psi(\varepsilon)$ , definit astfel:

$$\sigma = E^* \psi(\varepsilon) \varepsilon \quad (5.14a)$$

unde  $\sigma$ , este tensiunea,  $E^*$ , este modulul de elasticitate al spumei, iar  $\varepsilon$ , este deplasarea. Acest coeficient de formă,  $\psi(\varepsilon)$ , a fost găsit empiric ca având următoarea expresie:

$$\psi(\varepsilon) = m\varepsilon^{-n} + r\varepsilon^s \quad (5.14b)$$

unde  $m$ ,  $n$ ,  $r$  și  $s$  sunt constante ale acestei spume speciale. Aceste două ecuații definesc o formă pentru curba tensiune-deformație a spumei. Rusch definește  $K$  astfel:

$$K = \frac{v^2}{2ta_p} \quad (5.15)$$

Iar,  $I$ , este definit ca raportul dintre energia de impact pe unitatea de volum și modulul de elasticitate al spumei, astfel:

$$I = \frac{W}{E^*} \quad (5.16)$$

Raportul  $I/K$ , ne dă tensiunea de vârf generată în spumă normalizată de modulul de elasticitate al spumei:

$$\frac{I}{K} = \frac{mv^2}{2AtE^*} \cdot \frac{2ta_p}{v^2} = \frac{ma_p}{AE^*} = \frac{\sigma}{E^*} \quad (5.17)$$

Atât  $I$  cât și  $K$  pot fi legați de comportamentul uniaxial tensiune-deformație al spumei prin factorul de formă  $\psi(\varepsilon)$ . Spuma optimă pentru a absorbi o anumită cantitate de energie dată cu o tensiune maximă admisibilă poate fi determinată prin reprezentarea grafică  $I/K$ , tensiunea maximă normalizată cu modulul de elasticitate al spumei, funcție de  $I$ , energia de impact pe unitatea de volum normalizată cu modulul de elasticitate, (figura 5.3b).

## 5.4. Diagramele de absorbție a energiei

O abordare diferită, care permite o combinare a empiricului cu modelarea fizică, și care reprezintă o cale de optimizare în alegerea spumei, este oferită de către *diagramele de absorbție a energiei* [Maiti și alții, (1984)]. Procedeu pentru construcția lor din curbele experimentale tensiune-deformație este prezentat în figura 5.4.

### 5.4.1. Construcția diagramei

Epruvetele pentru o spumă dată, cu o gamă variată de densități sunt testate la compresiune, la o viteză de deformație fixă,  $\varepsilon_I$ , și la o temperatură  $T_I$ , pentru a da o familie de curbe tensiune-deformație, figura 5.4.a. Procesul de construire a diagramei de absorbție este prezentat secvențial în figura 5.4.

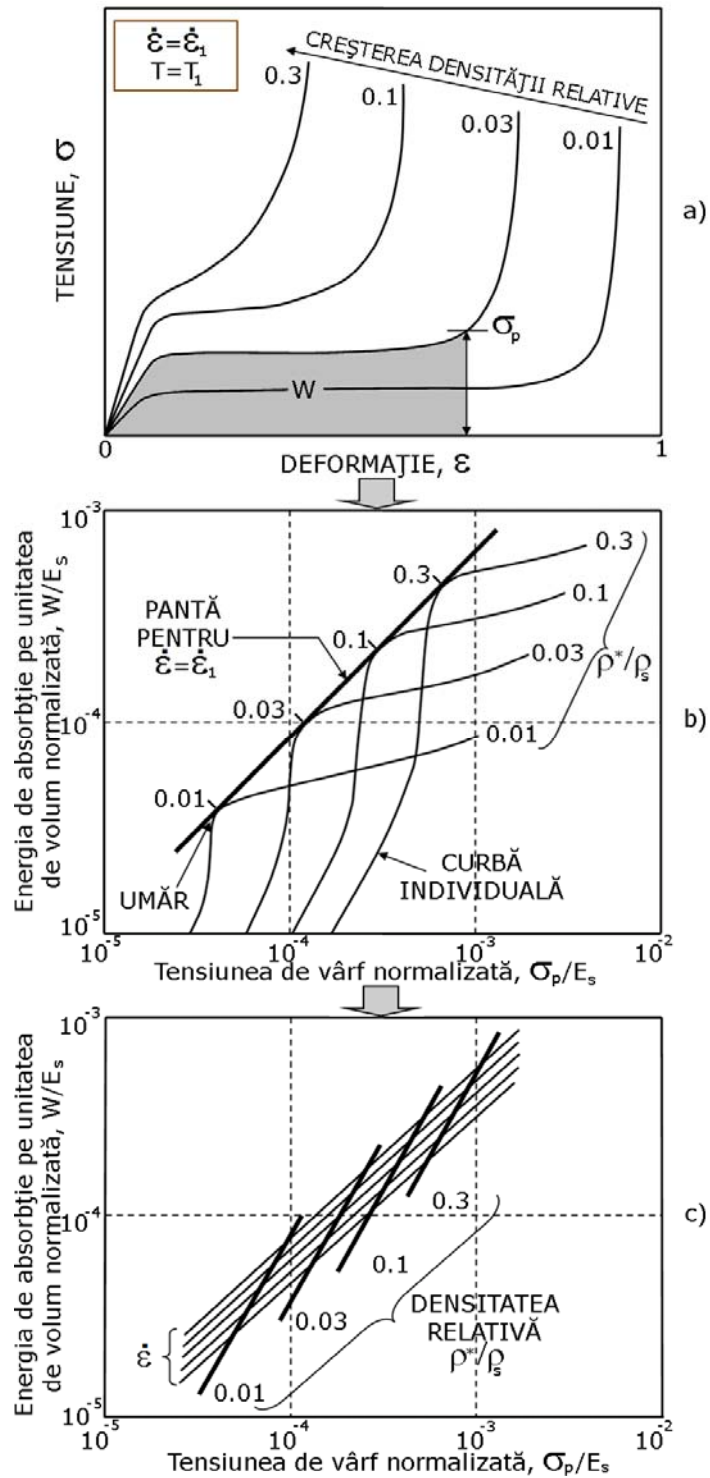


Fig. 5.4. Construcția diagramelor de absorbție a energiei

Fiecare arie de sub fiecare curbă este măsurată până la tensiunea  $\sigma_p$ ; această arie reprezintă energia absorbită pe unitatea de volum,  $W$ . Valoarea energiei  $W$  este reprezentată grafic funcție de tensiunea  $\sigma_p$ , pentru fiecare curbă, normalizându-le pe ambele cu modulul de elasticitate al solidului,  $E_s$ , măsurat la o viteză de deformație și temperatură standard ( $10^{-3}/s$  și  $20^\circ C$ ).

Cea mai bună spumă pentru o ambalare dată este aceea care absoarbe cea mai multă energie până la atingerea tensiunii maxime pe care o suportă ambalajul,  $\sigma_p$ . Fiecare densitate a spumei prezintă o tensiune  $\sigma_p$ , aceasta fiind aleasa cea mai bună. Această tensiune este dată de "umărul" curbei de energie prezentat în figura 5.4b. Linia groasă prezintă "înfășurătoarea" acestor puncte. Ea descrie relația dintre  $W$  și  $\sigma_p$  pentru o densitate *optimă* a spumei, pentru o încărcare la o viteză de deformație,  $\varepsilon_1$ , și la o temperatură  $T_1$ .

Această linie este din nou reprezentată grafic, pe aceleași axe, în partea de jos a diagramei. Curbele individuale în acest caz nu mai sunt afișate pe diagramă, dar densitatea optimă,  $\rho^*/\rho_s$ , citită de pe diagrama din mijloc (figura 5.4b), este marcată pe fiecare linie. Testele se repetă acum pentru o serie diferită de viteze de deformație,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ , etc., iar datele obținute în aceste cazuri sunt tratate în același fel. Acest lucru permite construirea unei familii de curbe optime de absorbție a energiei, după cum se observă în figura 5.4c. Punctele corespunzătoare densităților egale sunt conectate prin linii. În același mod poate fi tratată și o schimbare a temperaturii.

## 5.4.2. Modelarea diagramei de absorbție a energiei

Contribuția dominantă la absorbția energiei în spumele cu celule deschise diferă față de cea la spumele cu celule închise, prin urmare se va studia fiecare tip de spumă separat. Modelarea diagramei de absorbție a energiei permite includerea influenței absorbției vâscoase și a comprimării celulelor cu gaz; iar pentru a obține diagrame cu o largă aplicabilitate este sugerată utilizarea ca și axe a rapoartelor:  $W/E_s$  și  $\sigma_p/E_s$ .

### 5.4.2.1. Spume elastomerice cu celule deschise

Atunci când o spumă elastomerică cu celule deschise este comprimată, energia este absorbită prin încovoierea și flambarea pereților celulei, și prin expulzarea fluidului porilor. S-a idealizat curba tensiune-deformație în modul prezentat în figura 5.5, [Gibson și Ashby (1997)].

Porțiunea liniar-elastică a curbei este urmată de un platou orizontal la o tensiune,  $\sigma_{el}^*$ , trunchiată de o creștere verticală la o densificare,  $\varepsilon_D$ :

$$\varepsilon_D = 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (5.18)$$

În regiunea liniar-elastică, energia stocată pe unitatea de volum în momentul încărcării spumei până la tensiunea  $\sigma_p$ , este:

$$W = \frac{1}{2} \frac{\sigma_p^2}{E^*} \quad (5.19)$$

Utilizând ecuația (2.10a) pentru  $E^*$ , obținem:

$$\frac{W}{E_s} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_p}{E_s} \right)^2 \frac{1}{(\rho^*/\rho_s)^2} \quad (5.20)$$

Energia normalizată pe unitatea de volum,  $W/E_s$ , este o funcție doar de  $\sigma_p/E_s$  și densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ .

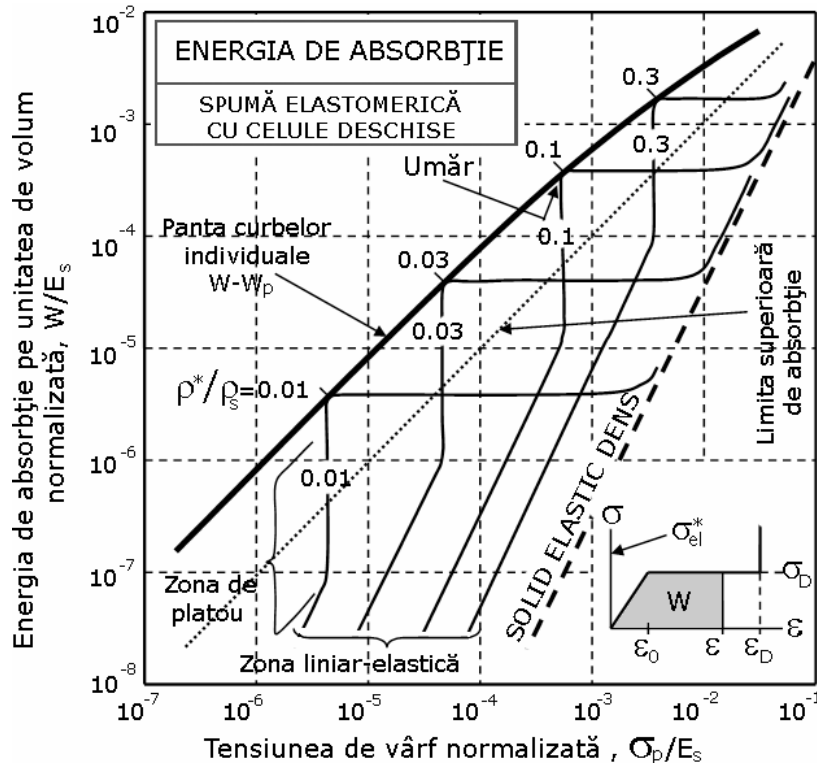


Fig. 5.5. Diagrama de modelare a energiei de absorbție pentru o spumă elastomerică cu celule deschise, [Gibson și Ashby (1997)]

Partea importantă a curbei tensiune-deformație, din punctul de vedere al absorbției de energie, este zona de platou. În această zonă, energia este absorbită la o tensiune constantă,  $\sigma_{el}^*$ , putându-se scrie:

$$dW = \sigma_{el}^* d\epsilon \quad (5.21)$$

Utilizând ecuația (2.26a) pentru  $\sigma_{el}^*$  și integrând peste deplasare, obținem:

$$\frac{W}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 (\epsilon - \epsilon_0) \quad (5.22)$$

unde  $\epsilon_0$ , este deplasarea de la sfârșitul domeniului liniar-elastic. În figura 5.5 ele sunt reprezentate ca o familie verticală de linii. Acest domeniu al platoului se termină brusc odată cu începerea densificării, din acest punct (fiind considerat cazul nostru ideal), curba absorbției de energie, devine orizontală. Valoarea maximă a acestei energii de absorbție utile pe unitatea de volum,  $W_{max}$ , este dată prin

înlocuirea lui  $\varepsilon$ , din ecuația (5.22), cu relația punctului în care începe densificarea,  $\varepsilon_D$  (ecuația 5.18). Astfel, neglijând,  $\varepsilon_D$ , obținem:

$$\frac{W_{max}}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \left( 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (5.23)$$

Tensiunea continuă să crească până în momentul în care spuma este comprimată la un solid. La acest nivel, curba energiei este asemenea unui elastomer dens (linia întreruptă din figura 5.5), pentru care se poate scrie următoarea relație:

$$\frac{W}{E_s} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_p}{E_s} \right)^2 \quad (5.24)$$

Cum s-a explicat deja mai înainte, spuma optimă este cea pentru care  $\sigma_p = \sigma_D$ . Curba energiei de absorbție optime ( $W - \sigma_p$ ), este reprezentată cu linie îngroșată, iar ecuația ei este dată de relația (5.23), prin înlocuirea densității relative,  $\rho^*/\rho_s$ , cu tensiunea de platou pentru această densitate, astfel:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \left( \frac{20\sigma_D}{E_s} \right)^{1/2} \quad (5.25)$$

Obținem:

$$\frac{W_{max}}{E_s} = \frac{\sigma_D}{E_s} \left[ 1 - 6.26 \left( \frac{\sigma_D}{E_s} \right)^{1/2} \right] \quad (5.26)$$

Această linie îngroșată ( $W - \sigma_p$ ), are o pantă de 1 pentru tensiuni scăzute, scăzând până la 7/8, pentru tensiuni înalte.

Chiar dacă aceste relații sunt aproximative, această dezvoltare a diagramele de energie pentru spume sunt ajutoare. Cel mai important lucru este că ecuațiile prezentate mai sus arată că  $W/E_s$ , depinde doar de  $\sigma_p/E_s$  și de densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ ; iar diagrama prezentată este singura care descrie toate spumele elastomerice, de toate densitățile, indiferent din ce sunt confecționate (proprietățile de material sunt conținute în parametrul normalizat  $E_s$ ). În practică, materialul spumei diferă puțin, dar diagrama are aproximativ aceeași valoare și permite determinarea caracteristicilor de absorbție ale energiei.

Prima caracteristică este reprezentată de către eficiența relativă cu care spumele absorb energia. Linia continuă care, converge spre linia întreruptă descrie solidele dense la tensiuni mari. Dar, pentru o anumită gamă de energii absorbite, acoperite de diagramă, tensiunea de vârf a spumei este mai mică, cu un factor de  $10^{-4}$ - $10^{-1}$ . Acesta este unul dintre motivele care face spumele să fie foarte utilizate în domeniul ambalării.

A doua caracteristică se referă la dependența energiei de absorbție funcție de viteza de deformație. Modulul de elasticitate  $E_s$ , a unui polimer crește odată cu creșterea vitezei de deformație. Atât energia de absorbție cât și tensiunea de vârf, sunt proporționale cu  $E_s$ .

De asemenea, mai poate exista un alt proces în absorbția energiei de impact pentru spumele cu celule deschise. Fluidul din celule este eliminat în momentul în care spuma este comprimată. Acest lucru mecanic implicat în acest proces a fost determinat mai devreme: pentru o viteza de deformație constantă el este dat de ecuația (5.5). Acesta trebuie adăugat la absorbția realizată prin deformarea peretelui celulei, ec. (5.23), obținând un maxim unde  $\varepsilon = \varepsilon_D = 1 - 1.4 \rho^*/\rho_s$ ,

$$\frac{W}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \left( 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) + \frac{C\mu \dot{\varepsilon}}{E_s} \left( \frac{L}{l} \right)^2 \ln \left( \frac{1}{1.4 \rho^*/\rho_s} \right) \quad (5.27a)$$

și

$$\frac{\sigma_p}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{C\mu \dot{\varepsilon}}{E_s} \left( \frac{L}{l} \right)^2 \ln \left( \frac{1}{1.4 \rho^*/\rho_s} \right) \quad (5.27b)$$

Unde cel de-al doilea termen din fiecare ecuație este mult mai mic decât primul, disiparea vâscoasă fiind neglijabilă. Dar, în momentul în care cel de-al doilea termen este comparabil cu primul sau chiar mai mare, (de exemplu, cazul în care viteza de

deformație  $\dot{\varepsilon}$ , sau vâscozitatea fluidului sunt suficient de mari), atunci, această nouă contribuție devine importantă. În limita vitezelor de deformație foarte mari, primul termen din fiecare ecuație poate fi neglijat; apoi, înlocuind a doua ecuație în prima, obținem:

$$\frac{W}{E_s} = 1.4 \frac{\sigma_p}{E_s} \frac{\rho^*}{\rho_s} \ln \left( \frac{1}{1.4 \rho^*/\rho_s} \right) \quad (5.28)$$

Termenul care implică densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ , are o valoare de aproximativ 0.1, pentru o gamă normală de densități relative,  $\rho^*/\rho_s$ ; astfel că, pentru o disipare vâscoasă pură, obținem:

$$\frac{W}{E_s} \approx 0.1 \frac{\sigma_p}{E_s} \quad (5.29)$$

Această ecuație este reprezentată grafic punctat în figura 5.5. Dacă viteza de deformație depășește valoarea la care cei doi termeni din ecuația (5.27) sunt egali,

linia continuă groasă, (care este aproape independentă de  $\dot{\varepsilon}$  la valori mici ale  $\dot{\varepsilon}$ ), se mută la dreapta spre limita superioară dată de linia punctată.

#### 5.4.2.2. Spume elastomerice cu celule închise

Spumele cu celule închise diferă față de cele cu celule deschise, iar aceste diferențe vor fi prezentate în cele ce urmează. Atunci când o spuma elastomerică cu celule închise este comprimată, energia este absorbită de către încovoierea, flambajul și întinderea pereților celulei, și de către comprimarea fluidului conținut în interiorul celulelor, (care de obicei este gaz).

Comprimarea gazului dă o curbă tensiune-deformație care crește odată cu creșterea deplasării. În cazul spumelor cu densitate relativ scăzută, contribuția gazului este foarte mare, acesta putând domina comportamentul spumei. În caz contrar, cum ar fi cazul spumelor cu densitate mare, sau cel al spumelor fabricate dintr-un material rigid (prezentând o valoare a modulului de elasticitate mare,  $E_s$ ), contribuția relativă a comprimării gazului asupra comportamentului spumei este mult mai mică. Așadar, pentru un material dat al spumei, poate avea loc o tranziție de la comportamentul dominat de comprimarea gazului la cel dominat de caracteristicile pereților celulei.

În figura 6.6 este prezentată curba ideală pentru o spumă cu celule închise. Porțiunea liniar-elastică are o pantă dată de ecuația (2.21a), [Gibson și Ashby (1997)].

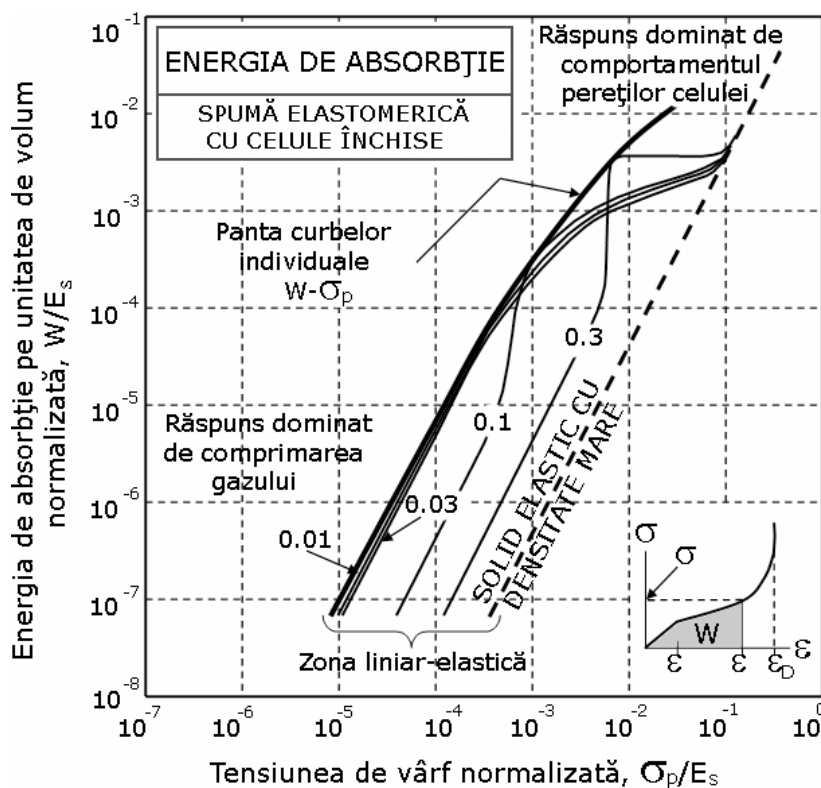


Fig. 5.6. Diagrama de modelare a energiei de absorbție pentru o spumă elastomerică cu celule închise, [Gibson și Ashby (1997)]

În acest caz fracțiunea de material  $(1 - \varphi)$ , din fețele celulei se consideră relativ mică, iar presiunea inițială a gazului,  $p_0$ , se presupune că este cea atmosferică, rezultând că raportul  $p_0/E_s$ , este de asemenea mic.

Cu precizia adecvată,

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \tag{5.30}$$

energia stocată până la deplasarea  $\epsilon_0$ , (unde  $\epsilon_0 < \epsilon_D$ ) este:

$$\frac{W}{E_s} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_p}{E_s} \right)^2 \frac{1}{(\rho^*/\rho_s)^2} \tag{5.31}$$

Zona de platou, de asemenea, prezintă o pantă pozitivă dată de ecuația (2.29)

$$\frac{\sigma^*}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{p_0}{E_s} \left( \frac{\epsilon}{1 - \epsilon - \rho^*/\rho_s} \right) \tag{5.32}$$

Energia stocată pe unitatea de volum până la deformația  $\epsilon$ , (ec. (5.9) cu  $v^* = 0$ ), este următoarea:

$$\frac{W}{E_s} = 0.05 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \varepsilon + \frac{p_0}{E_s} \left\{ (1 - \rho^*/\rho_s) \ln \left[ \frac{1 - \rho^*/\rho_s}{1 - \rho^*/\rho_s - \varepsilon} \right] - \varepsilon \right\} \quad (5.33)$$

În momentul terminării zonei de platou, tensiunea crește brusc, urmând densificarea dată de ecuația (5.18),  $\varepsilon_D$ .

Curba rezultată  $W-\sigma_p$ , care este prezentată în figura 5.6 a luat raportul  $p_0/E_s=6.7 \times 10^{-4}$ , corespunzător unei presiuni  $p_0=1$  atmosferă și unui modul de elasticitate  $E_s=150$  MPa, pentru polietilenă. În cazul în care densitatea spumei este mare, în ultimele două ecuații prezentate domină primul termen, energia de absorbție fiind dată de către deformarea pereților celulei, iar curbele au în general aceeași formă cu cele ale spumelor cu celule deschise. Dar, atunci când densitatea este mică, situația se schimbă deoarece cel de-al doilea termen devine dominant, iar energia de absorbție este dominată de comprimarea gazului din interiorul celulelor. În acest caz curbele energiei de absorbție devin independente de densitate (ele reflectă doar compresiunea gazului). Spuma, în acest caz, va deveni un amortizor pneumatic.

## 5.5. Rezultate experimentale obținute

Încercările experimentale s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității de Tehnice din Lublin, Polonia. Testele s-au realizat pe o mașină de încercat Instron-Dynatup prezentată în figura 3.20 la diferite temperaturi, (20, 60 și 100°C).

Pentru caracterizarea comportamentului mecanic, respectiv a energiei de absorbție, la solicitările de compresiune dinamică spumele poliuretanică rigide utilizate în cadrul programului experimental au avut următoarele densități: 40, 80 și 140 kg/m<sup>3</sup>. Forma constructivă a epruvetelor utilizate este arătată în figura 3.7. Probele au fost supuse unei compresiuni uniaxiale la diferite viteze de încărcare, în intervalul 0.62-1.98 m/s. Pentru fiecare tip de încercare s-au folosit câte 5 epruvete conform standardului ASTM D1621-00 (Metode Standard de Testare a Proprietăților la Compresiune pentru Plasticele Celulare Rigide).

În urma efectuării încercărilor de compresiune dinamică s-au determinat caracteristicile mecanice ale spumelor. Valorile medii ale acestor caracteristici pentru o încărcare într-un plan paralel cu planul de formare –direcția (2)- sunt prezentate în Tabelul 3.5, (Tabelele A.5 și A.6 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare), iar pentru o încărcare într-un plan perpendicular cu planul de formare –direcția (3)- sunt prezentate în Tabelul 3.6 (Tabelele A.7 și A.8 din Anexe prezintă toate valorile pentru fiecare încercare).

De asemenea, din datele furnizate de mașina de încercat, s-au trasat diagramele caracteristice convenționale pentru epruvetele încercate, [Avalle și alții (2001), Gibson și Ashby (1997)]. Curbele prezentate în acest capitol sunt rezultate în urma unei încărcări paralele cu planul de formare, la o temperatură de 20°C, utilizându-se următoarele viteze de încărcare: 0.94 m/s pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, 1.28 m/s pentru spuma cu densitatea de 80 kg/m<sup>3</sup>, respectiv 1.67 m/s pentru spuma cu densitatea de 140 kg/m<sup>3</sup>.

În figura 5.7 este prezentată o comparație a curbelor tipice energie-timp pentru cele 3 densități ale spumei poliuretanică supuse la compresiune dinamică (40, 80 și 140 kg/m<sup>3</sup>).



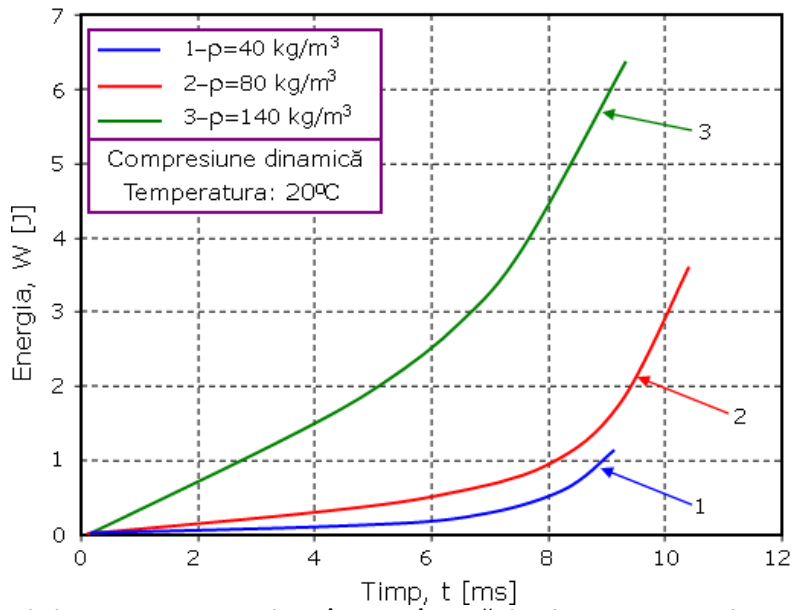


Fig. 5.7. Curbele energie-timp rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică. Studiul energiei de absorbție

Figura 5.8 prezintă tensiunea de vârf normalizată funcție de energia de absorbție pe unitatea de volum normalizată pentru cele trei densități studiate.

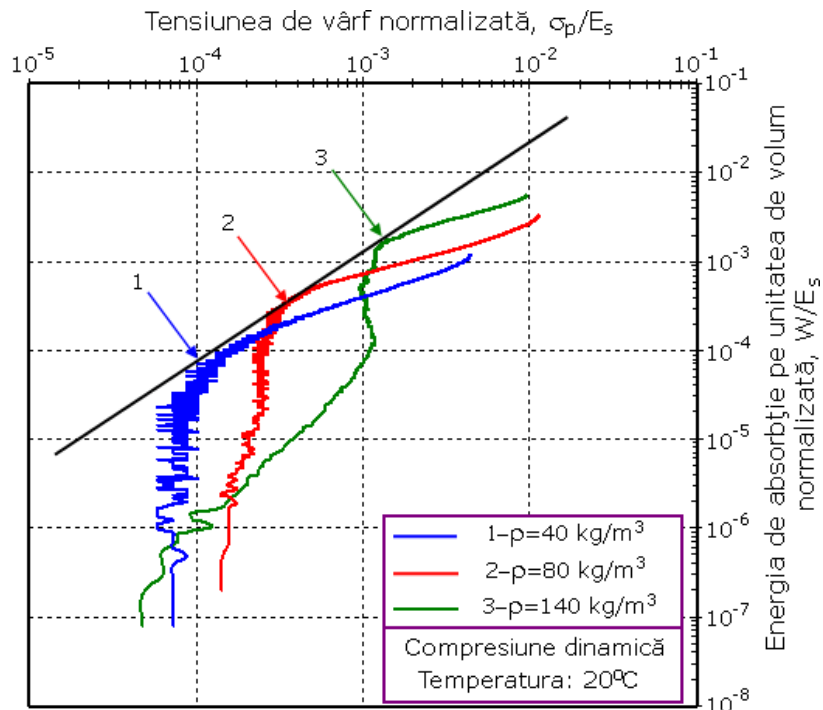


Fig. 5.8. Curbele tensiune de vârf funcție de energia de absorbție normalizată

În figura 5.9 sunt prezentate curbele tensiune-deformație rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică.

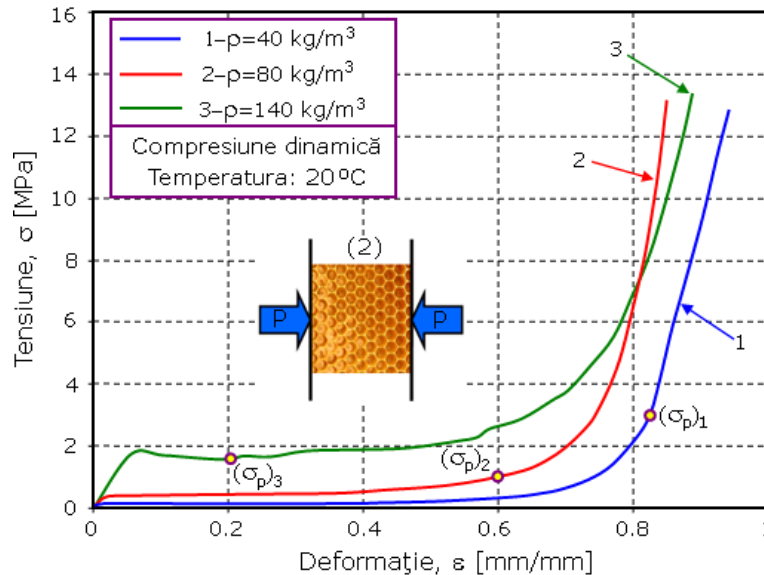


Fig. 5.9. Curbele tensiune-deformație rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică utilizate pentru studiul energiei de absorbție

Punctele  $(\sigma_p)_1$ ,  $(\sigma_p)_2$  și  $(\sigma_p)_3$  sunt alese astfel încât să obținem aceeași valoare a energiei de absorbție, ( $W_1=W_2=W_3$ ). Figura 5.10a prezintă în detaliu aceste curbe tensiune-deformație până în punctele amintite mai sus care poartă denumirea de tensiuni de vârf, iar figura 5.10b prezintă variația acestor tensiuni de vârf funcție de densitate.

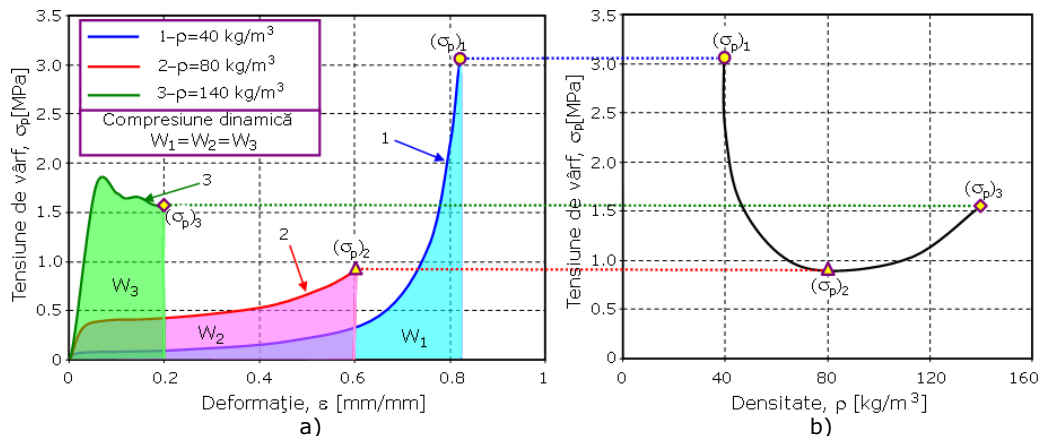


Fig. 5.10. Diagrama energiei rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică: a) Curbele detaliate tensiune-deformație; b) Variația tensiunilor de vârf funcție de densitate

După cum se poate observa din figura 5.9, o cantitate foarte mică de energie este absorbită în zona linear-elastică, deoarece această zonă este relativ

mică. Marea parte a energiei este absorbită în zona de platou, deoarece aici are loc deformarea celulelor, acest lucru permițând o absorbție mare a energiei de impact la o încărcare aproape constantă.

Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_1$ , generează o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_1=3.054 \text{ MPa}$ . Spuma cu densitatea cea mai mare ( $140 \text{ kg/m}^3$ ), generează de asemenea o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_3=1.559 \text{ MPa}$  înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_3$ . Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $80 \text{ kg/m}^3$ ), care absoarbe aceeași energie  $W_2$ , ( $W_1=W_2=W_3=W=0.6 \text{ J}$ ), generând o tensiune de vârf de valoare mai mică,  $(\sigma_p)_2=0.914 \text{ MPa}$ .

În figura 5.11 sunt prezentate curbele energiei de absorbție funcție de tensiune pentru cele trei densități.

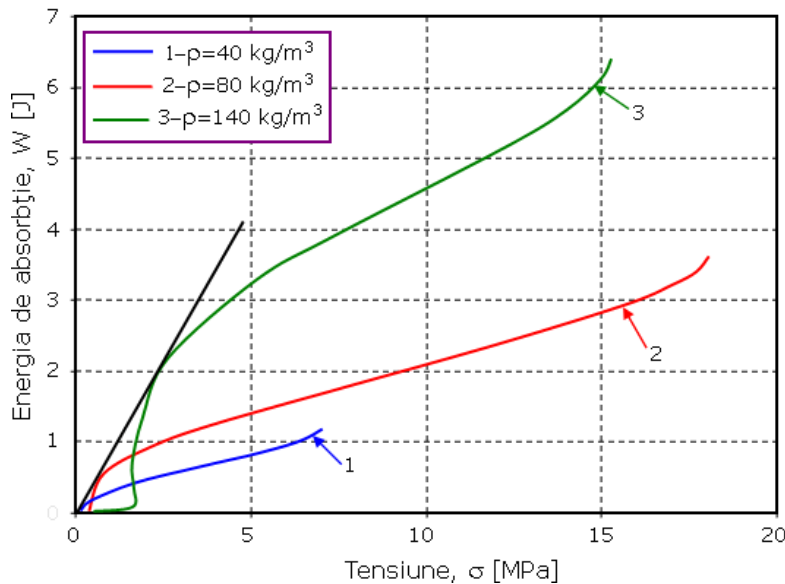


Fig. 5.11. Curbele energie de absorbție-tensiune rezultate în urma încercărilor de compresiune dinamică

Diagrama energiei rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică: privind variația energiei de absorbție funcție de densitate și variația tensiunilor de vârf funcție de densitate este prezentată în figura 5.12.

În Tabelul 5.1 sunt prezentate valorile obținute pentru cele trei densități.

Tabelul 5.1. Valorile energiei, tensiunii de vârf și eficienței funcție de densitate

Spumă poliuretanică rigidă			
Densitate	Energie	Tensiune de vârf	Eficiență
$\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$W$ [J]	$\sigma_p$ [MPa]	$E$
40	0.6	3.054	0.197
80	0.6	0.914	0.657
140	0.6	1.559	0.386

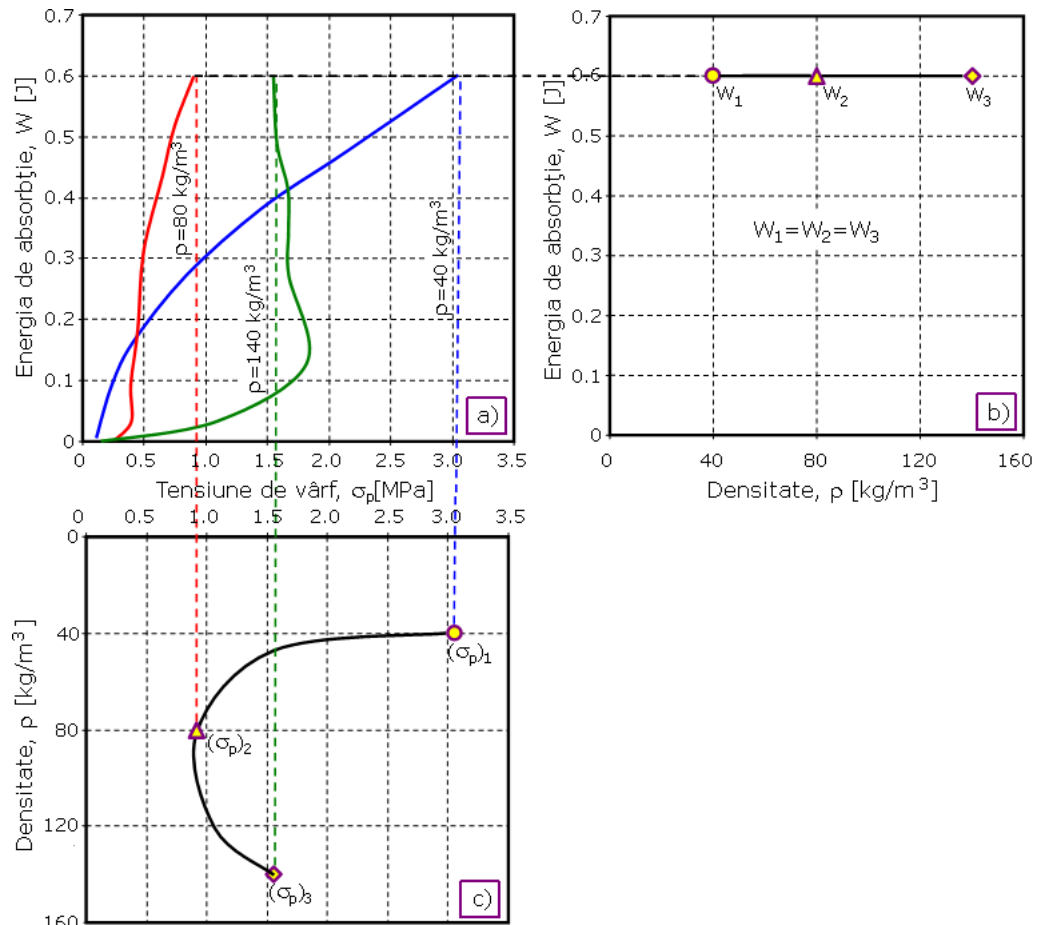


Fig. 5.12. Diagrama energiei rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică: a) Curbele detaliate energie de absorbție-tensiune; b) Variația energie-densitate; c) Variația tensiunilor de vârf funcție de densitate

În figura 5.13 sunt prezentate curbele eficiență-tensiune pentru cele trei spume studiate.

Diagrama eficienței rezultată în urma încercărilor de compresiune dinamică pentru spumele analizate este prezentată în figura 5.14. Figura 5.14a prezintă curbele detaliate eficiență-tensiune, iar figura 5.14b arată variația eficienței funcție de densitatea spumei poliuretanică rigide.

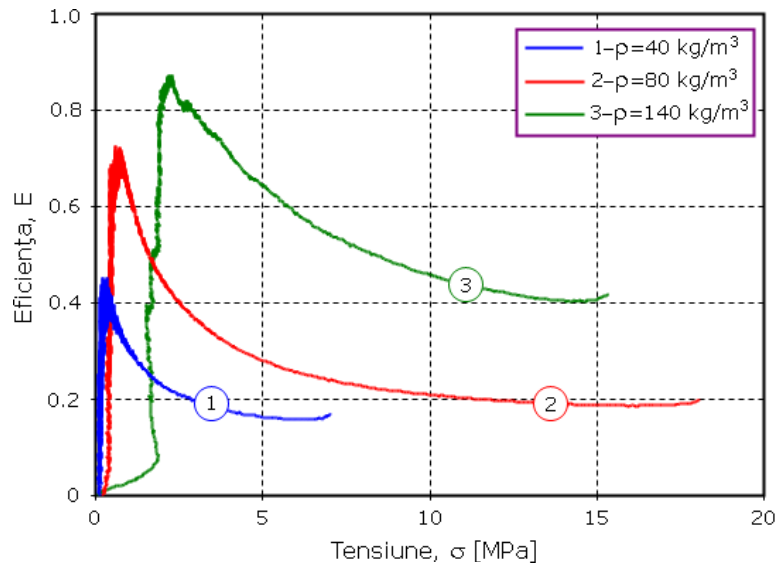


Fig. 5.13. Curbele eficiență-tensiune rezultate în urma încercărilor de compresie dinamică

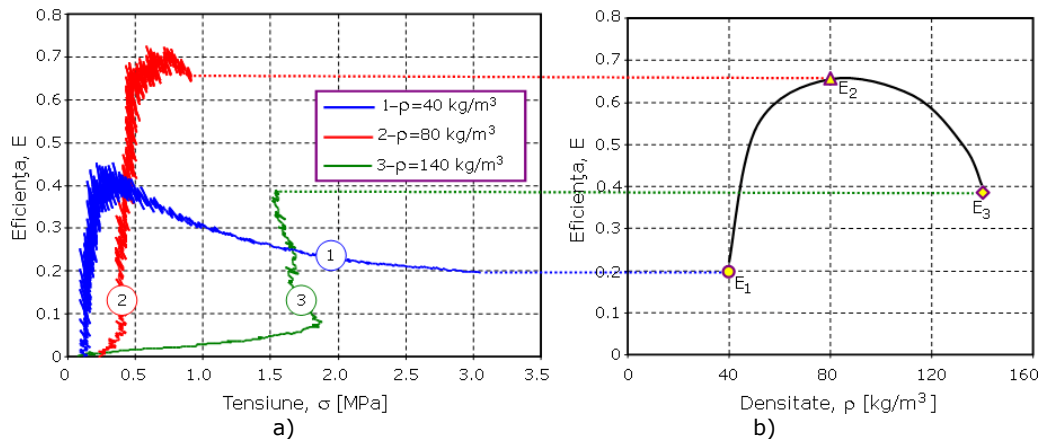


Fig. 5.14. Diagrama eficienței rezultată în urma încercărilor de compresie dinamică: a) Curbele detaliate eficiență-tensiune; b) Variația eficiență-densitate

Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_1$ , prezintă o eficiență mică,  $E_1=0.197$ . Spuma cu densitatea cea mai mare ( $140 \text{ kg/m}^3$ ), prezintă de asemenea o eficiență scăzută,  $E_3=0.386$  înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_3$ . Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $80 \text{ kg/m}^3$ ), care absoarbe aceeași energie  $W_2$ , ( $W_1=W_2=W_3=W=0.6 \text{ J}$ ), prezentând o eficiență de valoare mai mare decât precedentele,  $E_2=0.657$ .

În acest capitol s-a făcut o prezentare a mecanismelor de absorbție a energiei în materialele celulare cu celule deschise, respectiv închise. De asemenea s-au prezentat rezultatele încercărilor experimentale de compresie dinamică care au indicat că spuma cu densitate de  $80 \text{ kg/m}^3$  prezintă cea mai ridicată eficiență energetică, precum și tensiunea de vârf cea mai scăzută.

## 6. CARACTERIZAREA STRUCTURILOR DE TIP SANDWICH CU MIEZ DIN MATERIALE CELULARE

### 6.1. Noțiuni generale

Construcțiile alcătuite din două fețe rigide separate printr-un miez mai ușor poartă numele de panou tip sandwich, (figura 6.1), [Burman (1998), Sarzynsky (2003)]. Separarea feței de miez duce la o creștere a momentului de inerție a panoului cu o mică creștere în greutate, rezultând astfel o structură eficientă pentru a rezista la solicitări de încovoiere și flambaj. Din aceste motive, panourile de tip sandwich se folosesc acolo unde greutatea este critică: în aviație, în structurile portabile și în echipamentele sportive.

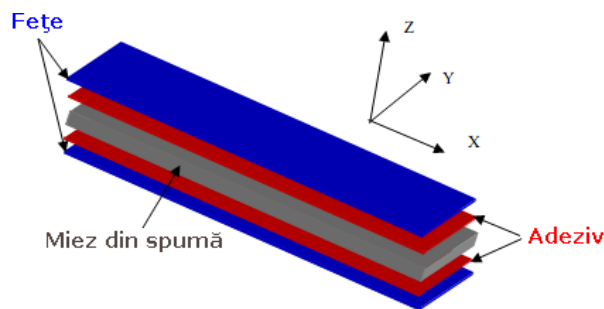


Fig. 6.1. Realizarea simetrică a grinzilor de tip sandwich

În structurile de tip sandwich, materialul feței în general prezintă tensiuni de întindere și compresiune cauzate de momentele de încovoiere aplicate și de către încărcările în plan. Orice tip de material din foi subțiri poate fi folosit ca și fețe în structurile de tip sandwich, dar de cele mai multe ori în acest caz se utilizează fețe din aluminiu sau materiale plastice armate cu fibre. În esență se utilizează trei tipuri de materiale plastice: armate cu fibre de sticlă, armate cu fibre de Kevlar și armate cu fibre de carbon, toate fiind fabricate la diferite precizii în funcție de costul și calitatea dorită.

În cele mai multe aplicații materialul miezului în structurile de tip sandwich poate fi: sub formă de fagure de miere, lemn de balsa sau materiale celulare. În unele cazuri se utilizează chiar și miezuri ondulate. Miezul materialelor de tip sandwich cu structură de tip fagure de miere este utilizat în principal în aplicațiile aerospațiale deoarece prezintă caracteristici mecanice foarte bune la o greutate redusă, dar în alte aplicații utilizarea lor este redusă deoarece prezintă un cost ridicat, iar procesul de fabricare este destul de dificil. În unele cazuri mai speciale cum ar fi aplicațiile civile ingineresti se poate utiliza hârtia Kraft sau miez de tip fagure de miere din oțel pentru realizarea panourilor pentru construcții. Lemnul de balsa a fost utilizat în al doilea război mondial în construcția aeroplanelor, dar de atunci majoritatea aplicațiilor pentru acest tip de material se regăsesc în industria constructoare de bărci

## 6.2. Aplicații ale construcțiilor de tip sandwich

Principalele avantaje ale structurilor de tip sandwich sunt acelea că prezintă o rigiditate și rezistență mare și de asemenea o greutate redusă. Având în vedere aceste caracteristici, structurile de tip sandwich se folosesc în acele aplicații unde greutatea reprezintă un factor foarte important, [Burman (1998), Gay și alții (2003)].

Cele mai specifice exemple în aplicațiile aeronautice sunt: podelele cabinelor de la aeronavele civile, suprafețele de control, lamelele rotorului de elicopter și fuzelajul, antenele satelit [Wilhemsson, (1989)]. Panourile utilizate în structurile din aviație, folosesc aproape întotdeauna fibre compozite pentru fețe, iar ca și miez diferite tipuri de materiale celulare, [Triantafillou (1985), Gibson și Ashby (1997), Scudamore și Cantwell (2002) și Mirzapour și alții (2005)].

Rezistența lor bună la șoc combinată cu o rigiditate mare la încovoiere, le face ideale pentru fabricarea pe scară largă a panourilor de dimensiuni mari și a echipamentelor sportive moderne, (figura 1.34 și figura 6.2): căști de protecție, încălțăminte, schiuri folosite atât pe zăpadă cât și pe apă, etc., [Mills (2007), Gibson și Ashby (1997), Gay și alții (2003)]. Durabilitatea este unul dintre parametrii cheie în proiectarea oricărei structuri care contribuie direct la condițiile de siguranță, iar această durabilitate trebuie garantată înainte de inițierea unui defect observabil. Structurile de tip sandwich utilizate în special la bărcile de construcție medie și mică, (figura 1.32), în cea mai mare parte sunt solicitate la încovoiere, [Mirzapour și alții (2005), Yoshii (1992), Thomsen (1995), Zenkert și alții (1999) Ollson (1986)].

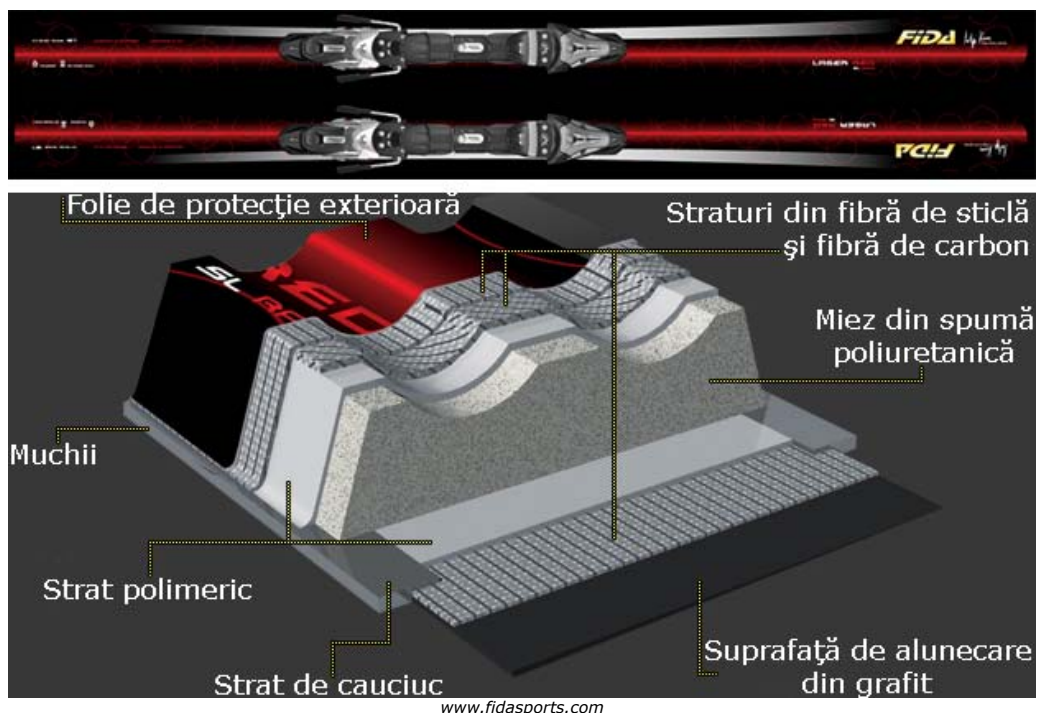


Fig. 6.2. Secțiune printr-un ski pentru identificarea elementelor componente

De asemenea aceste structuri au căpătat o atenție deosebită în industria constructoare de mașini, unde se găsesc într-o varietate foarte mare de aplicații, (figura 1.33). Acest interes este parțial condus de către legislație, impunând o greutate mai mică mașinilor și prin urmare mai ecologice. În plus, s-au redus costurile de producție prin intermediul proceselor de fabricație integrate, ceea ce reprezintă o creștere majoră a utilizării materialelor compozite, [Gay și alții (2003)].

În cadrul acoperișurilor pentru clădirile non-rezidențiale, (figura 1.31), piața a devenit foarte populară și este câștigată de panourile de tip sandwich deoarece ele oferă o greutate foarte redusă comparativ cu alte materiale (o utilizare potențială este cea din cadrul Armatei), [Triantafillou (1985)].

De asemenea, structurile de tip sandwich au început să prezinte un interes major și în proiectarea componentelor de la tren și metrou, deoarece permit o creștere a rigidității. Structurile auto-portante ale camioanelor din sandwich devin considerabil mai ușoare decât construcțiile metalice comune, ceea ce duce la o realizare mai mare de încărcare, respectiv creșterea profitului [Wennerstrom și alții (1987)]. Camioanele cisternă pentru combustibilii lichizi, lapte, suc sau alte substanțe au fost proiectate de asemenea cu succes din structuri de tip sandwich, [Backlund și alții (1989)], deoarece ele oferă pe lângă o capacitate portantă bună și o izolare termică bună. Pe același principiu sunt construite și containerele din materiale de tip sandwich care se utilizează în întreaga lume, (figura 1.28), [Olsson (1988)].

O utilizare importantă a materialelor de tip sandwich cu miez din spumă poliuretanică se găsește în domeniul medical, (figura 6.3), pentru: incubatoare medicale, containere materiale biologice; cutii depozitare mostre medicale, carcasă transport instrumente, etc.



Fig. 6.3. Utilizarea materialelor de tip sandwich în domeniul medical: a) incubator medical; b) container materiale biologice; c) cutie depozitare mostre medicale.

Natura, de asemenea, face uz de aceste materiale de tip sandwich. În figura 6.4a este prezentată secțiunea printr-un craniu de om, [Hodgson (1973), Pflug și Vangrimde (2003), Gibson și Ashby (1997)], respectiv prin aripa unei păsări, (figura 6.4b), [Thompson (1961), Pflug și Vangrimde (2003), Gibson și Ashby (1997)]; ambele exemple prezentând o densitate scăzută a miezului cu fețe solide. Plantele, de asemenea, pot prezenta o structură de tip sandwich, iar cel mai bun exemplu îl constituie frunzele de iris, (figura 1.14e și figura 6.4c).



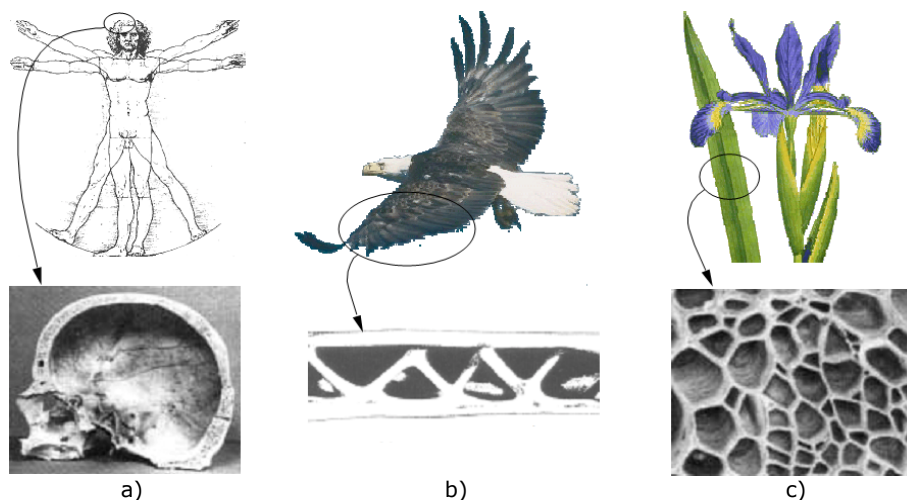


Fig. 6.4. Exemple de construcții de tip sandwich în natură: a) secțiune prin craniul unui om ; b) aripa unei păsări ; c) frunză de iris

În toate aceste exemple fețele și miezul prezintă același material cu deosebirea că fețele sunt aproape complet dense, iar miezul se prezintă sub formă de spumă.

În multe aplicații, pe lângă o greutate scăzută, panoul trebuie să prezinte, de asemenea, și o rigiditate minimă necesară, deoarece nu trebuie să cedeze sub anumite încărcări maxime de exploatare. Proiectarea lor poate fi formulată ca o problemă de optimizare, unde scopul este de a realiza panouri cu greutate minimă, dar care îndeplinesc constrângerile privind rigiditatea și rezistența. Această optimizare poate fi efectuată în ceea ce privește grosimile fețelor și ale miezului, în ceea ce privește materialele miezului și fețelor și în ceea ce privește densitatea miezului.

Ca și o concluzie a domeniului larg de utilizare al materialelor de tip sandwich, în figura 6.5 este prezentată diagrama costului funcție de domeniul de utilizare al acestor materiale, [Pflug și Vangrimde (2003)].



Fig. 6.5. Diagrama costului funcție de domeniul de utilizare al materialelor de tip sandwich

Având în vedere că aceste structuri de tip sandwich sunt realizate prin metode de fabricare diferite, doi factori foarte importanți sunt adesea trecuți cu vederea [Mirzapour și alții (2005)]. În primul rând, lipirea între fețele și miezul structurii de tip sandwich se presupune a fi perfectă. În al doilea rând, în multe cazuri, parametrii de fabricare a structurii de tip sandwich sunt selectați ca fiind similari celor din fețele compozitului [Lee și Lee (2004)]. Un instrument foarte util pentru proiectarea structurilor de tip sandwich este conceptul de "hartă de degradare", unde modurile de rupere sunt identificate în funcție de variabilele de proiectare, cum ar fi parametrii geometrici ai fețelor și miezului, și proprietățile de material ale fețelor respectiv miezului, [Jongman și Stephen (2001)].

Comportamentul mecanic al panourilor de tip sandwich depinde în cea mai mare parte de proprietățile fețelor și miezului și de asemenea de geometria lor. În cele mai multe aplicații, panourile trebuie să prezinte o rigiditate minimă necesară, pentru a nu se rupe sub unele încărcări maxime și de asemenea trebuie să fie cât mai ușoare posibil. Aceasta este o problemă care a primit o atenție considerabilă (a vedea de ex., Allen, (1969) și Zenkert, (1995)). La cel mai simplu nivel, materialele fețelor și ale miezului și densitatea sunt date, iar principala sarcină este de a realiza o selecție optimă a grosimii fețelor și miezului. Allen (1969) ne oferă soluții pentru o grindă supusă unei constrângeri de rigiditate; Huang și Alspaugh (1974) și Ueng și Liu (1979) includ constrângeri de rezistență. O optimizare mai completă este posibilă dacă densitatea miezului, precum și grosimea miezului și a fețelor, sunt tratate ca și variabile. Wittrick (1945), Ackers (1945) și Kuenzi (1965) au analizat această problemă pentru panouri supuse la constrângeri structurale diferite (la rigiditate, la rezistență sau la rezistență la flambaj) presupunând că toate proprietățile miezului variază liniar cu densitatea miezului. Deși acest lucru este adecvat pentru unele miezuri (de exemplu, lemn încărcat de-a lungul fibrelor), în general nu este valabil și pentru spume.

### 6.3. Rigiditatea structurilor de tip sandwich

În figura 6.6a este prezentată o grindă tip sandwich. Răspunsul la încărcarea aplicată este relativ ușor de analizat. În mod similar pot fi tratate și alte structuri de tip sandwich (deși cu o complexitate matematică mai mare), incluzând coloane, plăci, pânze, etc., (figura 6.6b-e).

Parametrii geometrici care intră în analiză sunt indicați în Tabelul 6.1

Tabelul 6.1. Parametrii geometrici ai grinzilor de tip sandwich

$a_t$	[mm]	Lățimea unei grinzi tubulare de secțiune pătrată
$b$	[mm]	Lățimea unei grinzi de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară
$c$	[mm]	Grosimea miezului pentru o grindă dreptunghiulară, placă sau pânză
$d$	[mm]	Distanța dintre centrele fețelor pentru o grindă de tip sandwich
$l$	[mm]	Lungimea utilă a grinzii sau înălțimea coloanei
$R$	[mm]	Raza pentru o placă circulară de tip sandwich
$r$	[mm]	Raza miezului pentru un tub de tip sandwich
$t$	[mm]	Grosimea feței pentru o grindă de tip sandwich

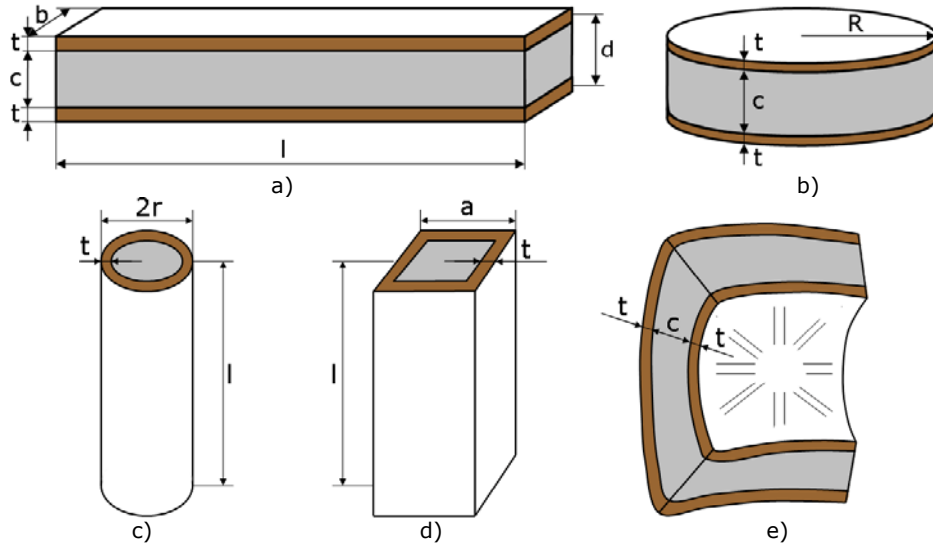


Fig. 6.6. Geometria structurilor de tip sandwich: a) grindă dreptunghiulară; b) placă circulară; c) coloană circulară; d) coloană pătrată; e) element tip pânză

Se consideră o grindă de tip sandwich supusă unei încărcări \$P\$ la încovoiere în trei puncte ca în figura 6.7.

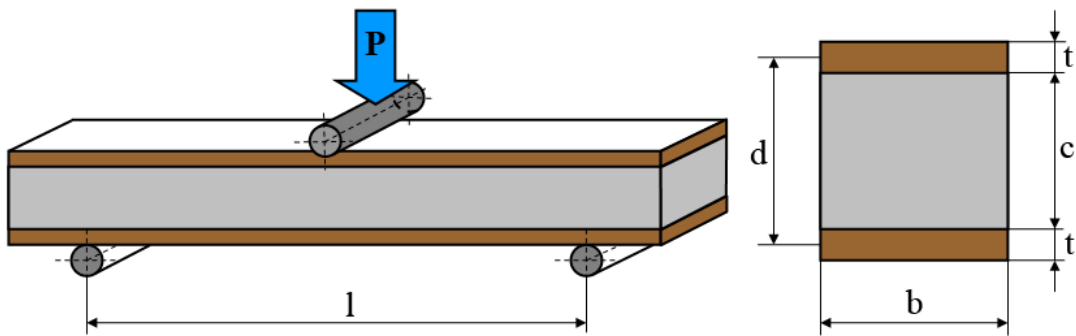


Fig. 6.7. Grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară solicitată la încovoiere în trei puncte

Pentru o grindă solicitată la încovoiere în trei puncte (figura 6.7) distanța între reazeme este \$l\$, lățimea \$b\$, grosimea miezului, \$c\$, și grosimea fețelor, \$t\$. Deflecția centrală este, \$\delta\$. Densitatea și modulul de elasticitate al fețelor, \$\rho\_f\$, respectiv, \$E\_f\$, iar pentru miez, \$\rho\_c^\*\$, respectiv \$E\_c^\*\$. Modulul de elasticitate transversal al miezului este, \$G\_c^\*\$. Modulul miezului variază continuu cu densitatea spumei, \$\rho\_c^\*\$ (ec. 2.10a,b), iar o relație simplă este următoarea, unde, \$C\_1 \approx 1\$ și \$C\_2 \approx 0.4\$ sunt constante de proporționalitate

$$E_c^* = C_1 E_s \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (6.1)$$

$$G_c^* = C_2 E_s \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (6.2)$$

Rigiditatea este calculată plecând de la rigiditatea echivalentă la încovoiere,  $(EI)_{ech}$ , și de la rigiditatea echivalentă la forfecare,  $(AG)_{ech}$  a grinzii.

### 6.3.1. Rigiditatea echivalentă la încovoiere

În figura 6.8 este prezentată în detaliu o secțiune printr-o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară.

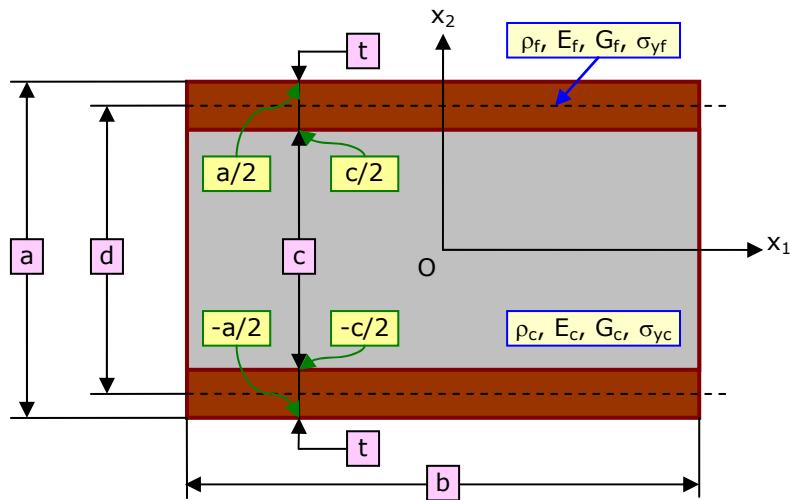


Fig. 6.8. Secțiune printr-o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară

Rigiditatea echivalentă la încovoiere găsită din teorema axelor paralele, dată pentru o grindă dreptunghiulară cum este cea din figura 6.7, se determină în felul următor, [Burman (1998), Gibson și Ashby (1997), Allen (1969), Zenkert (1995)]:

$$\begin{aligned} (EI)_{ech} &= \int_{\Sigma} x_2^2 E dx_1 dx_2 = \int_{-a/2}^{a/2} \left( \int_{-b/2}^{b/2} x_2^2 E dx_1 \right) dx_2 = b \int_{-a/2}^{a/2} x_2^2 E dx_2 = \\ &= b \left( \int_{-a/2}^{-c/2} E_f x_2^2 dx_2 + \int_{-c/2}^{c/2} E_c x_2^2 dx_2 + \int_{c/2}^{a/2} E_f x_2^2 dx_2 \right) = \\ &= b \left[ E_f \frac{x_2^3}{3} \Big|_{-a/2}^{-c/2} + E_c \frac{x_2^3}{3} \Big|_{-c/2}^{c/2} + E_f \frac{x_2^3}{3} \Big|_{c/2}^{a/2} \right] = \\ &= b \left[ E_f \frac{1}{3} \left( \frac{a^3}{8} - \frac{c^3}{8} \right) + E_c \frac{1}{3} \left( \frac{c^3}{8} + \frac{c^3}{8} \right) + E_f \frac{1}{3} \left( \frac{a^3}{8} - \frac{c^3}{8} \right) \right] = \\ &= \frac{b}{3} \left[ E_f \frac{a^3 - c^3}{4} + E_c \frac{c^3}{4} \right] \end{aligned} \quad (6.3)$$

unde,

$$\Sigma = \left\{ (x_1, x_2) \mid x_1 \in \left( -\frac{b}{2}, \frac{b}{2} \right), x_2 \in \left( -\frac{a}{2}, \frac{a}{2} \right) \right\} \quad (6.4)$$

Se descompune termenul

$$\begin{aligned} a^3 - c^3 &= (d + t_f)^3 - (d - t_f)^3 = \\ &= 2 t_f \left[ (d + t_f)^2 + (d - t_f)^2 + (d + t_f)(d - t_f) \right] = \\ &= 2 t_f \left[ 2(d^2 + t_f^2) + d^2 - t_f^2 \right] = \\ &= 2 t_f (3 d^2 + t_f^2) \end{aligned} \quad (6.5)$$

Din ecuația (6.3) și (6.5), obținem:

$$(EI)_{ech} = b \left[ E_c \frac{c^3}{12} + E_f \frac{t_f}{6} (3 d^2 + t_f^2) \right] \quad (6.6)$$

sau

$$(EI)_{ech} = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_c b c^3}{12} + \frac{E_f b t_f d^2}{2} \quad (6.7a)$$

Primul și al doilea termen descriu rigiditatea la încovoiere a fețelor și a miezului, din jurul centrului lor de greutate: împreună dând rigiditatea grinzii în cazul în care fețele nu sunt lipite de miez. În proiectarea optimă a sandwich-urilor ambii termeni sunt mici comparativ cu cel de-al treilea termen, care descrie rigiditatea la încovoiere a fețelor. În practică, fețele sunt întotdeauna mai subțiri decât miezul, astfel încât se poate scrie că  $d \approx c$ . Astfel se obține o relație aproximativă sub forma:

$$(EI)_{ech} = \frac{E_f b t_f c^2}{2} \quad (6.7b)$$

### 6.3.2. Rigiditatea echivalentă la forfecare

Pentru determinarea rigidității echivalente la forfecare s-au utilizat trei metode de calcul analitic:

- Metoda Clasică;
- Metoda Exactă;
- Metoda Aproximativă.

#### 6.3.2.1. Metoda Clasică

Rigiditatea la forfecare echivalentă calculată prin Metoda Clasică este dată de următoarea relație de calcul, [Allen, (1969), Gibson și Ashby (1997)]:

$$(AG)_{ech} = \frac{b d^2 G_c^*}{c} \quad (6.8a)$$

Care pentru fețe subțiri ( $d \approx c$ ), se poate scrie:

$$(AG)_{ech} = b c G_c^* \quad (6.8b)$$

**6.3.2.2. Metoda Exactă**

Determinare relației de calcul a rigidității la forfecare prin Metoda Exactă se face în felul următor, [Bîrsan și alții (2011)]:

Notăm cu:

$$\langle f \rangle = \int_{\Sigma} f dx_1 dx_2, \quad \forall f \quad (6.9)$$

Formula de plecare este dată de relația:

$$(AG)_{ech} = k \cdot \langle G \rangle \cdot \frac{\langle \rho x_2^2 \rangle \cdot \text{Aria}(\Sigma)}{\langle \rho \rangle \cdot \langle x_2^2 \rangle} \quad (6.10)$$

Factorul de corecție la forfecare,  $k$ , se calculează cu ajutorul relației următoare:

$$k = \frac{n^2}{12} \quad (6.11)$$

Se calculează fiecare termen separat, astfel:

$$\begin{aligned} \langle G \rangle &= \int_{\Sigma} G dx_1 dx_2 = \int_{-b/2}^{b/2} \left( \int_{-a/2}^{a/2} G dx_2 \right) dx_1 = b \int_{-a/2}^{a/2} G dx_2 = \\ &= b \left( \int_{-a/2}^{-c/2} G_f dx_2 + \int_{-c/2}^{c/2} G_c dx_2 + \int_{c/2}^{a/2} G_f dx_2 \right) \\ &= b(c G_c + 2 t_f G_f) \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \langle \rho x_2^2 \rangle &= \int_{\Sigma} \rho x_2^2 dx_1 dx_2 = \int_{-a/2}^{a/2} \left( \int_{-b/2}^{b/2} \rho x_2^2 dx_1 \right) dx_2 = b \int_{-a/2}^{a/2} \rho x_2^2 dx_2 = \\ &= b \left( \int_{-a/2}^{-c/2} \rho_f x_2^2 dx_2 + \int_{-c/2}^{c/2} \rho_c x_2^2 dx_2 + \int_{c/2}^{a/2} \rho_f x_2^2 dx_2 \right) = \\ &= b \left( \rho_f \frac{x_2^3}{3} \Big|_{-a/2}^{-c/2} + \rho_c \frac{x_2^3}{3} \Big|_{-c/2}^{c/2} + \rho_f \frac{x_2^3}{3} \Big|_{c/2}^{a/2} \right) = \\ &= b \left[ \rho_f \frac{1}{3} \left( \frac{a^3}{8} - \frac{c^3}{8} \right) + \rho_c \frac{1}{3} \left( \frac{c^3}{8} + \frac{c^3}{8} \right) + \rho_f \frac{1}{3} \left( \frac{a^3}{8} - \frac{c^3}{8} \right) \right] = \\ &= \frac{b}{3} \left[ \rho_f \frac{a^3 - c^3}{4} + \rho_c \frac{c^3}{4} \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

Utilizând ec. (6.11) și (6.13), obținem:

$$\langle \rho x_2^2 \rangle = b \left[ \rho_f \frac{t_f d^2}{2} + \rho_f \frac{t_f^3}{6} + \rho_c \frac{c^3}{12} \right] \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle &= \int_{\Sigma} \rho dx_1 dx_2 = \int_{-b/2}^{b/2} \left( \int_{-a/2}^{a/2} \rho dx_2 \right) dx_1 = b \int_{-a/2}^{a/2} \rho dx_2 = \\ &= b \left( \int_{-a/2}^{-c/2} \rho_f dx_2 + \int_{-c/2}^{c/2} \rho_c dx_2 + \int_{c/2}^{a/2} \rho_f dx_2 \right) = b(c \rho_c + 2 t_f \rho_f) \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$Aria(\Sigma) = a \cdot b \quad (6.16)$$

$$\langle x_2^2 \rangle = \int_{-b/2}^{b/2} \left( \int_{-a/2}^{a/2} x_2^2 dx_2 \right) dx_1 = b \frac{x_2^3}{3} \Big|_{-a/2}^{a/2} = \frac{b}{3} \left( \frac{a^3}{8} + \frac{a^3}{8} \right) = \frac{b a^3}{12} \quad (6.17)$$

Utilizând ec. (6.12), (6.14), (6.15), (6.16) și (6.17) și înlocuindu-le în ec. (6.10), obținem:

$$(AG)_{ech} = k \frac{b(cG_c + 2t_f G_f)}{b(c\rho_c + 2t_f \rho_f)} \cdot \frac{b a}{\frac{b a^3}{12}} \cdot b \left[ \rho_f \frac{t_f d^2}{2} + \rho_f \frac{t_f^3}{6} + \rho_c \frac{c^3}{12} \right] \quad (6.18)$$

Simplificând ec. (6.18), obținem relația de calcul a rigidității la forfecare prin Metoda Exactă:

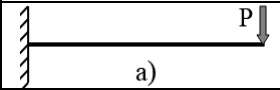
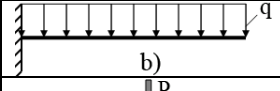
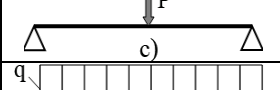
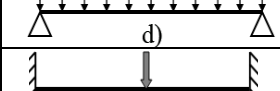
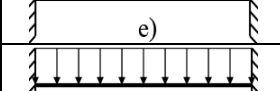
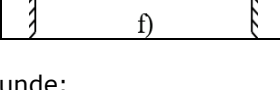
$$(AG)_{ech}^1 = k \frac{12}{a^2} \frac{cG_c + 2t_f G_f}{c\rho_c^* + 2t_f \rho_f} \left( \rho_f \frac{b t d^2}{2} + \rho_f \frac{b t^3}{6} + \rho_c^* \frac{b c^3}{12} \right) \quad (6.19)$$

### 6.3.2.3. Metoda Aproximativă

Dacă  $t_f \ll c$ , (raportul  $t_f/c$  având o valoare ne semnificativă), ec. (6.19) se simplifică, rezultând relația de calcul a rigidității la forfecare prin Metoda Aproximativă, [Bîrsan și alții (2011)]:

$$(AG)_{ech}^2 = kb \left( cG_c^* + 2t_f G_f + 4t_f G_c^* \frac{\rho_f - \rho_c^*}{\rho_c^*} \right) \quad (6.20)$$

Tabelul 6.2. Constante pentru grinzile de tip sandwich funcție de geometria încărcării

Modul de încărcare (toate grinzile au lungimea l)	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
	$\delta_b = \frac{Pl^3}{B_1(EI)_{ech}}$	$\delta_s = \frac{Pl}{B_2(AG)_{ech}}$	$M = \frac{Pl}{B_3}$	$Q = \frac{P}{B_4}$
 a)	3	1	1	1
 b)	8	2	2	1
 c)	48	4	4	2
 d)	$\frac{384}{5}$	8	8	2
 e)	192	4	8	2
 f)	384	8	12	2

unde:

- a) Grindă încastrată la un capăt și încărcată la celălalt cu o forță concentrată  $P$ ;  
 b) Grindă încastrată la un capăt și încărcată uniform distribuit cu sarcina,  $q=P/l$ ;  
 c) Grindă solicitată la încovoiere în trei puncte cu forța concentrată,  $P$ , aplicată la mijloc. Toate încercările experimentale s-au realizat conform acestei geometrii de încărcare;  
 d) Grindă solicitată la încovoiere în trei puncte cu forța uniform distribuită,  $q=P/l$ .  
 e) Grindă încastrată la ambele capete și cu o forță concentrată,  $P$ , aplicată la mijloc;  
 f) Grindă încastrată la ambele capete și încărcată uniform distribuit cu sarcina,  $q=P/l$ .

La aplicarea forței  $P$ , grinda se deformează. Deplasarea  $\delta$  este egală cu suma componentelor de încovoiere și forfecare:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{Pl^3}{B_1(EI)_{ech}} + \frac{Pl}{B_2(AG)_{ech}} \quad (6.21)$$

unde  $B_1$  și  $B_2$  sunt constante care depind de geometria încărcării. În Tabelul 6.2 sunt trecute valorile pentru geometriile de încărcare comune (geometria marcată a fost utilizată în cadrul încercărilor experimentale din cadrul acestei teze de doctorat), [ASTM C393-00, Gdoutos și Gdoutos (2005), Gibson și Ashby (1997)]

Utilizând ec. (6.7b) și (6.8b), deplasarea grinzii este dată de relația:

$$\frac{\delta}{P} = \frac{2l^3}{B_1 E_f b t c^2} + \frac{l}{B_2 b c G_c^*} \quad (6.22)$$

## 6.4. Rezistența structurilor de tip sandwich

Principala caracteristică a structurilor de tip sandwich este că sunt ușoare și rigide. Dar, doar rigiditatea singură nu este de ajuns. Grinda sau panoul trebuie să aibă de asemenea și o rezistență bună, acestea trebuind să reziste la încărcări fără a se rupe. Sunt posibile cel puțin cinci moduri de rupere. Nu este suficientă proiectarea pentru un singur mod, toate modurile trebuind luate în considerare, iar modul dominant – cel care duce la rupere - trebuie identificat și evaluat.

În această secțiune ne propunem să analizăm modurile de rupere și să descoperim o cale de a identifica modul dominant

### 6.4.1. Teoria rezistenței sandwich-urilor

Modurile de rupere a panourilor sau grinzilor de tip sandwich sunt arătate în figura 6.9. Degradarea se poate realiza prin ruperea sau curgerea fețelor, (figura 6.9b) [Kuenzi, (1965); Ueng și Liu, (1979); Froud, (1980); Ciba-Giegy, (1980); Triantafillou și Gibson, (1987a,b)]. Fața comprimată se poate "încreți" - un flambaj local al feței în miez, (figura 6.9c), [Kuenzi, (1965); Allen, (1969)] - sau fața poate prezenta "scobituri" - un flambaj local al feței comprimate pe un miez de tip fagure de miere; cu o lungime egală cu dublul mărimii celulei [Kuenzi, (1965); Ciba-Giegy, (1980), Allen (1969)]. Miezul se poate rupe cel mai uzual la forfecare, (figura 6.9d), [Ciba-Giegy, (1980); Hall și Robinson, (1984)], dar este posibilă de asemenea și ruperea la compresiune sau întindere. Apoi, acolo unde se află legături între fețe și miez, pot apărea ruperi deoarece adezivii sunt fragili uzual, desfacerea legăturilor prezentând o rupere fragilă, (figura 6.9e), [Hong și Jeong, (1985)]. În cele din urmă, există și posibilitatea zimțării fețelor și a miezului sub încărcări concentrate într-un punct; dar această problemă poate fi evitată pentru că această încărcare



poate fi suportată prin distribuția încărcării pe o suprafață cu secțiunea miezului, [Gibson și Ashby (1997)].

S-au realizat cercetări substanțiale în acest domeniu al modurilor de rupere a panourilor de tip sandwich sub încărcări statice. De exemplu, Allen, (1969) și Zenkert, (1995), au analizat modurile de rupere pentru structurile de tip sandwich, Daniel și alții, (2002), au studiat modurile de rupere pentru grinzile de tip sandwich, Gdoutos și alții, (2002), au caracterizat ruperea prin indentare, iar Gdoutos și alții, (2003), au prezentat modul de încrețire al feței pentru aceste materiale. Steevens și Fleck, (2004-I), (2004-II), au studiat în detaliu mecanismele ruperii pentru o grindă de tip sandwich cu fețe din sticlă epoxidică și miez din spumă Divinycell PVC încărcată static.

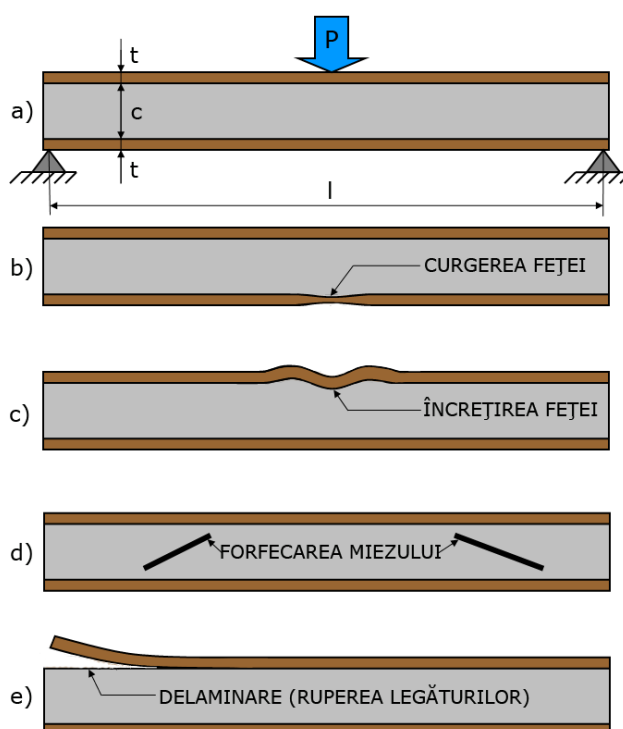


Fig. 6.9. Modurile de rupere pentru o grindă de tip sandwich: a) geometria încărcării; b) curgerea feței; c) încrețirea feței; d) forfecarea miezului; e) ruperea legăturilor dintre miez și față.

Analiza acestor moduri de rupere necesită găsirea unor expresii matematice pentru tensiunea normală  $\sigma_f$  și  $\sigma_c$ , și pentru tensiunea tangențială  $\tau_f$  și  $\tau_c$  prezente în fețe și miez. Tensiunile normale maxime sunt legate de momentul aplicat [Allen, (1969)]:

$$\sigma_f = \frac{MyE_f}{(EI)_{ech}} = \frac{M}{btc} \quad (6.23a)$$

$$\sigma_c = \frac{MyE_c^*}{(EI)_{ech}} = \frac{M}{btc} \frac{E_c^*}{E_f} \quad (6.23b)$$

unde  $M$  este momentul aplicat,  $y$  este distanța până la axa neutră, și  $(EI)_{eq}$  este dată de relația (6.7b). Tensiunea tangențială variază prin față și miez într-un mod parabolic; dar dacă fețele sunt mult mai rigide și mai subțiri decât miezul (în practică totdeauna este așa), tensiunea tangențială poate prezenta o variație liniară prin fețe și constantă prin miez, (figura 6.10), de valoarea, [Gibson și Ashby (1997), Mills (2007)]:

$$\tau_c = \frac{Q}{bc} \quad (6.24)$$

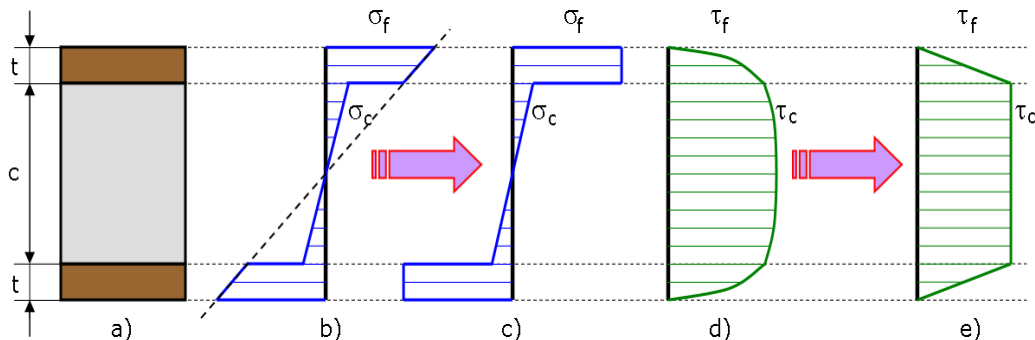


Fig. 6.10. Distribuția tensiunilor pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară: a) secțiunea transversală a grinzii; b) distribuția tensiunilor normale; c) distribuția aproximativă a tensiunilor normale; d) distribuția tensiunilor tangențiale; e) distribuția aproximativă a tensiunilor tangențiale

Tensiunea normală maximă apare în secțiunea unde momentul este maxim; aceasta poate fi legată de sarcina aplicată  $P$ , o constantă  $B_3$ , care depinde de geometria încărcării. Momentul maxim este:

$$M = \frac{Pl}{B_3} \quad (6.25)$$

Rezultând tensiuni de forma următoare:

$$\sigma_f = \frac{Pl}{B_3 btc} \quad (6.26a)$$

și

$$\sigma_c = \frac{Pl}{B_3 btc} \frac{E_c^*}{E_f} \quad (6.26b)$$

Tensiunea tangențială medie în față și miez este:

$$2\tau_f = \tau_c = \frac{P}{B_4 bc} \quad (6.27)$$

unde,  $B_4$  este o constantă suplimentară privind forța tangențială maximă din grindă,  $Q$ , la sarcina aplicată  $P$  (Tabelul 6.2). În cele din urmă, tensiunile principale,  $\sigma_1$  și  $\sigma_2$ , în cele două fețe și miez, și tensiunea tangențială maximă,  $\tau_{max}$ , sunt date de relațiile următoare, [Timoshenko și Goodier, (1970)]:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} \left\{ 1 + \left[ 1 + \left( \frac{2\tau}{\sigma} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (6.28a)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma}{2} \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{2\tau}{\sigma} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (6.28b)$$

și

$$\tau_{max} = \frac{\sigma}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2\tau}{\sigma} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.28c)$$

Unde  $\sigma$  este tensiunea normală (ec. (6.26)) și  $\tau$  este tensiunea tangențială (ec. (6.27)) în oricare dintre fețe sau miez. În fețe, raportul  $\frac{\tau_f}{\sigma_f} \left[ \left( = \frac{B_3}{B_4} \right) \cdot \frac{t}{l} \right]$  este mic, astfel încât  $\sigma_1 = \sigma_f$ ,  $\sigma_2 = 0$  și  $\tau_{max} = \tau_c$ . În schimb, în miez raportul  $\frac{\tau_c}{\sigma_c} = \frac{B_3}{B_4} \frac{t}{l} \frac{E_f}{E_c^*}$  este de obicei mare, dar nu întotdeauna, fiind și situații în care acesta este mic. În acest caz se poate spune că:  $\sigma_1 = \tau_c$ ,  $\sigma_2 = -\tau_c$  și  $\tau_{max} = \tau_c$ .

### 6.4.2. Modurile de rupere în materialele de tip sandwich

Se pot identifica următoarele moduri de rupere:

#### 6.4.2.1. Curgerea feței

Pentru acest studiu se consideră o grindă de tip sandwich cu secțiune dreptunghiulară încărcată cu forța  $P$  ca în figura 6.7. În momentul în care fețele grinzii sau panoului de tip sandwich sunt fabricate dintr-un material care prezintă o rezistență la curgere scăzută, acestea curg, (figura 6.9b). Curgerea feței apare când tensiunea normală din fețe este egală cu rezistența materialului feței,  $\sigma_{yf}$ , folosind relația (ec. 6.26a), [Gibson și Ashby (1997), Ashby și alții (2000)]:

$$\sigma_f = \frac{Pl}{B_3 b t c} = \sigma_{yf} \quad (6.29)$$

unde,  $B_3$  este o constantă funcție de încărcarea aplicată  $P$ , pentru a avea un moment maxim în grindă (Tabelul 6.2).

Forța de rupere pentru curgerea fețelor dată de ecuația (6.29) este:

$$P = B_3 b c \left( \frac{t}{l} \right) \sigma_{yf} \quad (6.30)$$

#### 6.4.2.2. Încrêțirea feței

Structurile de tip sandwich cu fețe din foi subțiri și miez ușor sunt predispuse unui tip de rupere locală cunoscută sub numele de "încrêțirea" feței, [Robert și alții (1999)]. Încrêțirea feței apare atunci când tensiunea normală din fața comprimată a grinzii ajunge la o tensiune de instabilitate locală, (figura 6.9c). Sub încărcări de compresiune fețele se încrêțesc în momentul în care tensiunea la compresiune în fețe atinge o valoare critică, [Gibson și Ashby (1997)]. Allen (1969) spune că încrêțirea feței apare atunci când tensiunea la compresiune în fața este:

$$\sigma_f = \frac{Pl}{B_3 btc} = \frac{3E_f^{1/3} E_C^{2/3}}{\left(12(3 - u_C^*)^2 (1 + u_C^*)^2\right)^{1/3}} \quad (6.31)$$

unde  $E_f$  și  $E_C$  sunt modulul de elasticitate al materialului feței respectiv al miezului.

Luând  $\nu_C^* = 1/3$  (Raportul lui Poisson pentru miez) și utilizând rezultatul  $E_C^* = \left(\rho_C^*/\rho_S\right)^2 E_S$ , (ec. 2.10a) obținem:

$$\frac{Pl}{B_3 btc} = 0.57 E_f^{1/3} E_S^{2/3} \left(\frac{\rho_C^*}{\rho_f}\right)^{4/3} \quad (6.32)$$

unde constanta  $B_3$  este dată în Tabelul 6.2, iar  $\rho_f$  și  $\rho_C^*$  sunt densitatea fețelor respectiv densitatea miezului. Ecuația (6.32) descrie modul de rupere prin încrețirea feței.

#### 6.4.2.3. Forfecarea miezului

Dacă într-o grindă de tip sandwich este prezentă forța tăietoare aceasta poate produce forfecarea miezului, (figura 6.9d), [Ashby și alții (2000)]. Dacă materialul peretelui celulei prezintă un punct de curgere plastică, cum este cazul spumelor poliuretanică, iar tensiunile principale satisfac criteriul curgerii, atunci are loc ruperea prin forfecare a miezului. Cu alte cuvinte, ruperea prin forfecare a miezului apare în momentul în care tensiunea tangențială maximă atinge o valoare critică,  $\tau_C^*$ . Valoarea critică,  $\tau_C^*$ , reprezintă rezistența la forfecare a miezului corespunzătoare unei devieri semnificative de la liniaritate și inițierii în diagrama tensiune-deformație a platoului de curgere prin forfecare. Prin urmare, condiția pentru forfecarea miezului este dată de relația următoare:

$$\tau_C = \tau_C^* \quad (6.33)$$

Acest tip de rupere se va iniția în "cel mai critic" element din grindă. Secțiunea cea mai critică dintr-o grindă de tip sandwich se găsește acolo unde combinarea tensiunilor normale și tangențiale prezintă cea mai mare valoare, în timp ce elementul cel mai critic se găsește în fibra exterioară a miezului unde tensiunea normală ia o valoare maximă. Rezistența la curgere a miezului prin forfecare depinde în egală măsură atât de densitate cât și de rezistența uniaxială. Ruperea miezului este dată de, [Gibson și Ashby (1997)]:

$$\frac{P}{B_4 bc} = C_{11} \left(\frac{\rho_C^*}{\rho_S}\right)^{3/2} \sigma_{ys} \quad (6.34)$$

unde  $C_{11}$  este o constantă de proporționalitate. Spuma continuă să se deformeze până apare ruperea finală la tracțiune produsă de o fisură sub un anumit unghi arătată în figura 6.9d.

Un miez de spumă fragil, cu o fisură inițială de lungime  $2a$ , se rupe atunci când este satisfăcut criteriul ruperii fragile. Dacă tensiunea normală în miez este mai mică comparativ cu tensiunea tangențială, și dacă lungimea fisurii este mai mare decât diametrul a patru celule, ruperea apare acolo unde tensiunea principală maximă este egală cu rezistența de rupere la tracțiune a spumei, sau când:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \sigma_f^* = \frac{K_{IC}^*}{\sqrt{\pi a}} \quad (6.35)$$

Utilizând ecuația (6.27) pentru tensiunea tangențială din miez și ecuația (2.53) pentru tenacitatea la rupere avem:

$$\frac{P}{B_4bc} = C_8 \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \sigma_{fs} \sqrt{\frac{l^*}{a}} \quad (6.36)$$

unde  $l^*$  fiind utilizat aici pentru a indica mărimea celulei.

#### 6.4.2.4. Delaminarea

Ruperea adezivului între față și miez, numit și *delaminare* este mecanismul cel mai dificil de analizat, (figura 6.9e). Este foarte importantă analiza acestei probleme deoarece delaminarea apare cel mai des la aripile de avioane care sunt construcții de tip sandwich. Adezivul de tip epoxy este în general mai rezistent decât miezul însuși, deci acolo unde legătura este realizată corect, rareori delaminarea este o problemă. Dar dacă interfața dintre față și miez prezintă defecte de tipul fisurilor, acestea se pot propaga atunci când sandwich-ul este solicitat. O analiză completă a acestei probleme este complicată în primul rând datorită diferitelor tipuri de fețe, de adezivi respectiv de miez.

Energia,  $U$ , stocată în grinda supusă la un moment,  $M$ , este  $\frac{1}{2}M\theta$ , unde  $\theta$ , este unghiul la care se realizează încovoierea. Folosind  $M = (EI)_{ech}/R$  și înlocuind raza de curbura  $R$  cu  $l/\theta$ , obținem:

$$U = \frac{1}{2} \frac{M^2 l}{(EI)_{ech}} \quad (6.37)$$

Se consideră o fisură de lungimea  $2a$  situată în interfața dintre față și miez, de arie  $2ba$ . În cazul în care fisura se propagă asupra întregii suprafețe, toată energia va fi eliberată prin crearea de suprafețe noi. Se presupune că energia eliberată crește liniar cu aria fisurii. În acest caz, dacă fisura se extinde cu  $\delta a$ , noua arie va fi  $2b\delta a$ , iar energia se va schimba în:

$$\delta U = -\frac{2b\delta a}{lb} U = -\delta a \frac{M^2}{(EI)_{ech}} \quad (6.38)$$

Rata de eliberare a energiei în timpul deformației,  $G$ , este definită ca  $-\delta U/2b\delta a$ , dând:

$$G = \frac{M^2}{2b(EI)_{ech}} \quad (6.39)$$

Dacă aceasta depășește tenacitatea adezivului,  $G_c$ , fisura se va propaga și grinda se va delamina. În acest caz (utilizând  $M = Pl/B_3$ ) încărcarea la rupere va fi:

$$\frac{Pl}{B_2btc} = \left( \frac{G_c E_f}{t} \right)^{1/2} \quad (6.40)$$

Dacă tenacitatea miezului  $G_c$  este mai mică decât a adezivului, fisura se va propaga prin miez în acest caz fiind utilizată valoarea  $G_c$  a miezului. Aceasta dă o

limită inferioară a încărcării  $P$ , iar dacă pre-există o fisură mai mare, aceasta se va propaga la această încărcare. Dacă încărcarea are o valoare relativ mică și considerând  $G_c = 1 \text{ J/m}^2$ ,  $E_f = 70 \text{ GN/m}^2$  (pentru Aluminiiu) și  $t = 1 \text{ mm}$ , obținem:

$$\left(\frac{G_c E_f}{t}\right)^{1/2} \approx 8 \text{ MN/m}^2 \quad (6.41)$$

care este mult mai mică decât tensiunea necesară pentru curgerea feței, de exemplu. Dacă, adițional momentului încovoietor,  $M$ , în grindă apare o forță tăietoare,  $Q$ , energia de deformație la forfecare din miez trebuie inclusă în energia întregii grinzi,  $U$ . Cercetările experimentale arată faptul că o fisură mare de interfață ( $a \gg c$ ) se propagă ușor la încărcări care sunt mai mici pentru alte moduri de rupere [Triantafillou și Gibson, (1989)]. Dar dacă interfața este perfectă, fisura trebuie mai întâi creată, aceasta necesitând încărcări mult mai mari.

#### 6.4.2.5. Identarea miezului

Identarea miezului, menționată mai devreme, reprezintă o problemă doar în cazul în care încărcările sunt produse de forțe concentrate. Această problemă poate fi întotdeauna depășită prin asigurarea că încărcarea este distribuită cel puțin peste o suprafață,

$$A = \frac{P}{\sigma_c^*} \quad (6.42)$$

unde  $\sigma_c^*$  este rezistența la compresiune a miezului.

### 6.5. Analiza experimentală a grinzilor de tip sandwich solificate la încovoiere în trei puncte

Cele mai multe investigații a rezistenței sandwich-urilor s-au concentrat pe un singur mod de rupere - curgerea feței, de exemplu. Triantafillou și Gibson (1987a) au studiat spectrul modurilor de rupere într-un mod care a permis un test critic al teoriei. Acest studiu a utilizat grinzi de tip sandwich cu aceleași fețe din aluminiu și miez din spumă poliuretanică, care au fost utilizate pentru a caracteriza rigiditatea optimă. Grinzile utilizate au avut diferite valori ale raportului  $t/l$  și  $\rho_c^* / \rho_s$ , și au fost solificate la încovoiere în trei puncte. "Ruperea" a fost definită ca prima deviație pronunțată de la liniaritate din curba de încărcare. Majoritatea grinzilor solificate la încovoiere în trei puncte au prezentat o curgere a fețelor, o încrețire a fețelor sau o forfecare a miezului, iar câteva dintre ele rupându-se prin delaminare sau prezența unor creștături (concentratori).

#### 6.5.1. Descrierea procedurii experimentale și prezentarea epruvetelor pentru teste

Încercările de încovoiere în trei puncte au fost realizate pe mașina de încercat la tracțiune-compresiune Zwick/Roell 5kN, (figura 6.11a), folosind un dispozitiv de încovoiere, în concordanță cu ASTM C393-00 Metode standard de testare a proprietăților la încovoiere pentru construcțiile de tip sandwich, [ASTM

C393-00, Sarzynski (2003)]. Figurile 6.11b și 6.11c prezintă dispozitivul de încovoiere și tipul epruvetelor utilizate în cadrul încercărilor experimentale înainte de testare, respectiv după testare (o grindă de tip sandwich cu fețe din Stratimat și miez de spumă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ ).

Testele realizate pe grinzile de tip sandwich au fost efectuate la temperatura camerei la o viteză de încercare de  $2 \text{ mm/min}$ . Pentru fiecare tip de sandwich au fost utilizate câte cinci probe. Probele au fost prelevate din panouri de tip sandwich, [Chinca și alții (2010), Chinca (2010), Linu și alții (2011)].

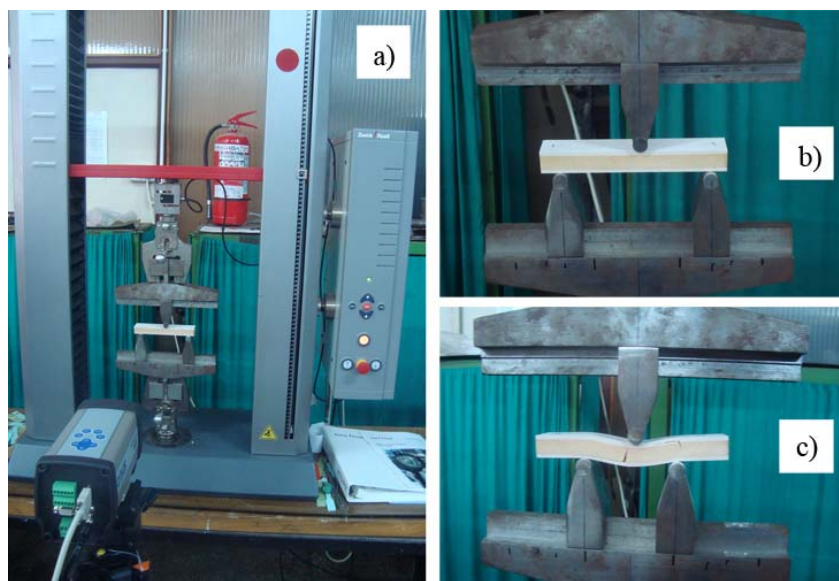


Fig. 6.11. Testele de încovoiere în trei puncte: a) Mașina de încercat Zwick/Roell 005; b) proba inițială înainte de testare; c) proba deformată după testare

Grinzile de tip sandwich au prezentat următoarele dimensiuni: deschiderea între reazeme,  $l$ ; distanța dintre centrele fețelor,  $d$ ; respectiv lățimea probei,  $b$ . Fiecare probă a fost caracterizată prin grosimea feței,  $t$ , respectiv grosimea miezului,  $c$ . S-a presupus că ambele fețe au aceeași grosime,  $t$ , (figura 6.7). De asemenea s-au presupus cunoscute modulul de elasticitate al fețelor,  $E_f$ , respectiv al miezului,  $E_c^*$ .

Pe baza considerațiilor anterioare, în acest capitol se determină hărțile de degradare pentru următoarele grinzi de tip sandwich solicitate la încovoiere în trei puncte, ca în figura 6.7:

- fețe de aluminiu (AL) și miez din plută (PLUTA 170);
- fețe de aluminiu, (AL), cu grosimea de  $0.4 \text{ mm}$  și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$  (PUR 40);
- fețe din Stratimat, (STR), cu diferite grosimi (  $1.1, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6$  și  $2 \text{ mm}$ ) și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , (PUR 40), respectiv  $200 \text{ kg/m}^3$ , (PUR 200);
- fețe din epoxi, (EPX), cu grosimea de  $0.17 \text{ mm}$  și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , (PUR 200);
- fețe din poliester, (POL), cu grosimea de  $0.10 \text{ mm}$  și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , (PUR 200).

### 6.5.2. Rezultate obținute în cadrul încercărilor experimentale

Curbele tipice forță-deplasare pentru aceste grinzi de tip sandwich, obținute în urma încercărilor experimentale de încovoiere în trei puncte sunt prezentate în figura 6.12.

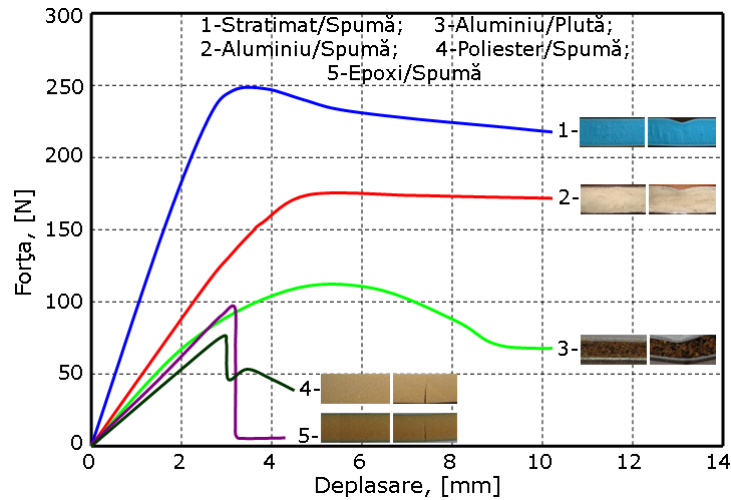


Fig. 6.12. Curbele forță-deplasare pentru grinzile de tip sandwich solicitate la încovoiere în trei puncte

Figura 6.13 prezintă o comparație a curbelor forță-deplasare pentru o grindă de tip sandwich cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică, care prezintă aceeași geometrie dar diferite valori ale distanței dintre reazeme,  $l$ , (70, 150 și 200 mm).

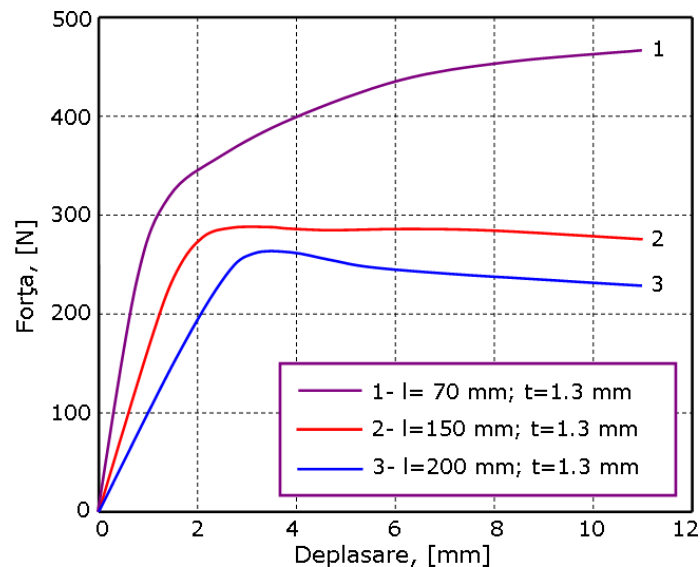


Fig. 6.13. Comparație între curbele forță-deplasare pentru valori diferite ale distanței dintre reazeme



În figura 6.14 este prezentată curba forță-deplasare pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat, (1.3 mm grosime) și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , având o deschidere între reazeme de  $l=200 \text{ mm}$ . Această figură prezintă modul de determinare al forței critice,  $F_{cr}$ . Forța de rupere (critică) este definită ca prima deviație pronunțată de la liniaritate din curba forță-deplasare, [Gibson și Ashby (1997)]. În aceeași figură este prezentată și forța maximă de rupere,  $F_{max}$ .

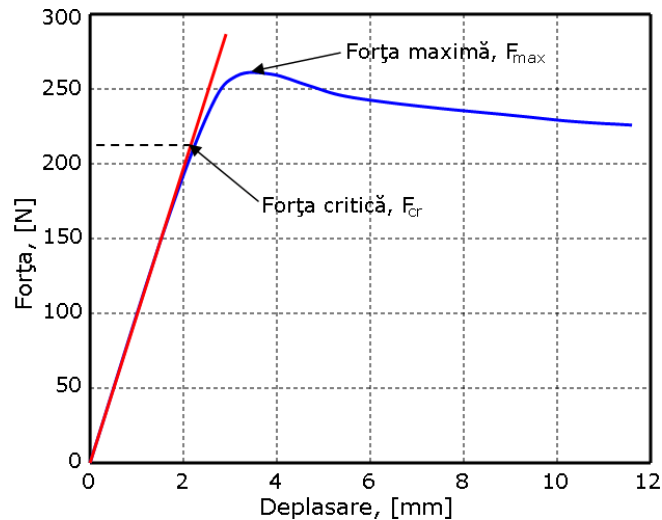


Fig. 6.14. Curba forță-deplasare pentru o grindă de tip sandwich pentru determinarea forței critice

În figura 6.15 este prezentată o comparație între forța critică,  $F_{cr}$ , și forța maximă,  $F_{max}$ , pentru grinzile de tip sandwich studiate.

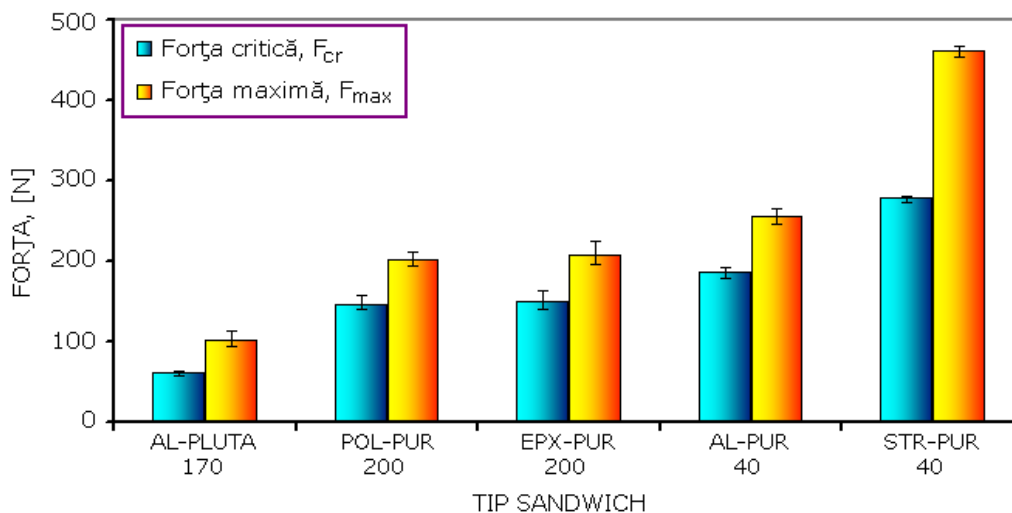


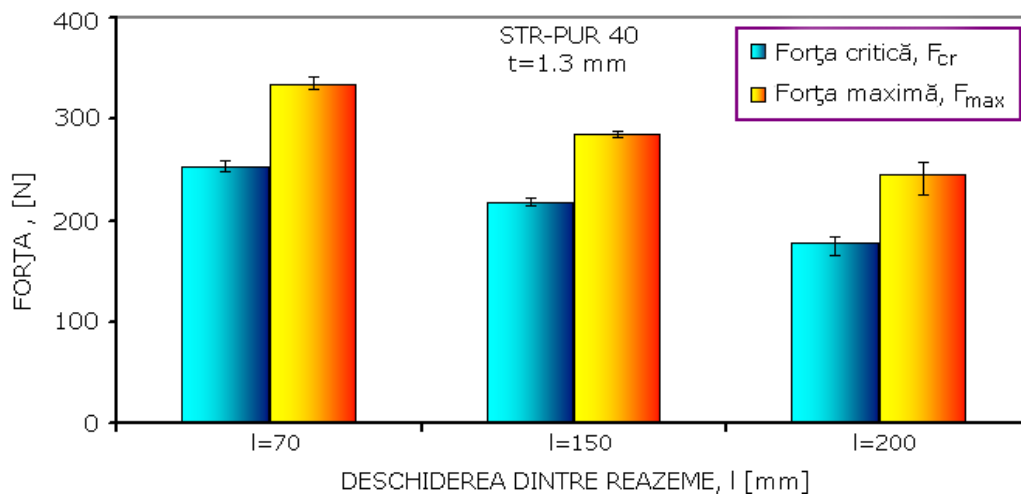
Fig. 6.15. Comparație între forța critică,  $F_{cr}$ , și forța maximă,  $F_{max}$ , pentru grinzile de tip sandwich studiate

Valorile medii ale parametrilor geometrici și ale forțelor de rupere (maximă,  $F_{\max}$  și critică,  $F_{cr}$ ), pentru grinzile de tip sandwich, rezultate în urma încercărilor experimentale sunt trecute în Tabelul 6.3, iar în Tabelele A.24 – A.26. din Anexe sunt trecute toate valorile obținute în urma testelor.

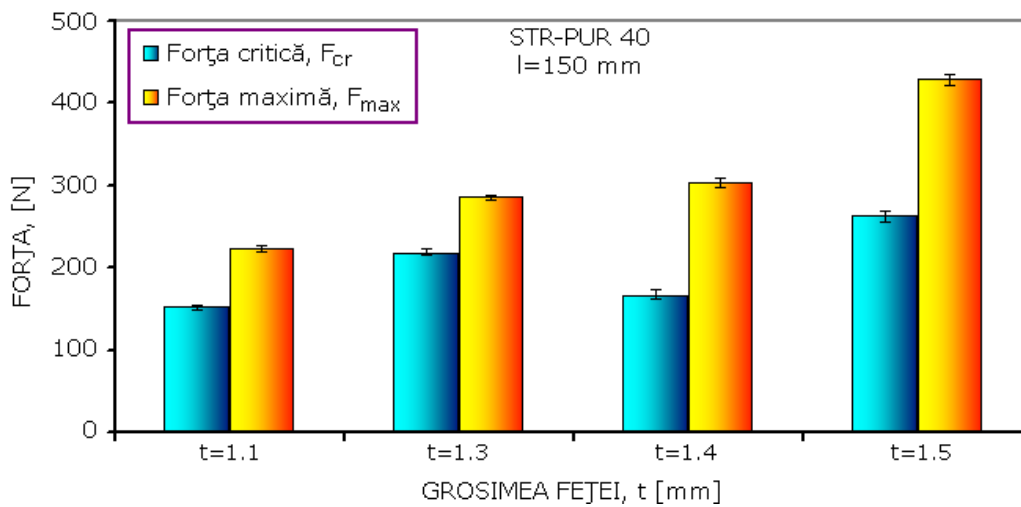
Tabelul 6.3. Parametrii geometrici și valorile medii ale forței de rupere (critică și maximă), pentru grinzile sandwich

Tip sandwich		Parametrii geometrici						Forța la rupere	
Față	Miez	l [mm]	t [mm]	t/l [-]	c [mm]	b [mm]	d [mm]	$F_{\max}$ [N]	$F_{cr}$ [N]
STR	PUR 40	150	1.1	0.0073	21.8	51.6	22.9	223.12	152.51
		200		0.0055		49.4		182.14	129.03
		70	1.3	0.0186	20.9	50.0	22.2	334.61	253.38
		150		0.0087		50.0		285.75	218.37
		200	1.4	0.0065	21.4	50.2	22.8	245.06	178.20
		70		0.0200		51.4		410.47	229.99
		150	1.5	0.0093	20.5	49.7	22.0	302.86	165.62
		70		0.0214		51.3		460.76	278.41
		150	1.6	0.0100	21.2	50.5	22.8	429.07	263.12
		200		0.0075		50.0		372.53	259.98
		70	1.6	0.0229	21.2	51.1	22.8	376.35	199.25
		150		0.0107		49.7		279.48	121.63
		200		0.0080		50.1		224.69	86.12
		STR	PUR 200	70	2.0	0.0286	13.6	33.2	15.6
120	0.0167			32.0		1860.4		1364.7	
EPX	PUR 200	40	0.17	0.0043	12.3	12.3	12.5	207.72	150.41
		90		0.0019	11.9	12.2	12.0	92.74	82.12
POL	PUR 200	40	0.1	0.0025	12.3	12.3	12.4	201.47	145.25
		90		0.0011	11.9	12.2	12.0	88.21	78.36
AL	PUR 40	70	0.4	0.0057	26.4	48.8	26.8	255.09	185.85
		150		0.0027		48.4		206.15	153.16
		200		0.0020		48.0		173.01	133.86
AL	PLUTĂ	112	1.5	0.0134	5.0	12.4	6.5	102.47	61.34

Figura 6.16 prezintă influența distanței dintre reazeme,  $l$ , asupra forței la rupere (critice și maxime), pentru o grindă de tip sandwich cu fețe din Stratimat, ( $t=1.3$  mm) și miez din spumă poliuretanică.

Fig. 6.16. Influența distanței dintre reazeme,  $l$ , asupra forței pentru grinzi de tip sandwich

În figura 6.17 este prezentată influența grosimii fețelor,  $t$ , asupra forței (critice și maxime), pentru o grindă de tip sandwich cu fețe din Stratimat, ( $l=150$  mm) și miez din spumă poliuretanică.

Fig. 6.17. Influența grosimii feței,  $t$ , asupra forței pentru grinzi de tip sandwich

### 6.5.3. Analiza datelor

Inițial, datele sunt interpretate de pe curbele experimentale obținute pentru fiecare tip de sandwich, [Sarzynski (2003)]. Inițierea degradării grinzii este localizată prin identificarea schimbării pantei inițiale, sau a punctului unde capacitatea portantă a grinzii este scăzută.

Rezultatele obținute în urma efectuării calculelor pentru tipurile de sandwich analizate sunt trecute în Tabelul 6.4.

Tabelul 6.4. Valorile medii ale tensiunii normale și tangențiale pentru grinzile de tip sandwich studiate

Tip sandwich		Parametrii geometrici		Tensiunea normală		Tensiunea tangențială	
Față	Miez	t [mm]	l [mm]	$\sigma_f$ [MPa]	$\sigma_c$ [MPa]	$\tau_f$ [MPa]	$\tau_c$ [MPa]
STR	PUR 40	1.1	150	4.622	0.004	0.034	0.068
			200	5.446	0.004	0.030	0.060
		1.3	70	3.264	0.003	0.061	0.121
			150	6.028	0.005	0.052	0.104
			200	6.533	0.005	0.042	0.085
		1.4	70	2.614	0.002	0.052	0.105
			150	4.171	0.003	0.039	0.078
		1.5	70	3.089	0.002	0.066	0.132
			150	6.354	0.005	0.034	0.127
			200	8.455	0.007	0.063	0.127
		1.6	70	2.012	0.002	0.046	0.092
			150	2.706	0.002	0.029	0.058
200	2.534		0.002	0.020	0.041		
STR	PUR 200	2	70	41.109	0.557	1.175	2.349
			120	47.035	0.638	0.784	1.568
EPX	PUR 200	0.17	40	58.481	1.882	0.248	0.497
			90	74.864	2.410	0.141	0.283
POL	PUR 200	0.1	40	96.008	2.476	0.240	0.480
			90	120.46	3.107	0.134	0.268
AL	PUR 40	0.4	70	6.311	0.001	0.036	0.072
			150	11.237	0.001	0.030	0.060
			200	13.204	0.001	0.026	0.053
AL	PLUTĂ	1.5	112	18.468	0.008	0.247	0.495
Ecuția utilizată				(6.26a)	(6.26b)	(6.27)	(6.27)

În figura 6.18 este prezentată variația tensiunii tangențiale pentru miez, ( $\tau_c$ ), respectiv fețe, ( $\tau_f$ ), funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru o grindă de tip sandwich cu fețe din aluminiu ( $t=0.4$  mm) și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Pentru acest studiu asupra influenței lungimii dintre reazeme s-au considerat trei valori ale lungimii:  $l=70, 150$  și  $200$  mm.

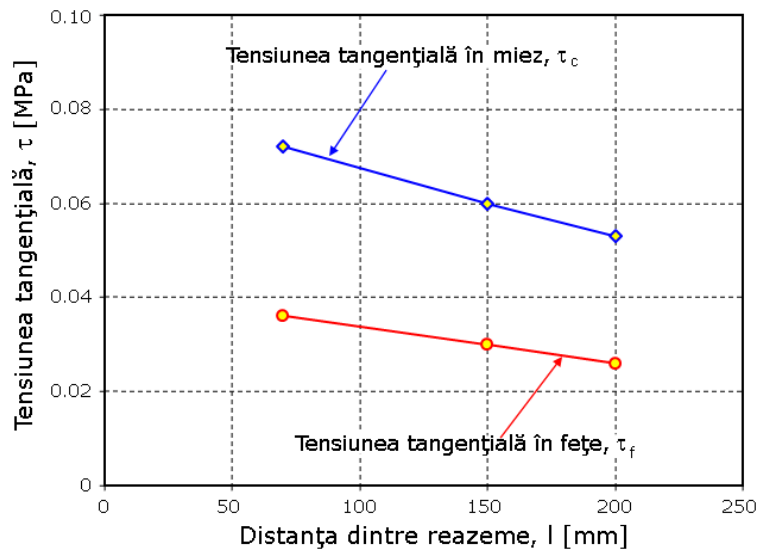


Fig. 6.18. Variația tensiunii tangențiale,  $\tau$ , funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru o grindă de tipul AL - PUR 40.

Tensiunea tangențială,  $\tau$ , în miez este de două ori mai mare decât cea din fețe. Aceasta scade odată cu creșterea distanței dintre reazeme de la valoarea de 0.072 MPa pentru  $l=70$  mm, până la valoarea de 0.053 MPa pentru  $l=200$  mm, pe când tensiunea din fețe scade de la valoarea de 0.036 MPa pentru  $l=70$  mm, la valoarea de 0.026 MPa pentru  $l=200$  mm.

De asemenea, în figura 6.19 s-a prezentat variația tensiunii normale pentru miez, ( $\sigma_c$ ), respectiv fețe, ( $\sigma_f$ ), funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru același tip de grindă de tip sandwich amintită mai sus. Și în acest caz s-au considerat tot trei valori ale lungimi dintre reazeme:  $l=70$ , 150 și 200 mm.

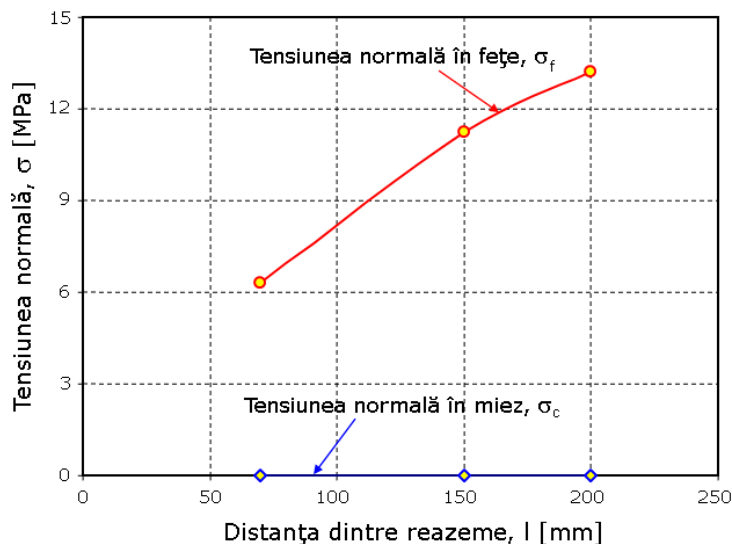


Fig. 6.19. Variația tensiunii normale,  $\sigma$ , funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru o grindă de tipul AL - PUR 40.

Din figura 6.19 se poate observa foarte ușor că tensiunea normală,  $\sigma$ , în fețe crește odată cu creșterea distanței dintre reazeme de la valoarea de 6.311 MPa, pentru  $l=70$  mm, până la valoarea de 13.204 MPa pentru  $l=200$  mm, pe când în miez tensiunea normală are o valoare nesemnificativă egală cu 0.001 MPa.

Figura 6.20 prezintă diagrama tensiunii tangențiale,  $\tau$ , pentru cele șase tipuri de grinzi de tip sandwich studiate, iar în figura 6.21. este prezentată diagrama tensiunii normale,  $\sigma$ , pentru aceleași grinzi amintite mai sus.

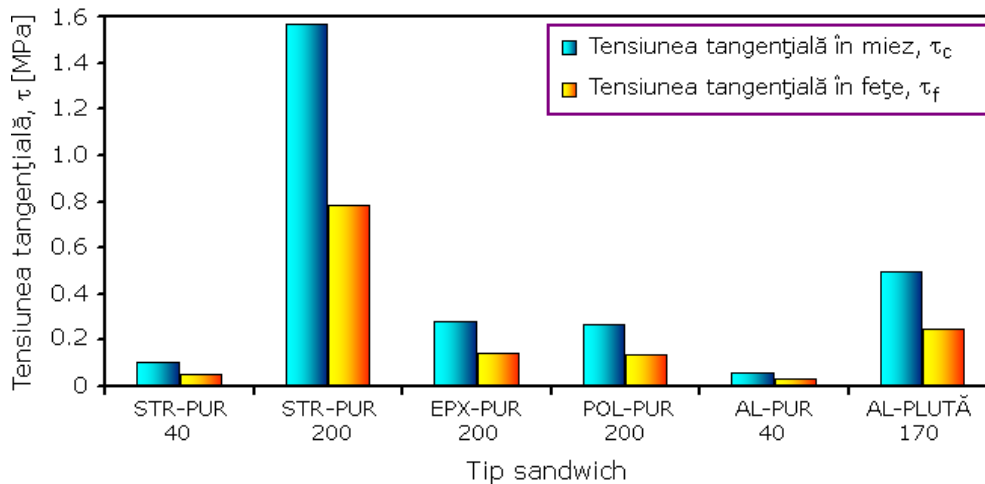


Fig. 6.20. Diagrama tensiunii tangențiale,  $\tau$ , pentru diferite tipuri de grinzi

După cum se poate observa în figura 6.20, tensiunea tangențială în miez pentru grinzi studiate este de aproximativ de două ori mai mare decât cea în fețe.

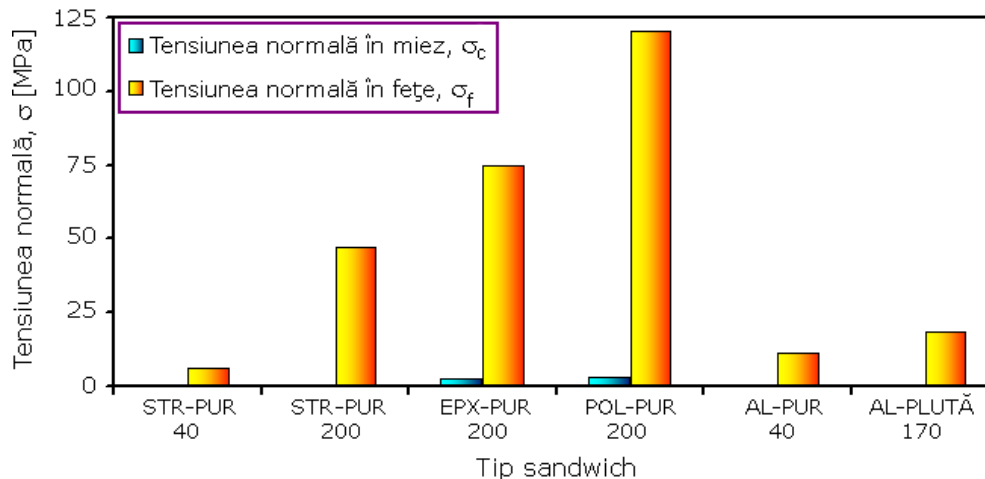


Fig. 6.21. Diagrama tensiunii normale,  $\sigma$ , pentru diferite tipuri de grinzi

De asemenea, din figura 6.21 se poate constata că în acest caz fețele prezintă o tensiune normală mult mai mare (120.46 MPa pentru un sandwich de tipul POL-PUR 200) decât cea prezentă în miezul grinzii de tip sandwich care prezintă valori aproape nesemnificative, (3.107 MPa pentru același tip de sandwich).

## 6.6. Diagramele de degradare

### 6.6.1. Principii de bază în descrierea diagramei de rupere

Diagramele de degradare pentru grinzile de tip sandwich pot furniza informații foarte utile despre influența diferiților parametri de proiectare asupra comportamentului la rupere al acestor materiale, [Andrews și Moussa (2009)].

Mecanismul dominant, pentru un tip sau model dat, este cel la care ruperea are loc la cele mai mici încărcări. O tranziție în mecanismul de rupere are loc atunci când două mecanisme au aceeași sarcină de rupere. Această informație poate fi reprezentată sub forma unei diagrame, (figura 6.22). În această diagramă axele reprezintă parametri de proiectare a grinzii. Diagrama este împărțită în domenii, în care un singur mecanism de rupere este dominant. Domeniile sunt despărțite de limitele de domeniu care se obțin atunci când două mecanisme au aceeași sarcină de rupere.

Limitele domeniului sunt găsite folosind ecuațiile din Tabelul 6.5 luate în perechi. Atunci când se face acest lucru se constată că lățimea grinzii,  $b$ , și grosimea miezului,  $c$ , se anulează (deoarece toate mecanismele depind de acestea în același mod). Această observație permite considerarea a doar doi parametri de proiectare: rapoartele  $t/l$  și  $\rho_c^* / \rho_s$ . Ei sunt utilizați ca și axe pentru diagramă.

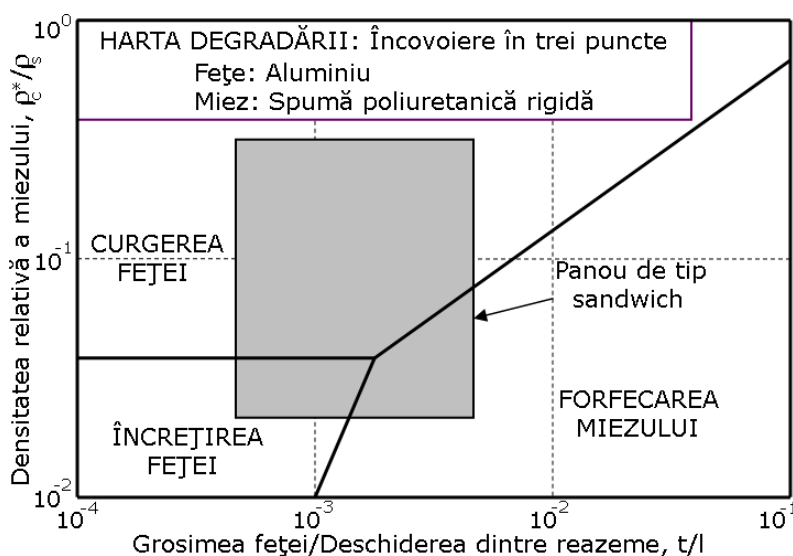


Fig. 6.22. Diagrama modulului de rupere pentru o grindă dreptunghiulară tip sandwich cu fețe de aluminiu și miez din spumă poliuretanică supusă la încovoiere în trei puncte.

În figura 6.22 se pot observa trei moduri dominante de rupere: curgerea feței, (figura 6.9b), încrețirea feței, (figura 6.9c) și forfecarea miezului, (figura 6.9d). La valori scăzute ale raportului  $t/l$ , fețele se rup prin încrețire dacă densitatea miezului este mică, și prin curgere dacă densitatea miezului este mare. Dacă grosimea fețelor crește, are loc o tranziție de la ruperea feței la cea a ruperii (forfecării) miezului, [Gibson și Ashby (1997)].

În Tabelul 6.5 sunt prezentate ecuațiile forței de rupere exprimate pentru fiecare mecanism. Fiecare ecuație conține trei seturi de variabile: cele referitoare la

configurația de încărcare ( $B_3$  și  $B_4$ , Tabelul 6.2); cele referitoare la proprietățile de material ale fețelor și a solidului din care este format miezul ( $\rho_f$ ,  $E_f$ ,  $\sigma_{yf}$ ,  $\rho_s$ ,  $E_s$  și  $\sigma_{ys}$ ), și cele referitoare la forma și dimensiunile grinzilor ( $t/l$ ,  $c/l$ , și  $\rho_c^* / \rho_s$ ). Ne propunem să determinăm în ce măsură modul de rupere depinde de forma grinzilor.

Tabelul 6.5. Ecuțiile diagramei de rupere pentru o grindă de tip sandwich

Modul de rupere	Forța de rupere	Numărul ecuației
Curgerea feței (din ec. (6.17))	$P = B_3bc\left(\frac{t}{l}\right)\sigma_{yf}$	(6.43)
Încrățirea feței (din ec. (6.20))	$P = 0.57B_3bc\left(\frac{t}{l}\right)E_f^{1/3}E_s^{2/3}\left(\frac{\rho_c^*}{\rho_s}\right)^{4/3}$	(6.44)
Forfecarea miezului (din ec. (6.22))	$P = C_{11}B_4bc\sigma_{ys}\left(\frac{\rho_c^*}{\rho_s}\right)^{3/2}$	(6.45)
Ruperea miezului (din ec. (6.24))	$P = C_8B_4bc\sigma_{fs}\left(\frac{\rho_c^*}{\rho_s}\right)^{3/2}\sqrt{\frac{l^*}{a}}$	(6.46)
Ruperea legăturii (din ec. (6.28))	$P = B_3bc\left(\frac{t}{l}\right)\sqrt{\frac{G_cE_r}{t}}$	(6.47)

Considerând tranziția între curgerea feței și încrățirea feței, ecuațiile de rupere (6.43) și (6.44) din Tabelul 6.5 dau ecuația limitei domeniului.:

$$\frac{\rho_c^*}{\rho_s} = \left( \frac{\sigma_{yf}}{0.57E_f^{1/3}E_s^{2/3}} \right)^{3/4} \quad (6.48)$$

Această ecuație este independentă de  $t/l$ , deci în figura 6.16 ea apare ca o linie orizontală. Ecuții similare se obțin pentru alte limite de domeniu, ele fiind trecute în Tabelul 6.6, acestea din urmă depinzând în general de  $t/l$  și  $\rho_c^* / \rho_s$ , [Triantafillou (1985), Triantafillou și Gibson (1987a)]. Figura 6.22 este rezultatul tipic, descriind toate grinzile de tip sandwich cu fețe din aluminiu și miez din spumă poliuretanică, solicitate la încovoiere în trei puncte.

Raportul  $t/l$  variază de la 1/10000 până la 1/10; cea mai uzuală grindă de tip sandwich având valoarea raportului cuprinsa între 1/2000 și 1/200. Densitatea relativă a miezului  $\rho_c^* / \rho_s$ , variază de la 0.01 până la 1; practic, grinzile de tip sandwich au acest raport cuprins între 0.02 și 0.3. Astfel se întâlnesc trei moduri dominante de rupere pe diagrama: curgerea feței, încrățirea feței și forfecarea miezului. La valori scăzute a raportului  $t/l$ , ruperea feței are loc prin încrățire dacă densitatea miezului este mică (și prin urmare fața nu rezistă la flambaj), iar dacă densitatea miezului este mare, ruperea feței are loc prin curgere. Pe măsură ce crește grosimea feței, are loc o tranziție între ruperea feței și cea a miezului. Pentru această configurație de încărcare și asociere a materialelor feței și a miezului solid, miezul se rupe prin forfecare. Delaminarea nu apare deoarece legătura este



considerată a fi perfectă. Modul de încărcare schimbă puțin diagrama (deoarece se schimbă constantele  $B_3$  și  $B_4$ ).

Tabelul 6.6. Ecuțiile de tranziție pentru diagrama modului rupere

Modul de rupere	Ecuția de tranziție	Numărul ecuației
Curgerea feței - încrêțirea feței	$\frac{\rho_c^*}{\rho_s} = \left( \frac{\sigma_{yf}}{0.57 E_f^{1/3} E_s^{2/3}} \right)^{3/4}$	(6.49)
Curgerea feței - forfecarea miezului	$\frac{t}{l} = \frac{C_{11} B_4}{B_3} \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{yf}} \right)$	(6.50)
Încrêțirea feței - forfecarea miezului	$\frac{t}{l} = \frac{C_{11} B_4}{0.57 B_3} \left( \frac{\sigma_{ys}}{E_f^{1/3} E_s^{2/3}} \right) \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^{1/6}$	(6.51)

Diagrama din figura 6.22 este generală, descriind toate grinzile de tip sandwich cu fețe din aluminiu și miez din spumă poliuretanică solicitate la încovoiere în trei puncte. De exemplu, dacă sunt date grosimea miezului,  $c$ , și lățimea grinzii,  $b$ , se poate calcula forța de rupere a grinzii la fiecare punct din diagramă. Aceste informații (care sunt utile în proiectarea grinzilor pentru diferite aplicații), pot fi reprezentate ca un set de contururi pe diagrama care rezumă atât mecanismul de rupere cât și forța de rupere.

Diagrama de degradare poate fi de asemenea construită pentru plăci tip sandwich și pentru coloane. Procedura de construcție este aceeași: ecuațiile tensiunilor normale și tangențiale ale fețelor și miezului sunt echivalente cu rezistența fețelor sau cea a miezului. Aceste ecuații luate în parte dau limitele diagramei de rupere. În practică ecuațiile de tranziție nu pot fi extinse și pentru spumele cu celule închise, diagrama construindu-se în acest caz prin metode numerice. Triantafillou și Ghibson (1987a) prezintă un astfel de exemplu.

### 6.6.2. Obținerea diagramei de rupere

Utilizând ecuațiile de rupere și proprietățile de material prezentate mai sus se pot dezvolta hărțile modului de degradare pentru fiecare grindă de tip sandwich în parte. Hărțile de degradare indică grafic modurile de rupere posibile pentru grinzile de tip sandwich prin simpla prezentare a granițelor dintre două tipuri de rupere, [Andrews și Moussa (2009), Lim și alții (2004), Linul și alții (2011)]. Hărțile prezintă densitatea relativă a miezului,  $\rho_c^*/\rho_s$  funcție de raportul dintre grosimea feței și al deschiderii dintre reazeme,  $t/l$ .

Hărțile de rupere au fost construite pentru fiecare tip de grindă, iar valorile corespunzătoare pentru probele testate sunt prezentate de asemenea prin culori diferite, ținând cont de geometria grinzii și deschiderea dintre reazeme.

Proprietățile de material ale grinzilor de tip sandwich considerate (atât pentru fețe cât și pentru miez), sunt trecute în Tabelul 6.7, [Linul și alții (2010), Linul și alții (2011), Chincea și alții (2010), Gibson și Ashby (1997), Silva și alții (2005), Constantinescu și alții (2007)].

Tabelul 6.7. Proprietățile de material ale grinzilor de tip sandwich

Tip sandwich		Densitatea [kg/m <sup>3</sup> ]			Modulul de elasticitate, [MPa]			Rezistența la curgere, [MPa]		
Fețe	Miez	$\rho_f$	$\rho_c^*$	$\rho_s$	$E_f$	$E_c^*$	$E_s$	$\sigma_{yf}$	$\sigma_{yc}^*$	$\sigma_{ys}$
AL	Spumă	2705	40	1170	69000	7	1600	78	0.35	53.4
AL	Plută	2100	170	1150	33569	15	9000	77	1	65 <sup>#</sup>
STR	Spumă	1200	40	1170	9000	7	1600	106	0.35	53.4
STR	Spumă	1200	200	1170	9000	170	1600	106	5.4	53.4
EPX	Spumă	1060	200	1170	3790	170	1600	60	5.4	53.4
POL	Spumă	1150	200	1170	4730	170	1600	50	5.4	53.4

<sup>#</sup> Valoare  $\sigma_{ys}$  este estimată în concordanță cu Gibson și alții (1981) și Fleck și alții (2010).

În figura 6.23 este prezentată o diagramă de degradare pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, solicitată la încovoiere în trei puncte. Diagrama prezintă o familie de grinzi de tip sandwich cu diferite valori ale raportului  $t/l$ . În timpul încercărilor experimentale toate aceste grinzi au prezentat o încrețire a feței. Există o bună concordanță între mecanismul observat și cel așteptat al rupei.

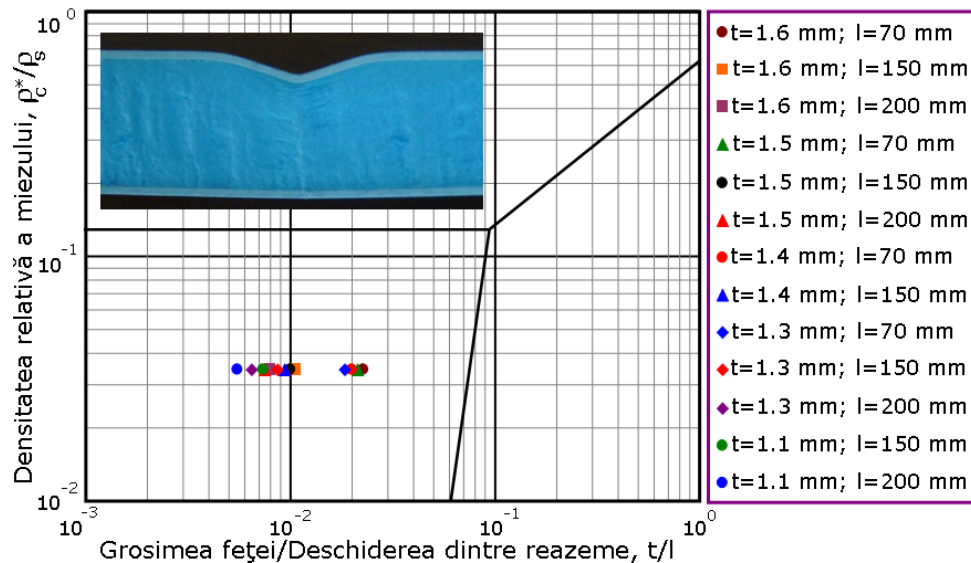


Fig. 6.23. Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, solicitată la încovoiere în trei puncte

Figura 6.24 prezintă diagrama degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din poliester și miez din spumă poliuretanică cu densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup>, solicitată la încovoiere în trei puncte. De asemenea în diagramă sunt indicate punctele experimentale pentru două valori ale raportului  $t/l$ , (0.0025 și 0.011). Pentru acest caz, toate probele au prezentat o rupere a feței.

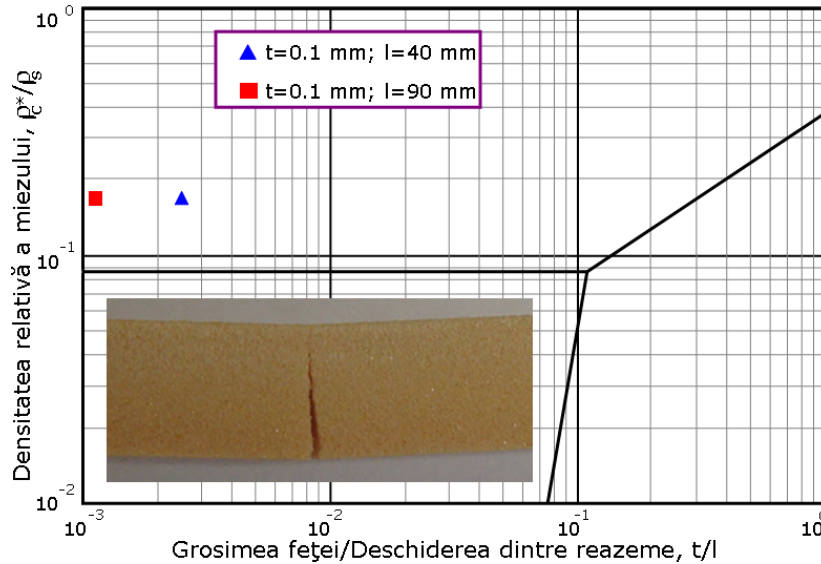


Fig. 6.24. Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din poliester și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte

O diagramă de degradare pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din epoxi și miez din spumă poliuretanică cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte este prezentată în figura 6.25. Și în acest caz diagrama prezintă valorile experimentale pentru diferite valori ale raportului  $t/l$ , (0.0043 și 0.0019), rezultând o rupere a feței.

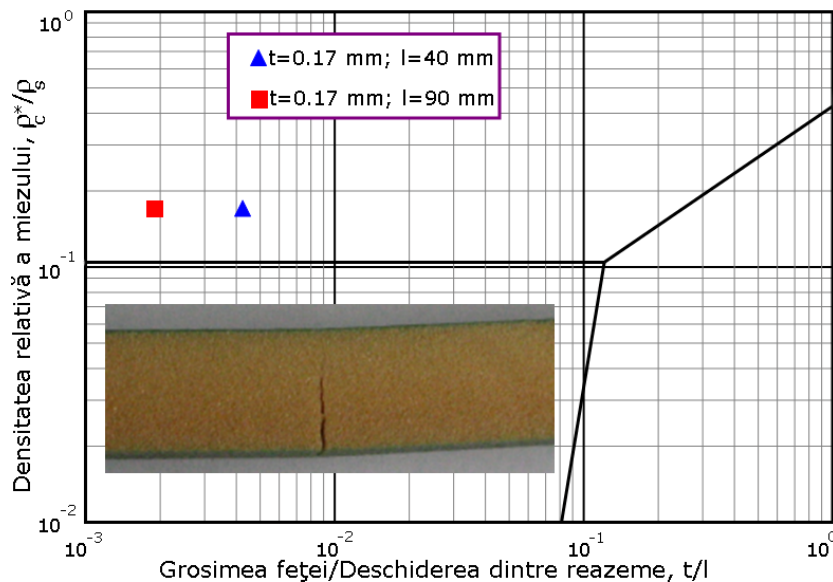


Fig. 6.25. Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din epoxi și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte

În figura 6.26 este prezentată diagrama degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din aluminiu și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte. În diagramă sunt reprezentate punctele experimentale pentru diferite valori a raportului  $t/l$ , (0.0057, 0.0027 și 0.0020). În acest caz toate probele au prezentat încrețirea feței.

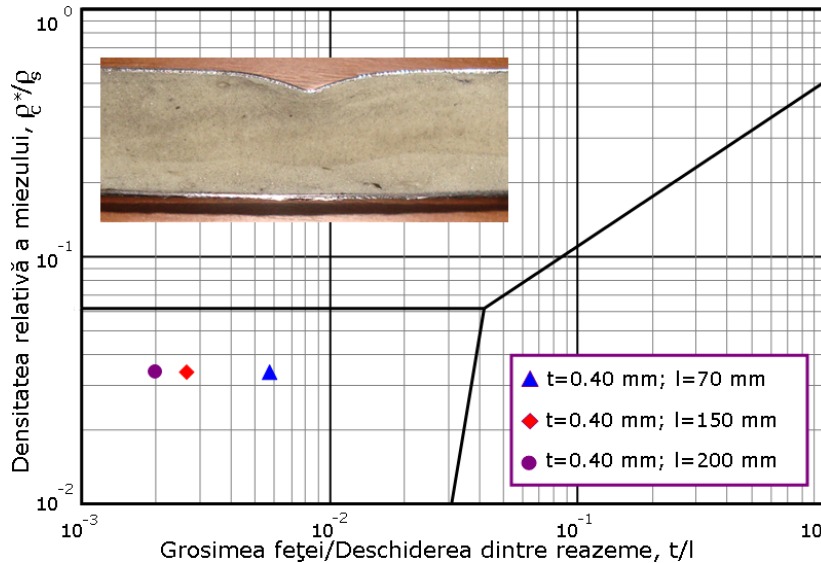


Fig. 6.26. Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din aluminiu și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte

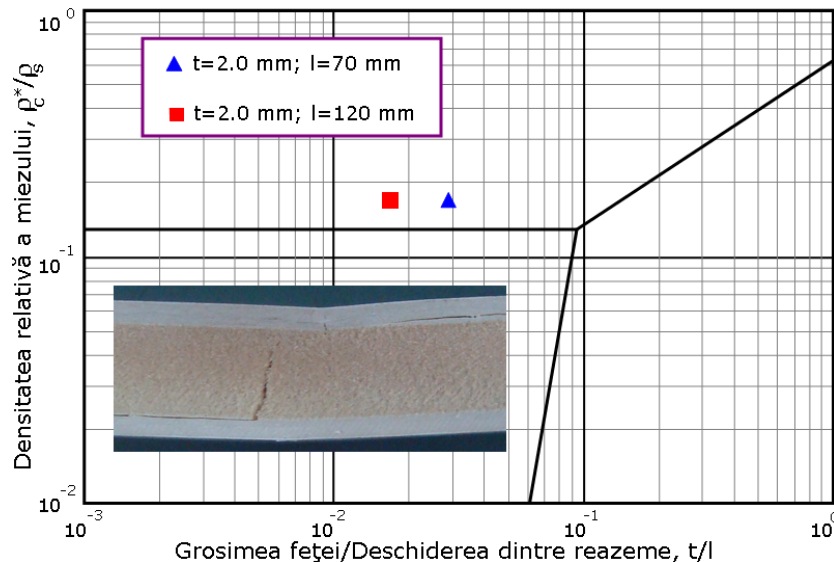


Fig. 6.27. Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , solicitată la încovoiere în trei puncte

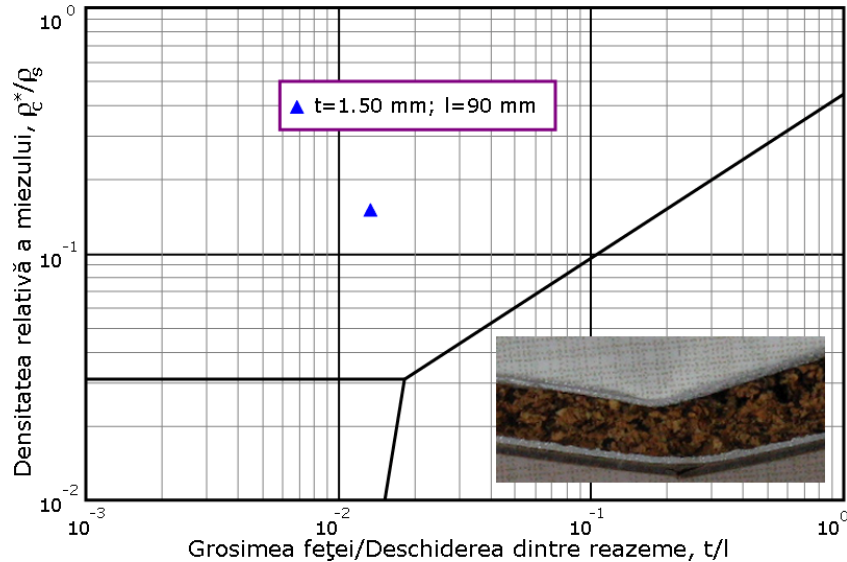


Fig. 6.28. Harta degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din aluminiu și miez din plută cu densitatea de  $170 \text{ kg/m}^3$ , sollicitată la încovoiere în trei puncte

Figura 6.27 prezintă diagrama degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , sollicitată la încovoiere în trei puncte. De asemenea, diagrama prezintă rezultatele experimentale pentru diferite valori ale raportului  $t/l$ , ( $0.0286$  și  $0.0167$ ), iar degradarea observată a fost curgerea feței.

În figura 6.28 este prezentată diagrama degradării pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din aluminiu și miez din plută cu densitatea de  $170 \text{ kg/m}^3$ , sollicitată la încovoiere în trei puncte. În acest caz toate probele au prezentat curgerea feței.

## 6.7. Comparație între analiza experimentală și analitică a grinzilor de tip sandwich

### 6.7.1. Prezentarea detaliată a mecanismului de rupere

Pentru o înțelegere mai ușoară a mecanismului de rupere, în figura 6.29 este prezentată detaliat curba forță-deplasare rezultată în urma încercărilor experimentale de încovoiere în trei puncte pentru o grindă de tip sandwich de secțiune dreptunghiulară cu fețe din Stratimat (2 mm grosime) și miez din spumă poliuretanică rigidă (cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ ).

Analizând cu atenție această curbă, se pot observa următoarele zone care iau naștere în urma aplicării încărcării:

- o zonă de așezare și stabilizare, (0-A);
- o zonă liniar-elastică, (A-B), unde punctul B reprezintă punctul unde se obține forța critică,  $F_{cr}$ , iar modul lui de obținere este prezentat în figura 6.14;
- o zonă în care apare curgerea feței, (B-C), unde punctul C reprezintă punctul unde se obține forța maximă,  $F_{max}$ ;

- o zonă în care apare prima fisură în miez, ducând la forfecarea acestuia, (zona C-D);
  - o zonă în care apare o creștere relativ mică a forței, (D-E),
  - o zonă în care apare o fisură la nivelul feței sandwich-ului, (E-F)
  - o zonă în care apare a doua fisură în miez, ducând la o nouă forfecare a acestuia, (F-G);
  - în cele din urmă apare ruperea finală, (G-H).
- Pe aceeași figură este reprezentată epruveta la diferite nivele a solicitării, indicând mecanismele de degradare ce apar.

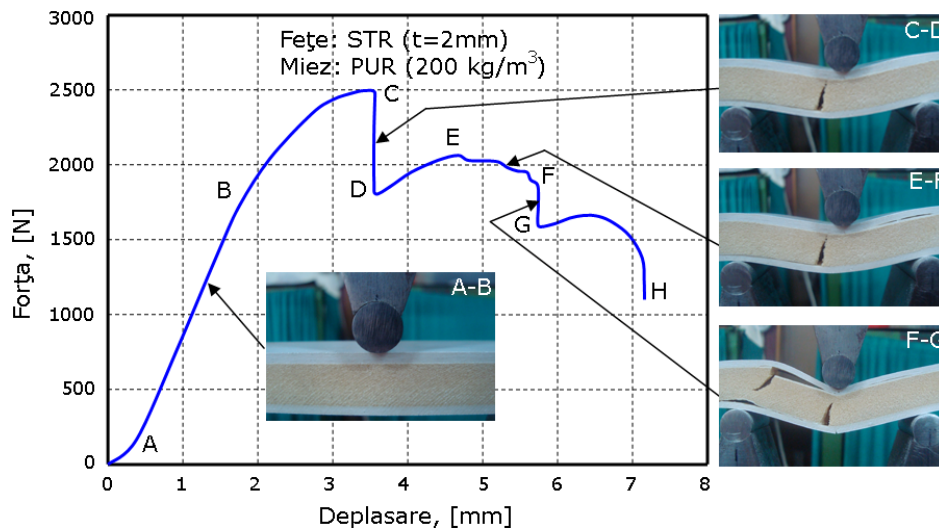


Fig. 6.29. Curba forță-deplasare pentru o grindă de tip sandwich solicitată la încovoiere în trei puncte, prezentând identificarea zonelor de rupere

Pentru grinzile de tip sandwich cu fețe din aluminiu și miez din plută cu densitatea de  $170 \text{ kg/m}^3$ , s-a obținut mai întâi o curgere a feței urmată de o forfecare a miezului, (figura 6.24).

### 6.7.2. Comparație experimental-analitic privind estimarea rigidității echivalente a grinzilor tip sandwich

Pentru aceasta analiză, din curba forță-deplasare s-a utilizat doar porțiunea liniar-elastică (zona A-B).

Comparația este realizată pentru două dintre grinzile de tip sandwich utilizate în cadrul încercărilor experimentale:

- grinzi cu fețe din epoxi, (EPX), având grosimea de 0.17 mm și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , (PUR 200);
- grinzi cu fețe din poliester, (POL), având grosimea de 0.1 mm și miez din spumă poliuretanică rigidă cu densitatea de  $200 \text{ kg/m}^3$ , (PUR 200).

Ambele tipuri de sandwich menționate mai sus prezintă aceeași valoare a deschiderii dintre reazeme de  $l=90 \text{ mm}$ .

În figura 6.30 este prezentată o comparație a porțiunii liniar elastice între rezultatele experimentale ale unei grinzi cu fețe din epoxi și predicțiile obținute prin cele trei metode prezentate mai sus (Metoda Exactă – ec. (6.8a), Metoda Clasică - ec. (6.19) și Metoda Aproximativă - ec. (6.20)).

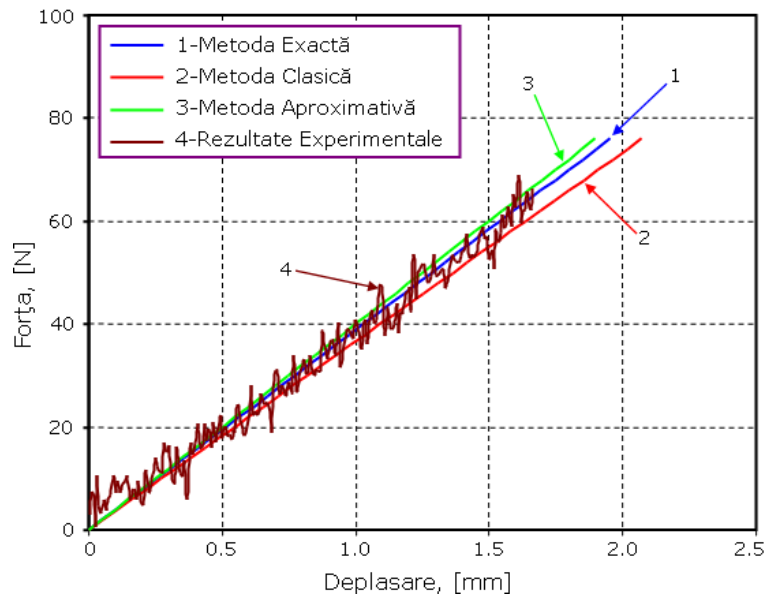


Fig. 6.30. Comparație între rezultatele experimentale și metodele analitice pentru o grindă sandwich cu fețe din epoxi și miez din spumă poliuretanică

Se observă că Metoda Exactă prezentată este cea care se apropie cel mai mult de rezultatele experimentale, urmată de Metoda Aproximativă și Metoda Clasică. De asemenea se poate observa că soluția analitică aproximativă este foarte aproape de cea exactă.

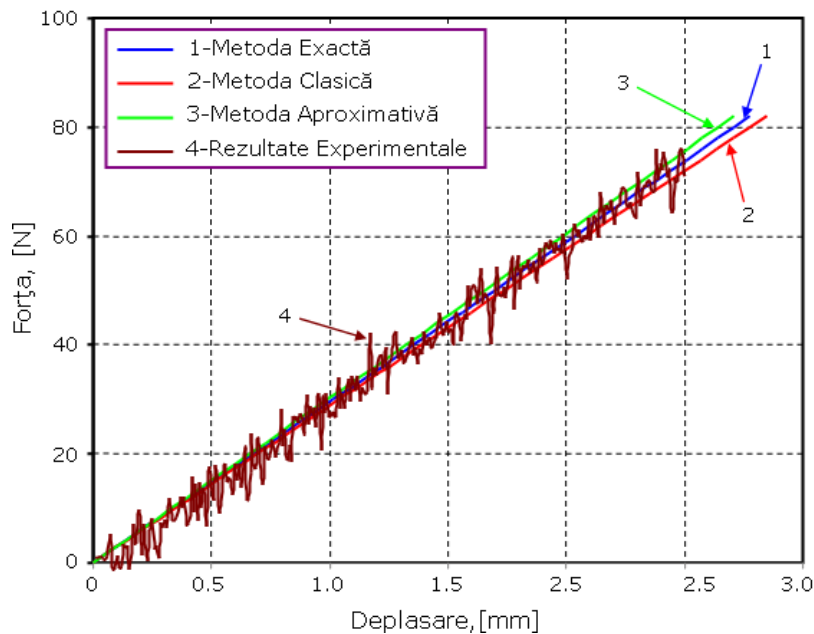


Fig. 6.31. Comparație între rezultatele experimentale și metodele analitice pentru o grindă sandwich cu fețe din poliester și miez din spumă poliuretanică

Figura 6.31 prezintă o comparație între rezultatele experimentale ale unei grinzi cu fețe din poliester și cele trei metode analitice (Metoda Exactă, Metoda Clasică și Metoda Aproximativă).

În acest caz se poate observa că Metoda Exactă prezentată este cea care se apropie cel mai mult de rezultatele experimentale, ea fiind situată intermediar și la o distanță aproximativ egală față de soluția analitică clasică, respectiv aproximativă.

În acest capitol s-a realizat o caracterizare a structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare, (spumă și plută). În acest sens, în prima parte a capitolului s-au prezentat domeniile de aplicație ale construcțiilor de tip sandwich, ecuațiile clasice de determinare a rigidității echivalente la încovoiere și forfecare, iar pe lângă aceste ecuații s-au introdus noi relații de calcul a parametrilor amintiți (ec. 7.19 și ec. 7.20).

S-a realizat construirea hărților de degradare pentru mai multe tipuri de materiale de tip sandwich având fețe de aluminiu și miez de plută (AL-PLUTA 170), fețe de aluminiu și miez de spumă (AL-PUR 40), fețe din Stratimat și miez de spumă (STR-PUR 40 SI STR-PUR 200), fețe din epoxi și miez de spumă (EPX-PUR 200), respectiv fețe din poliester și miez de spumă (POL-PUR 200). Construirea hărților de degradare s-a făcut luând în considerare principalele moduri de rupere (încrêțirea fețelor, forfecarea miezului și ruperea feței), diferite grosimi ale fețelor și diferite densități ale miezului.

S-au determinat tensiunile normale și tangențiale atât din fețele cât și din miezul grinzii. S-a prezentat variația tensiunii tangențiale pentru miez, ( $\tau_c$ ), respectiv fețe, ( $\tau_f$ ), funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru o grindă de tipul AL - PUR 40. De asemenea, s-a prezentat variația tensiunii normale pentru miez, ( $\sigma_c$ ), respectiv fețe, ( $\sigma_f$ ), funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru același tip de grindă de tip sandwich amintită mai sus.

În ultima parte a capitolului s-a realizat atât o comparație experimental - analitic a acestor grinzi cât și o analiză microstructurală pentru grinzile de tip sandwich cu miezul din spumă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$  (AL-PUR 40 si STR-PUR 40), acest lucru evidențiind forma și tipul celulelor.



## 7. CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE

### 7.1. Concluzii

În urma studiului efectuat se pot remarca următoarele concluzii:

1. Teza de doctorat cu titlul „*Studiul factorilor care influențează proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanică rigide*” a fost concepută și realizată cu scopul rezolvării unor probleme ce privesc comportarea mecanică a materialelor celulare. Studiile elaborate pe parcursul tezei de doctorat s-au concentrat pe caracterizarea mecanică a spumelor poliuretanică rigide și a materialelor de tip sandwich cu miez din spuma, utilizându-se cele mai noi teorii și procedee de calcul.

2. În prima parte a lucrării s-a făcut o trecere în revistă a stadiului actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare, prezentându-se pe scurt tehnologia de fabricare a spumelor, respectiv structura, proprietățile, aplicațiile și avantajele utilizării materialelor celulare.

3. S-a realizat o prezentare a materialelor celulare și s-a constatat că un solid celular este confecționat dintr-o rețea interconectată de straturi solide cu forma muchiilor și fețelor celulelor bine definite. În acest sens, cea mai importantă caracteristică a solidelor celulare este densitatea relativă,  $\rho^*/\rho_s$ ; care este egală cu raportul dintre densitatea materialului celular,  $\rho^*$ , și densitatea solidului din care este confecționat materialul celular,  $\rho_s$ .

4. În cadrul „Tehnologiei de fabricare a spumelor”, s-au prezentat materiale care pot fi elaborate sub formă de spume, și s-a subliniat că polimerii au cele mai multe avantaje pentru a fi elaborați sub formă de materiale celulare. S-au prezentat diferite tehnici și metode de realizare a spumelor, precum și o clasificare a acestora, (Tabelul 1.1, figura 1.5).

5. De asemenea, s-au prezentat procesele de realizare a spumelor poliuretanică, (proces simplu – figura 1.6, semi-prepolimer – figura 1.7 și polimer – figura 1.8), avantajele și dezavantajele fiecărui proces, cât și cel mai simplu mod de obținere a unei spume poliuretanică rigide, prin simpla amestecare la temperatura ambiantă a celor două bicomponente de poliisocianat și polioliol, (figura 1.9). Unele dintre epruvetele utilizate în cadrul programului experimental au fost realizate conform acestui procedeu amintit mai sus.

6. S-a prezentat structura celulară pentru mai multe tipuri de materiale (materiale celulare atât fabricate de om cât și naturale, atât cu celule deschise cât și cu celule închise) și s-a ajuns la concluzia că structura solidelor celulare variază de la forma aproape perfectă de tip fagure de miere, până la cele mai complexe forme tridimensionale, (figura 1.10, figurile 1.13 - 1.15).

7. Proprietățile oricăruia dintre aceste solide celulare depind de modul cum este distribuit materialul solid în fețele și muchiile celulei. Mai întâi s-a prezentat forma și mărimea celulelor, atât în plan bidimensional cât și în plan tridimensional, iar apoi s-au determinat ecuațiile privind densitatea relativă (figurile 1.16 - 1.19). Alegerea cea mai bună a ecuației pentru calculul densității relative depinde de dimensiunile structurilor, (fagure de miere sau spumă) și de faptul dacă spuma are celule deschise sau celule închise.

8. S-a realizat o clasificare a materialelor ingineresti, (figura 1.21), respectiv o trecere în revistă a principalelor proprietăți ale materialelor celulare (modulul de elasticitate – figura 1.22, rezistența la rupere – figura 1.23, tenacitatea la rupere – figura 1.24 și conductivitatea termică – figura 1.25). Proprietățile spumelor poliuretanică rigide depind de două seturi distincte de proprietăți: primul set de proprietăți este reprezentat de structura geometrică a spumelor – mărimea și forma celulelor, modul în care este distribuită materia între muchie și fețe, și densitatea relativă sau porozitatea; iar al doilea set îl reprezintă parametrii care descriu proprietățile intrinsece de material a fiecărui perete al celulei.

9. Particularitatea proprietăților materialelor celulare creează aplicații în inginerie pentru spume, care nu pot fi prea ușor acoperite de către celelalte tipuri de materiale cu densitate ridicată. Cele mai importante domenii de aplicare a materialelor celulare sunt pentru: izolare termică, ambalare, utilizarea în construcții și flotabilitate, (figurile 1.27 – 1.35).

10. În Capitolului 2 este prezentat comportamentul spumelor la diferite solicitări ținând cont de structura și proprietățile de material din care sunt realizați pereții celulelor. În acest sens s-au sintetizat metodele analitice de determinare a proprietăților mecanice ale spumelor, respectiv mecanismele de deformare în spume și modelele micromecanice utilizate pentru caracterizarea materialelor celulare.

11. S-au prezentat ecuațiile aferente fiecărei zone din curba tensiune-deformație (zona liniar-elastică, zona de platou și densificarea). Ținând cont de tipul spumei cât și de faptul că spumele pot fi solicitate atât la tracțiune cât și la compresiune, aceste ecuații sunt dezvoltate atât pentru spume cu celule deschise cât și pentru spume cu celule închise.

12. S-a constatat că ruperea fragilă la tracțiune este destul de diferită față de cea la compresiune. În compresiune spuma se strivește progresiv, iar în cazul tracțiunii spuma se rupe după propagarea unei singure fisuri. Spumele fragile (aici fiind incluse cele mai rigide spume polimerice), în cazul tracțiunii se comportă liniar-elastic până la rupere, deci ruperea prin tracțiune poate fi tratată pe baza principiilor Mecanicii Ruperii Liniar Elastică.

13. S-a realizat o trecere în revistă a principalelor modele micromecanice utilizate pentru determinarea tenacității la rupere. În acest sens s-au studiat mai multe modele micromecanice, printre care: Modelul micromecanic Gibson-Ashby, Modelul micromecanic Choi-Sankar, Modelul micromecanic Choi-Lakes și Modelul micromecanic Green.

14. Capitolul 3 este dedicat în totalitate determinărilor experimentale a caracteristicilor mecanice ale spumelor poliuretanică rigide. Spumele au fost analizate după un program de încercări special stabilit pentru scopul acestei lucrări, (figura 3.1). Având în vedere tipul solicitării și al spumei s-au studiat următoarele aspecte: identificarea tipului de spumă, determinarea caracteristicilor la compresiune în regim static și dinamic, determinarea caracteristicilor mecanice la tracțiune, respectiv determinarea tenacității la rupere atât în regim static cât și în regim dinamic.

15. S-a realizat identificarea tipului de spumă atât printr-o analiza microscopică cât și prin determinarea densității conform Standardelor în vigoare, (figura 3.4). În urma acestor analize s-au identificat spume având 11 densități diferite, (40, 80, 120, 140, 160, 200, 300, 480, 540, 600 și 620 kg/m<sup>3</sup>.), fiecare densitate a spumei prezentând celule cu diferite forme, mărimi, respectiv diferite aranjări.

16. S-au determinat caracteristicile mecanice la compresiune în regim static cât și în regim dinamic, prezentându-se totodată atât o comparație a curbelor tensiune-deformație cât și a parametrilor obținuți în urma prelucrării datelor furnizate de mașinile de încercat (modul de elasticitate, tensiune de curgere, tensiune de platou și densificare). De asemenea, s-a realizat definirea și determinarea experimentală a parametrilor amintiți mai sus.

17. În cadrul încercărilor de compresiune s-a studiat influența densității, vitezei de încărcare, planului de formare, secțiunii transversale și temperaturii pe spume poliuretanic rigide având 5 densități diferite (40, 80, 120, 140 respectiv 200 kg/m<sup>3</sup>).

18. Odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în comportarea mecanică la compresiune statică a materialelor celulare. De exemplu, modulul de elasticitate crește de la valoarea de 4.20 MPa pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, la o valoare de 121.99 MPa pentru o spuma cu densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup>, (Tabelul 3.1, figura 3.11).

19. De asemenea, s-a realizat un studiu al influenței vitezei de încărcare pentru o spumă cu densitatea de 140 kg/m<sup>3</sup> și s-a constatat că viteza de încărcare prezintă o influență scăzută asupra proprietăților la compresiune statică. Totuși, se poate identifica o ușoară creștere a proprietăților mecanice cu creșterea vitezei de încărcare. Dacă se ia din nou exemplul modulului de elasticitate, acesta crește de la valoarea de 18.94 MPa pentru o viteză de încărcare de 1 mm/min, la valoarea de 25.57 MPa pentru o viteză de 20 mm/min, (Tabelul 3.2, figura 3.12).

20. Direcția de încărcare în schimb are o contribuție semnificativă asupra proprietăților mecanice la compresiune, acest lucru punând în evidență aspectul anizotrop al spumei. Pentru aceeași densitate a spumei, în cazul încărcării în plan pentru regiunea de platou se obține o tensiune constantă, iar pentru o încărcare perpendiculară pe planul de formare, regiunea de platou prezintă o ecrusare liniară. În acest caz, tensiunea de curgere crește de la 1.05 MPa la 1.72 MPa, iar tensiunea de platou de la 1.21 MPa la 1.75 MPa, în timp de zona liniar-elastică și densificarea rămân aproximativ la fel, (Tabelul 3.3, figura 3.14).

21. S-a studiat și efectul de scară (influența secțiunii transversale) pentru încercările de compresiune statică, iar în acest scop s-au folosit epruvete care au prezentat aceeași înălțime  $h$  (25 mm), dar cu trei secțiuni transversale diferite  $b_1$  și  $b_2$  (12x12 mm<sup>2</sup>, 25x25 mm<sup>2</sup>, respectiv 50x50 mm<sup>2</sup>). Efectul de scară are o influență relativ mică asupra proprietăților mecanice, (Tabelul 3.4, figura 3.16).

22. În urma efectuării încercărilor de compresiune dinamică s-au determinat aceeași parametri ca și în cazul compresiunii statice. Și în acest caz densitatea are un rol major asupra comportamentului spumelor pe când viteza de încărcare are o influență scăzută. Mici influențe se pot observa în zona densificării, pe când zona liniar-elastică și zona de platou aproape coincid, (Tabelul 3.5, figura 3.22).

23. Ca și în cazul compresiunii statice, planul de formare are o influență semnificativă asupra proprietăților mecanice la compresiune în regim dinamic, acest lucru evidențiind din nou comportamentul anizotrop al spumei, (Tabelul 3.6 și 3.7, figura 3.23).

24. Conform rezultatelor prezentate, s-a constatat, că la temperatura ambiantă, (20°C) și la temperatura de 60°C, comportamentul spumei este aproximativ același, pe când în zona temperaturilor înalte, (100°C), spumele își schimbă semnificativ proprietățile, (Tabelul 3.7, figura 3.24). Trebuie subliniat că în cazul spumelor

poliuretanică temperatura de 100°C poate fi considerată înaltă având în vedere faptul că acestea au temperatura de topire în jurul valorii de 150°C.

25. S-a realizat o comparație între curbele tensiune-deformație pentru solicitarea de compresiune, atât în regim static cât și în regim dinamic, (figura 3.25). Încercările s-au efectuat pentru mai multe densități, la o temperatură de 20°C, iar vitezele de încărcare au fost: 2 mm/min în regim static, respectiv 1.67 m/s în regim dinamic. Comportamentul în regim static cât și dinamic al spumelor poliuretanică rigide este aproape identic pentru condițiile amintite mai sus (diferența majoră fiind doar între planele de formare care a fost discutată mai sus).

26. În cadrul încercărilor experimentale de tracțiune s-au trasat curbele forță-deplasare, (figura 3.34), respectiv tensiune-deformație, (figura 3.35), pentru 3 densități (40, 80 respectiv 200 kg/m<sup>3</sup>). De asemenea, s-a determinat modulul de elasticitate și rezistența la rupere la tracțiune. Se poate observa foarte ușor că densitatea are un rol major asupra rezistenței la rupere, aceasta crescând de la valoarea de 0.44 MPa pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, până la valoarea de 5.28 MPa pentru spuma cu densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup>. Pe de altă parte, densitatea are de asemenea un rol foarte important asupra rigidității spumei. Modulul de elasticitate crește de la valoarea de 14.07 MPa pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, la valoarea de 169.7 MPa pentru spuma cu densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup>, (Tabelul 3.8, figura 3.36).

27. S-a încercat, de asemenea, să se determine coeficientul lui Poisson cu ajutorul extensometrului multiaxial. În afară de faptul că pini extensometrului pătrund în suprafață exterioară a spumei, s-a obținut pentru densitatea de 200 kg/m<sup>3</sup> o valoare medie a coeficientului lui Poisson de 0.2474. Toate probele prezintă o rupere fragilă, iar după cum se poate vedea și în figura 3.37, cele mai multe dintre probe s-au rupt în zona calibrată.

28. S-a determinat tenacitatea la rupere la solicitarea de încovoiere în trei puncte pe epruvete crestate, (figura 3.39), atât în regim static cât și în regim dinamic. În cadrul încercărilor statice s-au utilizat spume poliuretanică rigide având cele 11 densități amintite mai sus. În general spumele au o comportare fragilă la tracțiune, iar prezența fisurilor scade capacitatea portantă a spumelor

29. În urma efectuării încercărilor de încovoiere s-a determinat forța critică cu ajutorul căreia s-a determinat tenacitatea la rupere. La încercările de determinare a tenacității la rupere s-au investigat factorii care influențează comportamentul spumelor poliuretanică rigide: influența densității, influența vitezei de încărcare, influența planului de formare și efectul de scară. Aceste rezultate au fost obținute în urma unei încărcări paralele cu planul de formare la o temperatură de 20°C.

30. Din datele prelucrate se poate observa foarte ușor că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a tenacității la rupere, ceea ce înseamnă că densitatea are un rol major în comportarea la rupere a spumelor. Tenacitatea la rupere crește de la valoarea de 0.03 MPa m<sup>0.5</sup> pentru spuma cu densitatea de 40 kg/m<sup>3</sup>, la valoarea de 1.46 MPa m<sup>0.5</sup> pentru spuma cu densitatea de 620 kg/m<sup>3</sup>. S-a identificat o corelație liniară între tenacitatea la rupere și densitate. Spumele prezintă o rupere fragilă, fără deformații plastice, (Tabelul 3.10, figura 3.46).

31. De asemenea, s-a realizat un studiu al influenței vitezei de încărcare (2, 20, 200 respectiv 400 mm/min) și s-a constatat că viteza de încărcare prezintă o influență scăzută asupra tenacității la rupere în regim static. Totuși, se poate identifica o tendință ușoară de scădere a tenacității cu viteza de încărcare, aceasta scăzând de la valoarea de 0.156 MPa m<sup>0.5</sup> pentru o viteză de încărcare de 2

mm/min, la valoarea de  $0.130 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru o viteză de încărcare de 400 mm/min, (Tabelul 3.11, figura 3.48).

32. S-a studiat influența planului de formare asupra tenacității la rupere pentru o spumă cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ . Spuma studiată nu prezintă o influență semnificativă a planului de formare, tenacitatea la rupere având o valoare de  $0.0279 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru un plan de încărcare paralel cu planul de formare, aceasta scăzând până la  $0.0276 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru un plan perpendicular pe planul de formare, (Tabelul 3.12, figura 3.50).

33. S-a constatat că efectul de scară prezintă influențe majore asupra tenacității la rupere. Toate epruvetele au avut aceeași grosime  $B=20 \text{ mm}$ , variind raportul lungime / lățime care a fost ales de 5:2. Lățimile probelor au fost  $W=5.33, 36.89$  și  $256 \text{ mm}$ , iar tenacitatea la rupere crește odată cu creșterea dimensiunilor probei astfel:  $0.048, 0.093$  respectiv  $0.165 \text{ MPa m}^{0.5}$ , (Tabelul 3.13, figura 3.54). Efectul de scară pentru spume este important pentru extrapolarea datelor din laboratorul de testare la structuri reale foarte mari.

34. Efectul de scară a fost definit ca o dependență între rezistența nominală,  $\sigma_N = P_{\max}/bW$ , funcție de mărimea caracteristică a epruvetei (sau dimensiune)  $W$ . Astfel, rezistența nominală este un parametru legat de forța maximă, având dimensiunea de tensiune. În analiza limitei plastice precum și celei elastice, rezistența limită,  $\sigma_N$  este în general independentă de  $W$ , care este evident din faptul că formularea matematică a acestor teorii nu conține nici o lungime caracteristică de material. Dacă ruperea spumei respectă Mecanica Ruperii Liniar Elastică, (LEFM), efectul de scară reprezentat logaritmice ar trebui să fie o linie dreaptă cu panta descendentă de  $-1/2$ , după cum se poate vedea în figura 3.51. Rezultatele sunt foarte apropiate de această linie, ceea ce înseamnă că la dimensiunile epruvetelor testate (și desigur și pe scară mai mare), materialul se comportă într-un mod aproape fragil.

35. S-a realizat o comparație între rezultatele determinate experimental ale tenacității la rupere în regim static și bibliografie, obținându-se o corelare bună a rezultatelor, (figura 3.55).

36. În urma efectuării încercărilor de încovoiere dinamică s-a determinat forța critică cu ajutorul căreia s-a determinat tenacitatea la rupere. Și în acest caz, după solicitarea de impact probele au prezentat o rupere completă punând în evidență o rupere fragilă fără deformații plastice. Densitatea are o influență majoră asupra tenacității la rupere, aceasta crescând odată cu densitatea de la valoarea de  $0.066 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru spuma cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , până la valoarea de  $0.253 \text{ MPa m}^{0.5}$  pentru spuma cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , (Tabelul 3.14, figura 3.59).

37. De asemenea, s-a trasat diagrama de variație a energiei în timp funcție de densitate, obținându-se o creștere a energiei odată cu creșterea densității de la valoarea de  $0.084 \text{ J}$  pentru spuma cu densitatea de  $40 \text{ kg/m}^3$ , la valoarea de  $0.196 \text{ J}$  pentru spuma cu densitatea de  $140 \text{ kg/m}^3$ , (Tabelul 3.14, figura 3.60).

38. S-a realizat o comparație între tenacitatea la rupere obținută în regim static cu cea obținută în regim dinamic și s-a constatat că aceasta din urmă este de două ori mai mare decât cea statică, ceea ce înseamnă că spuma poliuretanică rigidă se comportă diferit în cele două regimuri, (figura 3.61).

39. La finalul Capitolului 3 s-a realizat o analiză microstructurală a probelor după deformare. Este prezentată o comparație între forma celulelor rezultată în urma încărcării la compresiune într-un plan paralel cu planul de formare, respectiv între forma celulelor rezultată în urma încărcării într-un plan perpendicular pe planul

de formare al spumei, (figura 3.62). Din această analiză se observă o deformare diferită a celulelor pentru cele două direcții de încărcare.

40. De asemenea, este prezentată o comparație microstructurală între forma inițială (înainte de comprimare) și cea finală a celulelor (după solicitarea de compresiune). După solicitarea de compresiune spuma prezintă o distrugere totală a celulelor, (figura 3.63), ceea ce duce la creșterea pronunțată a tensiunii la o deformare aproape constantă (cunoscută sub numele de densificare).

41. S-a realizat atât o prezentare a structurii celulare obținută cu ajutorul microscopului după deformare, cât și a suprafețelor de rupere (inițiale și finale) pentru spumele utilizate în cadrul programului experimental de încovoiere în trei puncte, (figura 3.64). Suprafața de rupere arată faptul că ruperea a fost fragilă, fără deformări plastice.

42. S-au prezentat ecuațiile care au stat la baza determinării curbelor tensiune-deformație la compresiune cu ajutorul a două modele micromecanice (Modelul Gibson-Ashby și Modelul Gibson-Ashby modificat). S-a obținut o fitare foarte bună a curbelor tensiune-deformație estimate cu ajutorul acestor modele comparativ cu cele determinate experimental, (figura 4.23, figura 4.24). Totodată s-au identificat și cele trei zone de pe curba respectivă: zona liniar-elastică, zona de platou și densificarea.

43. S-a realizat o comparație între parametrii obținuți cu ajutorul modelelor micromecanice și rezultatele experimentale la compresiune. Parametrii care au fost luați în considerare sunt reprezentați de: modulul de elasticitate, tensiunea de curgere și tensiunea de platou. Valorile estimate ale parametrilor obținute cu ajutorul modelelor micromecanice sunt validate de rezultatele obținute în urma încercărilor experimentale, (figurile 4.25 – 4.27).

44. Folosind metoda elementelor finite și programul Franc 2D s-a realizat o predicție a tenacității la rupere pentru materialele celulare, atât pentru Modul I cât și pentru Modul II de rupere. Valorile tenacității la rupere obținute pentru o spumă poliuretanică s-au încadrat între  $0.051 \text{ MPa m}^{0.5}$  (pentru densitatea relativă de 0.077) și  $0.402 \text{ MPa m}^{0.5}$  (pentru densitatea relativă de 0.333). Aceeași analiză a fost realizată și pentru alte două tipuri de materiale celulare: PMMA și PVC, valorile obținute ale tenacității la rupere sunt în concordanță cu rezultatele din bibliografia studiată, (Tabelul 3.4, Tabelul 3.5).

45. Pe baza studiului de convergență efectuat s-a estimat valoarea tenacității la rupere atât pentru Modul I cât și pentru Modul II de rupere. Diferențele relative în tenacitatea la rupere între valoarea maximă și cea minimă sunt 14.3 % pentru Modul I și de 7.9 % pentru Modul II. Această diferență scade de la modelele cu 64 de celule la cele cu 100 de celule cu până la 5.4 % pentru Modul I și 3.3 % pentru Modul II, (figura 4.10). Cu toate acestea, în calcule influența este nesemnificativă, utilizându-se în consecință modelul cu 100 de celule pentru evaluarea tenacității la rupere. Tenacitatea la rupere a fost obținută prin încărcări progresive ale modelului cu încărcarea aplicată  $\sigma$  până în momentul în care tensiunea maximă din primul perete nerupt atinge rezistența la rupere a solidului  $\sigma_{fs}$ , (figura 4.14).

46. De asemenea, s-a prezentat influența lungimii fisurii asupra tenacității la rupere pentru o spumă poliuretanică rigidă cu densitatea relativă de 0.105. În acest caz au fost luate în considerare șase lungimi ale fisurii: 1.4; 2.35; 3.3; 4.25; 5.2 și 6.15 mm, păstrând constantă mărimea modelului. Diferențele relative în tenacitatea la rupere au fost 1.3% pentru Modul I și 4.3% pentru Modul II indicând faptul că

tenacitatea la rupere estimată poate fi considerată independentă de lungimea fisurii (figura 4.11), deci o caracteristică de material.

47. Variația tensiunii în primul perete nefisurat din fața fisurii indică faptul că pentru Modul I de rupere apar atât tensiuni de întindere cât și de încovoiere (figura 4.15), iar pentru Modul II de rupere apare o solicitare de încovoiere pură, (figura 4.19).

48. S-a prezentat variația tenacității la rupere funcție de densitatea relativă pentru cele două cazuri studiate: lungime cvasi-constantă a celulei  $l=0.52-0.60$  mm, iar grosimea peretelui celulei,  $t$ , variabilă (0.1, 0.05, și 0.02 mm), respectiv grosime constantă a peretelui celulei  $t=0.05$  mm, iar lungimea celulei,  $l$ , variabilă (0.55, 0.75 și 0.95 mm) - figura 4.16 și figura 4.20.

49. Atât pentru Modul I cât și pentru Modul II de rupere s-au obținut corelații foarte bune între tenacitatea la rupere obținută prin analiză cu elemente finite și tenacitatea la rupere obținută cu ajutorul altor modele micromecanice (figura 4.21, figura 4.22). Această comparație prezintă tenacitatea la rupere normalizată funcție de densitatea relativă.

50. De asemenea, s-a prezentat o comparație între rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I estimate cu ajutorul modelelor micromecanice și rezultatele experimentale din bibliografie, ceea ce înseamnă că valorile estimate sunt validate experimental, (figura 4.28).

51. S-a realizat un studiu al absorbției de energie în materialele celulare privind mecanismele de absorbție și metodele de caracterizare a energiei de absorbție, iar în cele din urmă s-au trasat diagramele de absorbție. S-au trasat curbele energie în timp, (figura 5.7), respectiv energie de absorbție pe unitatea de volum normalizată funcție de tensiunea de vârf normalizată, (figura 5.8), și în acest caz densitatea prezentând un rol major.

52. După cum se poate vedea din figura 5.9 o cantitate foarte mică de energie este absorbită în zona liniar-elastică, deoarece această zonă este relativ mică. Marea parte a energiei este absorbită în zona de platou, deoarece aici are loc deformarea celulelor, acest lucru permițând o absorbție mare a energiei de impact la o încărcare aproape constantă. Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_1$ , generează o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_1=3.054$  MPa. Spuma cu densitatea cea mai mare ( $140 \text{ kg/m}^3$ ), generează de asemenea o tensiune de vârf mare  $(\sigma_p)_3=1.559$  MPa înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_3$ . Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $80 \text{ kg/m}^3$ ), care absoarbe aceeași energie  $W_2$ , ( $W_1=W_2=W_3=W=0.6$  J), generând o tensiune de vârf de valoare mai mică,  $(\sigma_p)_2=0.914$  MPa, (Tabelul 5.1, figura 5.10).

53. De asemenea, s-au trasat curbele energiei de absorbție funcție de tensiunea de vârf și eficienței funcție de tensiune. Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_1$ , prezintă o eficiență mică,  $E_1=0.197$ . Spuma cu densitatea cea mai mare ( $140 \text{ kg/m}^3$ ), prezintă de asemenea o eficiență scăzută,  $E_3=0,386$  înainte de a absorbi cantitatea de energie  $W_3$ . Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $80 \text{ kg/m}^3$ ), care absoarbe aceeași energie  $W_2$ , ( $W_1=W_2=W_3=W=0,6$  J), prezentând o eficiență de valoare mai mare decât precedentele,  $E_2=0.657$ , (Tabelul 5.1, figura 5.14).

54. În penultimul capitol (Capitolul 6), s-a realizat o caracterizare a structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare, (spumă și plută). În acest sens în prima parte a capitolului s-au prezentat domeniile de aplicație ale construcțiilor de

tip sandwich, ecuațiile clasice de determinare a rigidității echivalente la încovoiere și forfecare, iar pe lângă aceste ecuații s-au introdus noi relații de calcul a parametrilor amintiți (ec. 7.19 și ec. 7.20).

55. Principala caracteristică a structurilor de tip sandwich este că sunt ușoare și rigide. S-a constatat că doar rigiditatea singură nu este de ajuns. Grinda sau panoul trebuie să aibă de asemenea și o rezistență bună, acestea trebuind să reziste la încărcări fără a se rupe, iar în acest sens s-a prezentat teoria rezistenței sandwichurilor. Astfel, s-au găsit mai multe moduri de rupere (curgerea și încrețirea fețelor, forfecarea miezului, ruperea legăturilor și indentarea miezului), lucrarea de față studiind doar modurile cele mai frecvent întâlnite.

56. S-a realizat construirea hărților de degradare pentru mai multe tipuri de materiale de tip sandwich având fețe de aluminiu și miez de plută (AL-PLUTA 170), fețe de aluminiu și miez de spumă (AL-PUR 40), fețe din Stratimat și miez de spumă (STR-PUR 40 și STR-PUR 200), fețe din epoxi și miez de spumă (EPX-PUR 200), respectiv fețe din poliester și miez de spumă (POL-PUR 200). Construirea hărților de degradare s-a făcut luând în considerare principalele moduri de rupere (încrețirea fețelor, forfecarea miezului și ruperea feței), diferite grosimi ale fețelor și diferite densități ale miezului, (figurile 6.23 - 6.28).

57. Pentru grinzile amintite mai sus s-au ridicat experimental curbele forță-deplasare, studiindu-se influența tipului de sandwich, (figura 6.12, figura 6.15), influența distanței dintre reazeme, (figura 6.13, figura 6.16) și influența grosimii fețelor, (figura 6.17). S-au determinat atât forța maximă cât și forța critică la rupere, aceasta din urmă fiind definită ca prima deviație pronunțată de la liniaritate din curba forță-deplasare, (Tabelul 6.3, figura 6.14). Există o bună concordanță între mecanismul de rupere prescris de caracteristicile de proiectare ale grinzii și cel obținut în urma încercărilor experimentale.

58. S-au determinat tensiunile normale și tangențiale atât din fețele cât și din miezul grinzii, (Tabelul 6.4). S-a prezentat variația tensiunii tangențiale pentru miez, ( $\tau_c$ ), respectiv fețe, ( $\tau_f$ ), funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru o grindă de tipul AL - PUR 40. Tensiunea tangențială în miez este de aproximativ de două ori mai mare decât cea din fețe. Aceasta scade odată cu creșterea distanței dintre reazeme de la valoarea de 0.072 MPa pentru  $l=70$  mm, până la valoarea de 0.053 MPa pentru  $l=200$  mm, pe când tensiunea din fețe scade de la valoarea de 0.036 MPa pentru  $l=70$  mm, la valoarea de 0.026 MPa pentru  $l=200$  mm (figura 6.18).

59. De asemenea, s-a prezentat variația tensiunii normale pentru miez, ( $\sigma_c$ ), respectiv fețe, ( $\sigma_f$ ), funcție de distanța dintre reazeme,  $l$ , pentru același tip de grindă de tip sandwich amintită mai sus. S-a observat că tensiunea normală,  $\sigma$ , în fețe crește odată cu creșterea distanței dintre reazeme de la valoarea de 6.311 MPa, pentru  $l=70$  mm, până la valoarea de 13.204 MPa pentru  $l=200$  mm, pe când în miez tensiunea normală are o valoare nesemnificativă egală cu 0.001 MPa, (figura 6.19).

60. S-a prezentat atât diagrama tensiunii tangențiale,  $\tau$ , cât și diagrama tensiunii normale,  $\sigma$ , pentru cele șase tipuri de grinzi de tip sandwich studiate. S-a constatat că tensiunea tangențială în miez este de aproximativ de două ori mai mare decât cea în fețe, iar tensiunea normală în fețe este mult mai mare (120.46 MPa pentru un sandwich de tipul POL-PUR 200), decât cea prezentă în miezul grinzii de tip sandwich care prezintă valori aproape nesemnificative, (3.107 MPa pentru același tip de sandwich), (figura 6.20, figura 6.21).



61. S-a realizat o comparație între analiza experimentală și analitică a acestor grinzi atât pe baza ecuațiilor clasice cât și pe baza noilor relații de calcul. Se poate observa foarte ușor că noile relații sunt verificate și în concordanță atât cu rezultatele experimentale cât și cu cele analitice, (figura 6.30, figura 6.31).

## 7.2. Contribuții personale

Principalele contribuții personale obținute în cadrul tezei de doctorat sunt:

1. Elaborarea unei sinteze documentare pe baza celor mai noi cercetări în domeniu cu referire la stadiul actual în analiza comportamentului mecanic al materialelor celulare de tipul spumelor poliuretanică rigide și a materialelor de tip sandwich cu miez de spumă.

2. Determinarea densității spumelor utilizate conform Standardelor în vigoare.

3. Realizarea unor epruvete din spumă poliuretanică de diferite densități prin alegerea concentrației celor două componente, (poliol și poliisocianat).

4. Încercările experimentale efectuate la solicitarea de compresiune statică și dinamică au permis studierea influenței densității, vitezei de încărcare, planului de formare, efectul de scară și influența temperaturii asupra proprietăților mecanice ale spumelor poliuretanică.

5. Pentru solicitarea la tracțiune a spumelor poliuretanică s-a determinat experimental modulul de elasticitate longitudinal, rezistența la rupere cât și o valoare medie a coeficientului lui Poisson de 0.2474.

6. În cadrul solicitării de încovoiere în trei puncte pe epruvete cu creștătură laterală s-a determinat experimental tenacitatea la rupere a 11 tipuri de spume poliuretanică rigide. S-a studiat influența densității, vitezei de încărcare, planului de formare și efectul de scară asupra proprietăților mecanice ale spumelor poliuretanică atât la solicitări statice cât și la solicitări dinamice.

7. Realizarea unor analize microstructurale a spumelor utilizate atât pentru suprafețele inițiale cât și pentru cele de rupere.

8. Determinarea curbelor tensiune-deformație la compresiune a spumelor poliuretanică cu ajutorul modelelor micromecanice.

9. Cu ajutorul programului de analiză cu elemente finite Franc 2D, s-a propus un model micromecanic solid cu elemente finite bidimensionale pentru estimarea tenacității la rupere pentru Modul I, respectiv Modul II de rupere.

10. Folosind programul de analiză cu elemente finite Franc 2D s-a realizat atât un studiu de convergență, cât și un studiu al influenței lungimii fisurii asupra tenacității la rupere.

11. Realizarea unor comparații atât pentru Modul I, cât și pentru Modul II de rupere între rezultatele estimate cu ajutorul modelelor micromecanice și rezultatele experimentale.

12. Realizarea unor calcule analitice pentru proiectarea materialelor compozite de tip sandwich. Aplicarea conceptului de "*diagramă a degradării*" pentru stabilirea modului de rupere în vederea proiectării și optimizării structurilor compozite de tip sandwich.

13. S-au propus două ecuații de estimare a rigidității echivalente la forfecare, respectiv o comparație analitico-experimentală a rezultatelor.

## BIBLIOGRAFIE

- Ableidinger, A. "Some aspects of the fracture behavior of metal foams", Technische Universitat Wien, 2000.
- Ackers, P. Aeronautical Research Council, Farnborough, Hants, U.K., Reports and Memoranda 2015, 1945.
- Anderson, T.L. "Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications", Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- Andrews, E. W., Gioux, G., Onck, P. R., Gibson, L. J. "Size Effects in Ductile Cellular Solids Part II: Experimental Results", *International Journal of Mechanical Science*, 43, pp. 701-713, 2001.
- Andrews, E.V., Moussa, N.A. "Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading", *Int. J. of Imp. Eng.*, 36, pp. 418-425, 2009.
- Allen, H.G. "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels", Pergamon Press, Oxford, 1969.
- Arakere, N.K., Knudsen, E.C., Wells, D., McGill, P., Swanson, G.R. "Determination of mixed-mode stress intensity factors, fracture toughness, and crack turning angle for anisotropic foam material", *International Journal of Solid and Structures*, 45, pp. 4936-4951, 2008.
- Ashby, M.F. "The mechanical properties of cellular solids", *Metallurgical and Materials Transactions*, 14A, pp. 1755-1769, 1983.
- Ashby, M.F. "Materials Selection in Mechanical Design, Second Edition", Butterworth Heinemann, Department of Engineering, Cambridge University, England, 1999.
- Ashby, M.F. "Materials Selection in Mechanical Design, Third Edition", Butterworth Heinemann, Department of Engineering, Cambridge University, England, 2008.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson J.W., Wadley, H.N.G. "Metal foam: A design Guide", Butterworth Heinemann, 2000.
- Ashida, K. "Handbook of Plastic Foams-Thermosetting Foams", Landrock, A.H., Ed., Noyes, Park Ridge, New Jersey, 1994.
- Ashida, K. "Polyurethane and Related Foams. Chemistry and Technology", Edited by Taylor & Francis Group, LLC, 2007
- Ashman, R.B., Rho, J.Y. "Elastic modulus of trabecular bone material", *J. Biomech.*, 21, 177-81, 1988.
- Avalle, M., Belingardi, G., Montanini, R. "Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption", *International J. of Impact Engineering*, 25, pp. 455-472, 2001.

- Avalle, M.,  
Belingardi, G.  
Ibba, A.  
Avalle, M.,  
Belingardi, G.  
Ibba, A.
- Avalle, M.,  
Belingardi, G.  
Ibba, A.  
Backlund, J.,  
Olsson, K.-A.  
Maartman, F.
- Barma, P.,  
Rhodes, M.B.  
Salover, R.  
Bažant, Z.P.  
Planas, J.
- Bažant, Z.P.
- Bažant, Z.P.  
Kazemi, M.T.
- Benning, C.J.
- Bender, R.J.
- Berins, M.L.
- Berlin, A.A.,  
Shuto, F.A.  
Zhitinkina, A.K.
- Bîrsan, M.,  
Sadowski, T.,  
Marşavina, L.,  
**Linul, E.**  
Pietras, D.
- Brakke K.
- Brezny, R.  
Green, D.J.  
Broek, D.
- Buffon, G.L.L.
- Buist, J.M.  
Gudogen, H.  
Buist, J.M.
- "Experimental testing of cellular solids and model parameters identification", In: *Proceedings of the 12 th International Conference on Experimental Mechanics*, Bari, Italy, 2004.
- "Mechanical models of cellular solids: parameters identification from experimental tests", In: Alves M. and Jones, N., editors, *Impact loading of light weight structures, Proceedings of the International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures*, Florianopolis (Brazil): WIT Press, pp. 75-87, 2005.
- "Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests", *International Journal of Impact Engineering*, 34, pp. 3-27, 2007.
- "Computerized Analysis and Design of Sandwich Construction", *Proceedings of First International Conference on Sandwich Construction*, Eds. K.-A. Olsson and R.P. Reichard, EMAS, Solihull, UK, p. 87-105, 1989.
- "Mechanical properties of particulate-filled polyurethane foams", *Journal of Applied Physics*, 49, pp. 4985-4991, 1978.
- "Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials". CRC Press, Boca Raton and London (Sections 9.2 and 9.3), 1998.
- "Scaling of Structural Strength", Hermes-Penton, London, 2002.
- "Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete", *Int. J. of Fract.* 44, 111-131, 1990.
- "Plastic Foams", Vol. 1 and 2, Wiley-Interscience, New York, 1969.
- "Handbook of Foamed Plastics", Lake Publishing, Libertyville, Illinois, 1965.
- "Plastics Engineering Handbook", Society of the Plastics Industry, Inc., 5<sup>th</sup> Edition, Van Nostrand Reinhold, N. Y., 1991.
- "Foams Based on Reactive Oligomers", Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1982.
- "Mechanical behavior of sandwich composite beams made of foams and functionally graded materials", 2011 - în recenzie pentru *Mechanics of Materials*, revistă cotată ISI.
- "The surface evolver", *Exp. Math. Vol. I*, pp. 141-165, 1992.
- "Fracture behavior of open-cell ceramics", *Journal of American Ceramic Society*, 72, pp. 1145-1152, 1989.
- "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986.
- "Histoire naturelle", Paris, Ch. 4, pp. 211. 1753.
- "Advances in Polyurethane Technology", Maclaren & Sos, London, 1968.
- "Developments in Polyurethanes", Elsevier, London and New York, 1978.

- Burman, M. "Fatigue crack initiation and propagation in sandwich structures", Academic dissertation, Department of Aeronautics, Division of Lightweight Structures, Stockholm, Sweden, 1998.
- Cernescu, A.V. "Cercetări privind influența tensiunii medii și a gradului de asimetrie asupra vitezei de propagare a fisurii pentru un uțel carbon", Teza destinată obținerii titlului științific de doctor inginer la Universitatea "Politehnica" din Timisoara in domeniul Inginerie Mecanica, 2009.
- Ciba-Geigy "Aeroweb Honeycomb Sandwich Design", Instruction sheet No. AGC 33a (Part. 2) Bonded Structures Division, Duxford, Cambridge, 1980.
- Chan, K.C., Xie, L.S. "Dependency of Densification Properties on Cell Topology of Metal Foams", *Scripta Materialia*, 48(8), pp. 1147-1152, 2003.
- Chan, R., Nakamura, M. "Mechanical properties of plastics foams", *J. Cell. Plast.*, 5, pp. 112-118, 1969.
- Chen, W., Lu, F., Winfree, N. "High-strain-rate compressive behaviour of a rigid polyurethane foam with various densities", *Exp. Mech.*, 42(1), 2002.
- Chiang, F.P. "Size effect on stress-strain relation of neat polyurethane foam", *Composites, Part B* 39, pp. 42-49, 2008.
- Ding, Y. "Studiul teoretic și experimental de rezistență și deformabilitate a materialelor compozite utilizate în domeniul transporturilor", Teza destinată obținerii titlului științific de doctor inginer la Universitatea "Politehnica" din Timisoara in domeniul Inginerie Mecanica, 2010.
- Chincea, I., Cernescu, A., Marsavina, L., Babeu, T. "Failure of composite sandwich materials loaded in three-point bending", *Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania, Transactions on Mechanics*, 55 (69), pp. 59-63, 2010.
- Choi, K., Kuhn, J.L., Ciarelli, M.J., Goldstein, S.A. "The elastic moduli of human subchondral, trabecular and cortical bone tissue and the size-dependency of cortical bone modulus", *J. Biomech.*, 23, 1103-13, 1990.
- Choi, J. B. "Fracture Toughness of Re-entrant Foam Materials with a Negative Poisson's Ratio: Experiment and Analysis", *Int. J. Fracture*, 80, pp. 73-83, 1996.
- Lakes, R. S. "Fracture Toughness of Carbon Foam", *Journal of Composite Materials*, 37, pp. 2101-2116, 2003.
- Choi, S. Sankar, B.V. "A micromechanical method to predict the fracture toughness of cellular materials", *International Journal of Solids and Structures*, 42, pp. 1797-1817, 2005.
- Christensen, R.M. "Mechanics of low density materials", *J. Mech. Phys. Solids*, 34, 563-78, 1986.
- Christensen, R.M. "A comparison of open cell and closed cell properties for low-density materials", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2, pp. 1299-1307, 2007.
- Constantinescu, D.M., Faur, N., Marsavina, L., Alexandrescu, E. "Refinement on the testing and behaviour of composite materials used in aerospace industry", *CD ROM Proceedings of the "Excellence Research as a way to ERA"*, Ed. Tehnica Bucuresti, 202.1-6, 2007.

- Cousins, R.R. „A theory for the impact behavior of rate-dependent padding materials”, *J. Appl. Polymer Sci.*, 20, pp. 2893-2903, 1976a.
- Cousins, R.R. “Design Guide to the Use of Foams for Crash Padding”, NPL Report DMA 237, London, 1976b.
- Daniel, I.M.,  
Gdoutos, E.E.,  
Wang, K.A. Abbot,  
J.L.  
Danielsson M. “Failure modes of composite sandwich beams”, *Int. J. of Dam. Mech.*, 11 (4), pp. 309-334, 2002.
- “Toughened rigid foam core material for use in sandwich construction”, *Cellular Polymers*, 15, 417-435, 1996.
- Darwin C. “*Origin of Species*”, 6<sup>th</sup> edn, Ch8, p. 99, 1859.
- Daxner, T. “*Finite element modeling of cellular materials*, in Cellular and porous materials in structures and processes”, Eds. Altenbach H. and Ochsner A., Springer, 2010.
- De Hoff, R.T.  
Rhines, F.N.  
Euclid “*Quantitative Microscopy*”, McGraw-Hill, New York, p. 93, 1968.
- “Elements”; first English edition, *The Elements of Geometry of the Most Ancient Philosopher Euclid*, translated and pub. by H. Billingsley London, 1590.
- Ewalds, H.L.  
Wanhill, R.J.H. “*Fracture Mechanics*”, Edward Arnold, Delft, 1989.
- Ferrigo, T.H. “*Rigid Plastic Foams*”, 2<sup>nd</sup> edition, Reinhold, N.Y., 1967.
- Ferro, A.C.  
Fortes, M.A. „A new family of trivalent space-filling parallelhedra”, *Zeitschrift fur Kristallographie*, 173, pp. 41-57, 1985.
- Fleck, N.A. Olurin,  
O.B. Chen, C.,  
Ashby, M.F. “The effect of hole size upon the strength of metallic and polymeric foams”, *J. of the Mech. and Phys. of Sol.* 49, pp. 2015-2030, 2001.
- Fleck, N.A.,  
Qiu, X.M. “The damage tolerance of elastic-brittle, two-dimensional isotropic lattices”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55, pp. 562-588, 2007.
- Fleck, N.A.,  
Deshpande, V.S.  
Ashby, M.F. “Micro-architected materials: past, present and future”, *Proc. R. Soc. Lond.*, A. 466, p. 2495-2516, 2010.
- Fortes, M.A. *J. Mater. Sci.*, 21, 2509, 1986a.
- Fortes, M.A. „Determination of the volume density of vertices in a polycrystal from measurements in planar sections”, *Acta Metall.*, 34, pp. 1617-1624, 1986b.
- Fowlkes, C.W. „Fracture toughness tests of a rigid polyurethane foam”, *Int. J. Fracture*, 10, pp. 99-108, 1974.
- Frisch, K.C. “*Plastic Foams*”, Vol. 1, eds. by Frisch, K.C. and Saunders, J.H., Marcel Dekker, New York, 1976.
- Froud, G.R. “Your sandwich order, Sir?”, *Comp.*, 11 (3), pp. 133-138, 1980.
- Gay, D.,  
Hoa, V.S.,  
Tsai, W.S. “*Composite Materials. Design and applications*”, CRC Press LLC, 2003.
- Gdoutos, E.E.,  
Daniel, I.M.  
Wang, K.-A. “Failure of cellular foams under multiaxial loading”, *Composites: Part A*, 33, pp. 163-176, 2002.

- Gdoutos, E.E.,  
Daniel, I.M.  
Wang, K.-A.  
Gdoutos, E.E.,  
Daniel, I.M.  
Wang, K.-A.  
Gdoutos, K.M.S.  
Gdoutos, E.E.
- Gent, A.N.,  
Rusch, K.C.  
Gent, A.N.  
Rusch, K.C.
- Gent, A.N.  
Thomas, A.G.  
Gent, A.N.,  
Thomas, A.G.
- Gibson, L.J.,  
Easterling, K.E.  
Ashby, M.F.  
Gibson, L.J.,  
Ashby, M.F.  
Gibson L.J.  
Ashby M.F.  
Gibson L.J.  
Ashby M.F.  
Goods, S.H.,  
Neuschwanger, C.L.  
Henderson, C.C.  
Skala, D.M.  
Gordon, G.A.
- Green, D.J.
- Green, D.J.,  
Schierloh, F.L.,  
Perkins, R.D.,  
Babcock, S.G.  
Grenestedt, J.L.
- Gupta, N.,  
Ricci, W.
- Hall, D.J.,  
Robson, B.L.
- "Indentation failure in composite sandwich structures", *Exp. Mech.*, 42 (4), pp. 426-431, 2002.
- "Compression facing wrinkling of composite sandwich structures", *Mech. of Mat.*, 35 (6), pp. 511-522, 2003.
- "Load and Geometry Effect on the Failure of Sandwich Structures", *2005 SEM Annual Conference & Exposition on Exp. I and Applied Mechanics*, 2005.
- „Permeability of open-cell foamed materials“, *J. Cell. Plast.*, 2, pp. 46-51, 1966a.
- „Viscoelastic behavior of open cell foams“, *Rubber Chem. Technol.*, 39, p. 389, 1966b.
- „The deformation of foamed elastic materials“, *J. Appl. Polymer Sci.*, I, pp. 107-113, 1959.
- „Mechanics of foamed elastic materials“, *Rubber Chem. Technol.*, 36, pp. 597-610, 1963.
- "The structure and mechanics of cork", *Proc. R. Soc. Lond.*, A 377, pp. 99-117, 1981.
- „The mechanics of the three dimensional cellular materials“, *Proc. Roy. Soc.*, A382, pp. 43-59, 1982.
- "Cellular solids – Structure and properties – second edition", Pergamon Press Oxford, 1988.
- "Cellular solids – Structure and properties – second edition", Cambridge University Press, 1997.
- "Mechanical properties of CRETE, a polyurethane foam", *J. Appl. Polym. Sci.*, 68, pp. 1045-1055, 1998.
- "Testing and Approval. Impact Strength and Energy Absorption", PIRA, 1974.
- "Fabrication and Mechanical Properties of Lightweight Ceramics Produced by Sintering of Hollow Spheres", *J. of American Ceramic Society*, 68, pp. 403-409, 1985.
- „High-velocity deformation properties of polyurethane foams“, *Exp. Mech.*, March, Vol. 9, pp. 103-109, 1969.
- "Effective elastic behavior of some models for ‚perfect‘ cellular solids", *International journal of Solids and Structures*, 36, pp. 1471-1501, 1999.
- "Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in micro balloon volume fraction and wall thickness", *Materials Science and Engineering A*. 427, pp. 331-342, 2006.
- "A review of the design and materials evaluation programmed for the GRP/foam sandwich composite hull of the RAN mine hunter", *Comp.*, 15 (4), pp. 266-276, 1984.

- Hilyard, N.C. "Mechanics of Cellular Plastics", Applied Science, Braking, 1982.
- Hilyard, N.C.,  
Djiauw, L.K. „Observations on the impact behaviour of polyurethane foams; I. The polymer matrix", *J. Cell. Plast.*, 7, pp. 33-42, 1971.
- Hilyard, N.C.,  
Kanakkanatt, S. „Mechanical damping in liq-uid-filled foams", *J. Cell. Plast.*, 6, pp. 87-90, 1970.
- Hilyard, N.C.,  
Cunningham, A. "Low Density Cellular Plastics", Chapman and Hall, London, 1994.
- Hodgson, V.R. "Human Impact Response: Measurement and Simulation", Ed. King, W.F. and Mertz, H.J., Plenum Press, New York, 1973.
- Hong, C.S.,  
Jeong, K.Y. "Stress intensity factors in anisotropic sandwich plate with a part-through crack under mixed mode deformation", *Eng. Fract. Mech.*, 21 (2), pp. 285-292, 1985.
- Hooke, R. "Micrographia", *The Royal society*, London, pp. 112, 1664.
- Horace Q. "Odes. Book III", Ode 8 line 10.
- Hunag, S.N.,  
Alspaugh, D.W. „Minimum weight sandwich beam desing", *AIAA J.*, 12, 1617, 1974.
- Huang, J.S.,  
Gibson L.J. "Fracture Toughness of Brittle Foams", *Acta Metallurgica et Materialia*, 39, pp. 1627-1636, 1991.
- Huber, A.T.,  
Gibson, L.J. "Anisotropy of foams", *Journal of Material Science*, 23, pp. 3031-80, 1988.
- Iannace, F. ,  
Iannace, S.,  
Caprino, G.,  
Nicolais, L. "Prediction of impact properties of polyolen foams", *Polym. Test.*, 20, pp. 643-647, 2001.
- Irwin, G.R. "Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate", *J. of App. Mech.*, 24, pp. 361-364, 1957.
- Jin H.,  
Lu W.-Y.,  
Hong S.,  
Connelly K. "Fracture behavior of Polyurethane Foams", *Proceedings of the SEM 2007 Annual Conference and Exposition*, Springfield, Massachusetts, paper 200, 2007.
- Jongman, K.,  
Stephen, R. "Design of sandwich structures for concentrated loading", *Comp. Struc.*, 59, pp. 365-373, 2001.
- Kabir, M.E.,  
Saha, M.C.,  
Jeelani, S. "Tensile and fracture behavior of polymer foams", *Mat Sci Eng A429*, pp. 225-235, 2006.
- Kelvin, Lord (Sir  
W. Thimpson) „On the division of space with minimum partial area", *Phil. Mag.*, 24, p. 503, 1887.
- Kiessling G.C. *Modern Packaging*, 35 (3A), 287, 1961.
- Ko, W.L. „Deformations of foamed elastomers", *J. Cell. Plast.*, I, pp. 45-50, 1965.
- Kosten, C.W.,  
Zwikker, A. „Properties of sponge rubber as a material damping vibration and shock", *Rubber Chem. Technol.*, 12, p.105, 1939.
- Kuenzi, E.W. "Minimum weight structural sandwich", US Forest Service Research Note FPL-086. Forest Products Laboratory, Madison WI, 1965.

- Kusner, R.,  
Sullivan, J.M.  
Landrock, A.H.  
Lederman, J.M.  
Lee, C.S.,  
Lee, D.G.  
Lee, W.M.,  
Williams, B.M.  
Lee, S.-J.,  
Wang, J.,  
Sankar, B.V.  
LeMay J.D.,  
Hopper R.W.,  
Hrubesh L.W.,  
Pekala R.W.,  
Lewis, F.T.  
  
Lewis, F.T.  
Lewis, F.T.  
  
Li, K,  
Gao, X-L,  
Roy, A.K.  
Li, Q.M.,  
Magkiriadis, I.  
Harrigan, J.J.  
Lim, T. S.,  
Lee, C.S.,  
Lee, D.G.  
Lin, H.  
  
**Linul, E.,**  
Marşavina, L.,  
Cernescu, A.  
  
**Linul, E.,**  
Marşavina, L.,  
Cernescu, A.  
  
**Linul, E.,**  
Marşavina, L.,  
  
**Linul, E.,**  
Marşavina, L.,
- „Comparing the Weaire-Phelean equal-volume foam to Kelvin’s foam”, *Forma* 11, pp. 233-242, 1996.  
 „Handbook of Plastic Foams”-PLASTEC Report, R52, PLASTEC, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, 1995.  
 „The prediction of the tensile properties of flexible foams”, *J. Appl. Polymer. Sci.*, 15, pp. 693-703, 1971.  
 „Co-cure method for foam sandwich composite manufacture”, *Comp. Struc.*, 66, pp. 231-238, 2004.  
 „Cushioning and load distribution performance of plastic foams”, *J. Cell. Plast.*, 7, p. 72, 1971.  
 „A micromechanical model for predicting the fracture toughness of functionally graded foams”, *International J. of Solids and Structures*, 44, pp. 4053-4067, 2007.  
 „Low Density Microcellular Materials”. *Mat. Res. Soc. Bull.* 15 (12), pp 19-45, 1990.  
 „The typical shape of polyhedral cells in vegetable parenchyma and the restoration of that shape following cell division”, *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, 58, pp. 537-552, 1923.  
*Anat. Rec.*, 38, pp. 341-376, 1928.  
 „A geometric accounting for diverse shape of 14-hedral cells: the transition from dodecahedra to tetakaidecahedra”, *Amer. J. Bot.*, 30, pp. 74-81, 1943.  
 „Micromechanical modeling of three-dimensional open-cell foams using the matrix method for spatial frames”, *Composites: Part B* 36, pag. 249-262, 2005.  
 „Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids”, *Journal of Cellular Plastics*, 42, pp. 371, 2006.  
 „Failure modes of foam core sandwich beams under static and impact loading”, *J. of Comp. Mat.*, 38, pp. 1639-1662, 2004.  
 „The structure and property relationships of commercial foamed plastics”, *Pol. Testing*, 16, pp. 429-443, 1997.  
 „Determinarea tenacitatii la rupere pentru materiale celulare de tipul spumelor poliuretanic”, *Mecanica Ruperii*, Ed. Univ. Petrol-Gaze din Ploiesti si Ed. Univ. „Lucian Blaga” din Sibiu, pp. 15-22, Sibiu, 6-7.11. 2009.  
 „The effect of loading, the direction of deformation and density of rigid polyurethane foams subjected to compression”, *Acta Technica Napocensis*, Series: Applied Mathematics and Mechanics, No. 53, Vol. II, pp. 311-316, 2010.  
 „Experimental determination of compressive properties for rigid polyurethane foams”, *Buletinul Univ. Petrol-Gaze din Ploiesti*, Seria Tehnica, Vol. LXIII, No.1, pp.199-204, 2011a.  
 „Influence of geometrical parameters on fracture toughness for open cell foams”, *19<sup>th</sup> International Conference in Computer Methods in Mechanics*, pp. 313, Warsaw, Poland, 9-12 May 2011b.



- Linul, E.**, Marşavina, L., Cernescu, A. "Assessment of sandwich beams using failure mode maps", *16<sup>th</sup> International Conference on Composite Structures*, Porto, Portugal, June 2011a - în recenzie pentru Composite Structures, revistă cotate ISI.
- Linul, E.**, Marşavina, L., "The effect of loading rate and direction of formation on fracture toughness of rigid polyurethane foams", *Journal of Engineering Studies and Research*, ISSN 2068-7559, 2011c.
- Linul, E.**, Marşavina, L., Sadowski, T., and Kneć, M. "Size Effect on Fracture Toughness of Rigid Polyurethane Foams", Timisoara, 2011e - lucrare acceptată pentru publicare la 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS'11, Timisoara, 2011.
- Linul, E.**, Marşavina, L., "Prediction of Fracture Toughness for Open Cell Polyurethane Foams using Finite - Element Micromechanical Analysis", *Iranian Polymer Journal*, 2011d - lucrare acceptată pentru publicare.
- Lipperman, F., Rzykin, M., Fuchs, M.B. "Fracture toughness of two-dimensional cellular material with periodic microstructure", *Int. J. Fract.*, 2007.
- Lipperman, F., Rzykin, M., Fuchs, M.B. "Nucleation of cracks in two-dimensional periodic cellular materials", *Comput. Mech.*, 39 (2), pp. 127-139, 2007.
- Locket, F.J., Cousins, R.R., MaLauren C. *Plast. Rubber Proc. Appl.*, 1, 25, 1981.
- Maiti, S.K., Gibson, L.J., Ashby, M.F. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 42, 56, 1742.
- Maiti, S.K., Ashby, M.F., Gibson, L.J. „Deformation and energy absorption diagrams for cellular materials”, *Acta Metallurgica*, 32, pp. 1963-1975, 1984a.
- Maiti, S.K., Ashby, M.F., Gibson, L.J. "Fracture Toughness of Brittle Cellular Solids", *Scripta Metallurgica*, 18, pp. 213-218, 1984b.
- Marşavina, L., Cernescu, A., **Linul, E.**, Scurtu, D., Chirita, C. "Experimental determination and comparison of some mechanical properties of commercial polymers", *Revista Materiale Plastice*, Vol 47, nr. 1, pp. 85-89, Bucuresti, Romania, martie 2010.
- Marşavina, L., **Linul, E.** "Fracture toughness of polyurethane foams. Experiments versus micromechanical models", *Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale, 18<sup>th</sup> European Conference on Fracture*, Dresden, Germany, August 30-September, 03 2010.
- Marşavina, L. "Fracture Mechanics of Foams", in "Cellular and porous materials in structures and processes", Eds. Altenbach H. and Ochsner A., Springer, 2010a.
- Marşavina, L., Sadowski T., Constantinescu D.M., Negru, R. "Failure of polyurethane foams under different loading conditions", *Key Engineering Materials*, Vols. 385-387, pp. 205-208, 2008.
- Marşavina, L., Sadowski T., Constantinescu D.M., Negru, R. "Polyurethane foam behavior. Experiments versus modeling", *Key Engineering Materials*, Vols. 399, pp. 123-130, 2009.

- Marşavina, L., Sadowski, T. "Dynamic fracture toughness of polyurethane foam", *Polymer Testing*, 27, pp. 941-944, 2008.
- Matonis, V.A. „Elastic behavior of low density rigid foams in structural applications”, *Soc. Plast. Eng. J.*, p. 1024, September 1964.
- Matuana, L.M., Park, C.B., Balatinecz, J.J. "Cell morphology and property relationships of microcellular foamed PVC/wood-fiber composites", *Polym. Eng. Sci.*, 38(11), pp. 1862-1872, 1998.
- McIntyre, A., Anderson, G.E. „Fracture properties of a rigid PU foam over a range of densities”, *Polymer*, 20, pp. 247-253, 1979.
- Meinecke, E.A., Schwaber, D.M. „Energy absorption in polymeric foams. I. Prediction of impact behavior from instron data for foams with rate-independent modulus”, *J. Appl. Polymer Sci.*, 14, pp. 2239-2248, 1970.
- Meinecke, E.A., Schwaber, D.M., Chiang, R.R. *J. Elastoplast.*, 3, 19, 1971.
- Menges, G., Knipschild, F. „Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams”, *Polymer Eng. Sci.*, 15, p. 623, 1975.
- Melvin, J.W., Roberts, V.L. „Compression of cellular plastics at high strain rates”, *J. Cell. Plast.*, 7, pp. 97-100, 1971.
- Mills, N.J., Zhu, H.X. "The high strain compression of closed-cell polymer foams", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47, 1999, pp. 669-695.
- Mills, N.J., Fitzgerald, C., Gilchrist, A. "Polymer foams for personal protection: cushions, shoes and helmets", *Composites Science and Technology*, 63, pp. 2389-2400, 2003.
- Verdejo, R.
- Mills, N.J., Kang, P. "The effect of water immersion on the fracture toughness of polystyrene bead foams", *J. Cell. Plast.* 30, 196-222, 1994.
- Mills, N.J. Chapter 9 in "Low Density Cellular Plastics, Physical Basis of Behaviour", eds. Hilyard, N.C. and Cunningham, A., Chapman and Hall, London, 1994.
- Mills, N.J. "Polymer Foams Handbook. Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide", Published by Elsevier Ltd., 2007.
- Mirzapour, A., Beheshty, M.H., Vafayan, M. "The response of sandwich panels with rigid polyurethane foam cores under flexural loading", *Iranian Polymer Journal*, 14 (12), pp. 1082-1088, 2005.
- Morgan, J.S., Wood, J.L., Bradt, R.C. „Cell size effect on the strength of foamed glass”, *Mat. Sci. Eng.*, 47, pp. 37-42, 1981.
- Motz, C. "Brucheigenschaften und Bruchzähigkeit von duktilen, metallischen Schäumen", PhD Thesis, Leoben, 2001.
- Murakami, Y. "Stress Intensity Factors Handbook", Pergamon Press, Oxford, 1987.
- Mustin, G.S. "Theory and Practice of Cushion Design", US Government Printing Office, Washington, DC, 1968.
- Nieh, T.G. "Effect of Cell Morphology on the Compressive Properties of Open-cell Aluminum Foams", *Mat. Sci. and Eng.*, A283 (1-2), pp. 105-110, 2000.
- Higashi, K., Wadsworth, J., Oertel, G.H. "Polyurethane Handbook", and distrib. by Macmillan Co., Munich., New York, 1985.

- Olsson, K.-A. "GRP-Sandwich Design and Production in Sweden", *Proceeding of Marine Applications of Composite Materials*, Florida Institute of Technology, Melbourne, Florida, March 24-26, 1986.
- Olsson, K.-A., Maartman, F. "Finite Element Analysis of 40-Container Type 1AA", Department of Aeronautical Structures and Materials, Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm, Sweden, Report 88-2, 1988.
- Olurin, O.B., Fleck, N.A., Ashby, M.F. "Tensile and Compressive Failure of Notched Cellular Foams", *Adv. Eng. Mat.* 3 (1-2), 55-58, 2001.
- Onck, P. R., Andrews, E. W., Gibson, L. J. "Size Effects in Ductile Cellular Solids Part I: Modeling", *International Journal of Mechanical Science*, 43, pp. 681-699, 2001.
- Ostoja-Starzewski, M. "Lattice models in micromechanics", *Appl. Mech. Rev.*, 55, pp. 35-60, 2002.
- Patel, M.R., Finnie, I. "Structural features and mechanical properties of rigid cellular plastics", *J. Mater.*, 5, p. 909, 1970.
- Paul, A., Ramamurty, U. "Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminum Foam", *Mater. Sci. Eng.*, A281(1), pp.1-7, 2000.
- Pflug J., Vangrimde B. "New Sandwich Material Concepts-Continuously Produced Honeycomb Cores" *COMPOSIT Workshop on New Material Concepts for Composite Transportation Structures*, Leuven, Belgium, 2003.
- Phillips, P.J., Waterman, N.R. "Polymer Eng. Sci.", 4, 67, 1974.
- Plateau J.A.F. "Statique Expérimentale et Technique des Liquides Soumis aux Seules Force Moléculaires". Gauthier-villars, Paris, 1873.
- Pliny C. "Natural History", Volume 16, section 34, AD 77.
- Ramsteiner, F., Fell, N., Forster S. "Testing the deformation behavior of polymer foams", *Polymer Testing*, 20, pp. 661-670, 2001.
- Ren, X.J., V.V. Silberschmidt, Ridha, M. "Numerical modeling of low-density cellular materials", *Computational Material Science*, 43, pp. 65-74, 2008.
- "Mechanical and failure properties of rigid polyurethane foam under tension", A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, Department on Mechanical Engineering, National University of Singapore, 2007.
- Rivier, N. *Phil. Mag.*, Vol. B47, pp. L45-L49, 1983.
- Rivier, N. *Phil. Mag.*, B.52, 795, 1985.
- Rivier, N. *Physica*, D 23, 129-37, 1986.
- Rho, J.Y., Ashman, R.B., Turner, C.H. "Young's modulus of trabecular and cortical bone material: Ultrasonic and microtensile measurements", *J. Biomech*, 23, 111-19, 1993.
- Robert, P.L., Weichuan, L. "Face sheet wrinkling in sandwich structures", National Aeronautics and Space Administration, Virginia, 1999.
- Uy, M. *Acta Cryst.*, A 42, 282, 1986.
- Rosa, M.E., Fortes, M.A.

- Rusch, K.C. "Load-compression behavior of flexible foams", *J. Appl. Polym. Sci.*, 13, pp. 2297-2311, 1969.
- Rusch, K.C. "Energy-absorbing characteristics of foamed polymers", *J. Appl. Polym. Sci.*, 14, pp. 1133-1147, 1969.
- Rusch, K.C. "Load-compression behavior of brittle foams", *Journal of Applied Polymer Science*, 14, pp. 1263-1273, 1970,.
- Rusch, K.C. „Impact energy absorption by foamed polymers”, *J. Cell. Plast.*, Vol. 7 (2), pp. 78-83, March/April 1971.
- Ryan, S.D.,  
Williams, J.L. "Tensile testing of rodlike trabeculae excised from bovine femoral bone", *J. Biomech.*, 22, 351-355, 1989.
- Saint-Michel,F.  
Chazeau, L.,  
Cavaille, J.-Y. "Mechanical properties of high density polyurethane foams: II. Effect of the filler size", *Composites Science and Technology*, 66, pp. 2709-2718, 2006.
- Saint-Michel,F.  
Chazeau, L.,  
Cavaille, J.-Y.  
Chabert E. "Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. Effect of the density", *Composites Science and Technology*, 66, pp. 2700-2708, 2006.
- Sarzynski, M.D. "Carbon foam characterization: Sandwich flexure, tensile and shear response", A Thesis Submitted to Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2003.
- Saunders, J.H.,  
Hansen, R.H. "Plastic Foams", Vol. 1, eds. Frisch, K.C. and Saunders, J.H., Marcel Dekker, New York, 1972.
- Saunders, J.H.,  
Frisch, K.C. "Polyurethanes", wiley-Interscience, Part I, 1962, Part II, 1964, reprinted Krieger, Malabor, Florida, 1983.
- Schwaber, D.M. *Polymer-Plast. Technolog. Eng.*, 2, 231, 1973.
- Schwaber, D.M.  
Meinecke, E.A. „Energy absorption in polymeric foams. II. Prediction of impact behavior from instron data for foams with rate-dependent modulus", *J. Appl. Polymer Sci.*, 15, pp. 2381-2393, 1971.
- Scudamore,R.J.  
Cantwell, W.J. "The effect of moisture and loading rate on the interfacial fracture properties of sandwich structures", *Pol. Comp.*, 23, 2002, pp. 406-417.
- Sherwood, J.A.  
Frost, C.C. "Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading", *Polym. Eng. Sci.*, 32 (16), pp. 1138-1146, 1992.
- Shutov, F.A. "Integral/Structural Polymer Foams", eds. Henrici-Oliv, G. and Oliv, S., Springer, Berlin, 1985.
- Silva, S.P.,  
Sabino, M.A.,  
Fernandes,E.M.  
Correlo, V.M.,  
Boesel, L.F.  
Reis, R.L. "Cork: properties, capabilities and applications", *Int. Mat. Rev.*, 50 (6), pp. 345-365, 2005.
- Sinha, S.C.,  
Mitchell, J.O.,  
Lim, G.G.,  
Chou, C.C. "Constitutive modeling of energy absorbing foams", SAE Paper No. 940880, 1994.
- Skochdopole,  
R.E,Rubens,L.C. „Physical property modifications of low-density polyethylene foams", *J. Cell. Plastics*, I, pp. 91-96, 1965.

- Smith, C.S. in "Metal Interfaces", Ed. C. Herring. American Society of Metals, New York, 1952, pp. 108.
- Steeves, C.A., Fleck, N.A. "Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: Analytical models and minimum weight design", *Int. J. of Mech. Sci.*, 46 (4), p. 461-583, 2004.
- Steeves, C.A., Fleck, N.A. "Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: Experimental investigation and numerical modeling", *Int. J. of Mech. Sci.*, 46 (4), pp. 585-608, 2004.
- Suh K.W., R.E. Skochdopole "Encyclopedia of Chemical Technology", 3<sup>rd</sup> edn. ed. Kirk-Othmer. Vol. II. ,1980 p. 82.
- Suh K.W., Webb, D.D. "Cellular materials", in Encyclopedia of Polymer Science, vol. 3, 2nd edn. Wiley, New York, p. 82, 1985.
- Tan, P.J., Harrigan, J.J., Reid, S.R. "Inertia Effects in Uniaxial Dynamic Compression of a Closed Cell Aluminum Alloy Foam", *Mat. Sci. and Tech.*, 18(5), pp. 480-488, 2002.
- Tan, P.J., Reid, S.R., Harrigan, J.J. "Dynamic compressive strength properties of aluminum foams, Part I-experimental data and observations", *J. Mech. Phys. Solids*, 53, pp. 2174-2205, 2005.
- Li, S. "Theory of Elasticity", 3<sup>rd</sup> edn. McGraw-Hill, New York, 1970.
- Timoshenko, S.P. Goodier, J.N. "On Growth and Foam", Abridged edition, ed. J.T. Bonner, Cambridge University Press, Cambridge, 1961.
- Thompson D.W. "Theoretical and experimental investigation of local load bending effects in sandwich plates", *Comp. Struc.*, 30, pp. 85-101, 1995.
- Thomsen, O.T. *Met. Trans.*, 6A, pp. 1253-1263, 1975a.
- Thornton, P.H., Magee, C.L. *Met. Trans.*, 6A, pp. 1801-1807, 1975b.
- Thornton, P.H., Magee, C.L. *J. Cell. Plast.*, 3, 405, 1967.
- Traeger, R.K. "Failure mode maps and minimum weight design for structural sandwich beams with rigid foam cores", Diploma in Civ. Eng., Univ. of Patras, Greece, 1985.
- Triantafillou, T.C. "Failure mode maps for foam core sandwich beams", *Mat. Sci. Eng.*, 95, pp. 37-53, 1987a.
- Gibson, L.J. "Minimum weight of foam core sandwich panels for a given strength", *Mat. Sci. Eng.*, 95, pp. 55-62, 1987b.
- Triantafillou, T.C. *Materials and Structures*, 64-69, 1989.
- Gibson, L.J. "Plastic deformation modes in rigid polyurethane foam under static loading", *International Journal of Solids and Structures*, 38, pp. 9267-9279, 2001.
- Tu, Z.H., Shim, V.P.W. "Least weight of a sandwich panel In R.R". Craig (ed.), *Proc. ASCE, Engineering Mechanics Division, 3rd Speciality Conf.*, University of Texas at Austin, 17-19 September, New York, pp. 41-44, 1979.
- Ueng, C.E.S. "Characterization of deformation bands in the compression of cellular materials", *J. Mater. Sci. Lett.*, 12, 1408-10, 1993.
- Liu, T.L. Vaz, M.F. Fortes, M.A.

- Viana, G. M.  
Carlsson, L. A. "Mechanical Properties and Fracture Characterization of Cross-Linked PVC Foams", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 4, pp. 91-113, 2002.
- Warner, M.  
Edwards, S.F. *Europhys. Lett.*, 5, 623-628, 1988.
- Warren, W.E.  
Kraynik, A.M. "The linear elastic properties of open-cell foams", *J. Appl. Mech.*, 55, 341-346, 1988.
- Warren, W.E.  
Kraynik, A.M. "The nonlinear elastic behavior of open-cell foams", *J. Appl. Mech.*, 58, 376-81, 1991.
- Weaire, D.  
Phelan, R.  
Weaire, D. "A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces". *Phil. Mag. Lett.* 69, 107-10, 1994.  
in "Topological Disorder in Condensed Matter", edited by T. Ninomiya and F. Yonezawa, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- Weaire, D.  
Fortes, M.A. "Stress and strain in liquid and solid foams", *Adv. Phys.*, 43, pp. 685-738, 1994.
- Weaire, D.  
Rivier, N.  
Weddle, B.C. *Contemp. Phys.*, 25, 59, 1984.
- Wei, B.S. "Engineering Guide to Structural Foams", Technomic Publishing Co., Westport, Conn, 1976.
- Wennerstrom, H.  
Backlund, J.  
Olsson, K.-A. "Thermoelastic stress analysis techniques for mixed mode fracture and stochastic fatigue of composite materials", Georgia Institute of Technology, 2008.
- Westergaard, H.M. "Finite Element Analysis of a Self-Supported Refrigerated Truck Structure of Sandwich Construction", Department of Aeronautical Structures and Materials, Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm, Sweden, Report 87-17, 1987.
- Wilhemsson, H. "Bearing pressures and cracks", *J. Appl. Mech.*, pp. A49-A53, 1939.
- Williams, M.L. "Development of the Tele-X Antenna Main Reflector", *Proceedings of First International Conference on Sandwich Construction*, Eds., K-A, Olsson and Reichard, R.P., Solihull, UK, pp. 555-569, 1989.
- Witse, M.,  
Johnson, K.L.  
Ashby, M.F. "On the stress distribution at the base of a stationary crack", *Trans. ASME J. Appl. Mech.*, 24, pp. 109-114, 1957.
- Wittrick, W.H. *Int. J. Mech. Sci.*, 17, 457, 1975.
- Wiydia, T.  
Macosko, C.W. UK Aeronautical Research Council, Farnborough, Hants, U.K., Reports and Memoranda 2016, 1945.
- Woolam, W.W. "Nanoclay-Modified Rigid Polyurethane Foams", *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. 44, pp. 897-908, 2005.
- Woods, G. *J. Cell. Plast.*, 4, 79, 1968.
- Wyman J. "Flexible Polyurethane Foams", Applied Science, London & Englewood, New Jersey, 1982.
- Yoshii, A. *Proc. Amer. Acad. And Sci.*, 7, 68, 1865.
- Zaubrecher, K.  
Barth, H. "Optimum design of advanced sandwich composite using foam core", *Adv. Comp. Mat.*, 2, pp. 289-305, 1992.  
DRP 936, 113; Japanese Patent Publication No. Sho-33-8094, 1958 (to I.G. Farbenindustrie A.G.), Dec. 15, 1942.

- Zdenek, P., Bažant, Z.P., Yong, Z., Goangseup, Z., Isaac, M.D., Zenkert, D. "Size effect and asymptotic matching analysis of fracture of closed-cell polymeric foam", *Int. J. of Sol. and Struc.* 40, 7197–7217, 2003.
- Zenkert, D. "PVC sandwich core materials: fracture behavior under mode II and mixed mode loading", *Mat. Sci. and Eng.* 108, 233–240, 1989.
- Zenkert, D., Bäcklund, J., Zenkert, D. "PVC sandwich core materials: mode I fracture toughness", *Comp. Sci. and Tech.* 34, 225–242, 1989.
- Zenkert, D., Hallstrom, S., Shipsha, A., Zhang, J., Ashby, M.F. "An introduction to Sandwich Construction", EMASS, Solihull, UK, 1995.
- Zenkert, D., Hallstrom, S., Shipsha, A., Zhang, J., Ashby, M.F. "Design aspects of marine structures", Maryland University, pp. 28-32, 1999.
- Zhang, J., Ashby, M.F. CPGS Thesis, Engineering Department, Cambridge, UK, 1988.
- Zhang, J., Lin, Z., Wong, A., Kikuchi, N., Li, V.C., Yee, A.F. "Constitutive modeling and material characterization of polymeric foams", *Trans. ASME*, 119, pp. 284-291, 1997.
- Zhang, J., Kikuchi, N., Li, V.C., Yee, A.F., Nusholtz, G.S. "Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading", *Int. J. Impact. Eng.*, 21, pp. 369-386, 1998.
- Zhu, H.X., Knott, J.F., Mills, N.J. "Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45, pp. 319-325, 1997.
- Zhu, H.X., Mills, N.J., Knott, J.F. "Analysis of the high strain compression of open-cell foams", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45, pp. 1875-1904, 1997.
- Zwissler, J.G., Adams, M.A. in "Fracture Mechanics of Ceramics", vol. 6, (ed. Brandt, R.C.), Plenum Press, New York, pp. 211, 1983.
- ASTM C393-00 Standard Test Methods for Flexural Properties of Sandwich Constructions.
- ASTM D 1621-00 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics.
- ASTM D 1622-03 Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics.
- ASTM D 1622-03 Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics.
- ASTM D5045-99 Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic materials
- EN ISO 179-1 Plastics – Determination of Charpy impact properties. Part 1: Non -instrumented impact test, 1999.
- EN ISO 179-2 Plastics – Determination of Charpy impact properties. Part 2: Instrumented impact test, 2000.

## ANEXE

### A.I. Rezultatele încercărilor experimentale de compresiune statică

Tabelul A.1. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de densitate

Densitate [kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
	h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	12.9	12.8	12.6	(3)	5.50	0.40	0.41	65.23
	12.8	12.9	12.7		3.95	0.39	0.38	65.82
	12.9	12.6	12.6		3.33	0.36	0.37	65.66
	12.7	12.8	12.7		4.15	0.37	0.39	65.39
	12.6	12.8	12.7		4.05	0.37	0.41	65.54
80	15.0	15.0	14.8	(3)	8.30	0.47	0.50	54.78
	15.2	14.8	14.8		7.47	0.49	0.52	54.10
	15.0	15.0	14.8		8.05	0.49	0.51	54.89
	15.1	14.8	14.9		8.15	0.47	0.52	54.60
	15.1	14.9	14.9		7.55	0.48	0.51	54.46
120	15.2	15.2	15.0	(3)	18.52	0.92	0.94	54.46
	15.6	15.6	15.4		18.25	0.88	0.95	54.28
	15.6	15.0	15.0		18.30	0.89	0.93	54.34
	15.4	15.3	15.3		18.42	0.88	0.92	54.15
	15.3	15.3	15.4		18.35	0.88	0.92	54.30
140	14.0	12.0	12.1	(3)	34.05	1.04	1.21	54.55
	14.1	12.1	12.0		35.02	1.05	1.23	54.62
	13.9	12.1	12.2		33.65	1.04	1.19	54.28
	13.8	12.0	11.8		33.80	1.05	1.18	54.35
	14.3	12.1	12.1		34.02	1.06	1.22	54.48
200	11.8	11.6	11.6	(3)	118.79	4.03	3.95	55.65
	11.6	11.8	11.2		126.92	4.12	3.79	55.88
	11.6	11.6	11.8		122.18	4.09	3.85	55.84
	12.0	11.8	12.0		117.23	4.22	3.82	55.82
	11.8	11.8	12.0		124.85	4.25	3.88	55.56



Tabelul A.2. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de viteza de încărcare

Nr. probă	Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Viteza de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
1	140	13.2	13.6	13.6	1	18.95	1.01	1.12	47.30
2		13.2	13.6	13.6		19.62	1.15	1.31	53.68
3		13.4	13.6	13.6		17.66	1.02	1.13	52.65
4		13.4	13.8	13.8		18.88	1.07	1.10	48.26
5		13.2	13.8	13.8		19.59	0.82	1.12	51.68
6		13.6	13.6	13.6	5	22.32	1.08	1.22	52.77
7		13.6	13.6	13.8		22.02	1.03	1.15	53.88
8		13.4	13.6	13.8		21.12	1.11	1.24	51.62
9		13.4	13.6	13.6		21.45	1.05	1.23	50.32
10		13.8	13.8	13.4		21.43	1.09	1.24	52.27
11		13.2	13.4	13.6	10	22.86	1.11	1.30	50.79
12		13.2	13.4	13.6		22.59	1.09	1.18	49.85
13		13.2	13.8	13.8		22.02	1.24	1.32	50.92
14		13.6	13.6	13.8		21.79	1.23	1.36	51.37
15		13.2	13.4	13.4		23.12	1.20	1.32	49.86
16		13.4	13.2	13.6	20	24.37	1.10	1.27	52.62
17		13.2	13.2	13.6		25.48	1.18	1.40	55.25
18		13.8	13.2	13.4		25.98	1.20	1.34	53.84
19		13.2	13.8	13.6		27.02	1.20	1.38	52.95
20		13.2	13.2	13.0		24.96	1.42	1.62	54.67

Tabelul A.3. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică în funcție de planul de formare

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
	h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
140	13.8	13.8	13.8	(2)	36.89	1.69	1.79	54.36
	13.8	14.0	14.0		35.69	1.71	1.73	54.57
	13.8	13.8	14.0		36.05	1.76	1.75	54.38
	13.2	13.2	13.2		35.57	1.73	1.73	54.45
	13.4	13.4	13.4		36.72	1.69	1.73	54.35

Tabelul A.4. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune statică funcție de secțiunea transversală

Nr. probă	Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor			Secțiunea transversală	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
1	40	25.0	12.2	12.2	12X12	4.95	0.21	0.22	53.95
2		25.0	12.4	12.4		4.87	0.25	0.26	53.78
3		25.2	12.2	12.2		4.92	0.22	0.23	53.72
4		25.0	12.2	12.2		4.81	0.23	0.24	53.77
5		25.4	12.4	11.6		5.01	0.22	0.23	53.89
6		25.2	25.2	25.4	25X25	5.16	0.18	0.19	53.61
7		25.6	25.2	25.4		5.20	0.23	0.23	53.85
8		25.2	25.2	25.4		5.18	0.17	0.19	53.62
9		25.0	25.0	25.0		5.17	0.18	0.19	53.61
10		25.2	25.2	25.4		5.15	0.22	0.24	53.72
11		24.8	49.8	50.0	50X50	5.36	0.18	0.20	53.58
12		25.0	50.0	50.0		5.32	0.17	0.19	53.69
13		25.4	50.0	49.8		5.35	0.15	0.17	53.67
14		25.2	50.2	50.2		5.29	0.14	0.15	53.63
15		24.6	50.0	50.0		5.30	0.18	0.20	53.58

## A.II. Rezultatele încercărilor experimentale de compresiune dinamică

Tabelul A.5. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de densitate și direcția de încărcare – direcția (2), T= 20°C (1)

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Nr. probă	Dimensiunile probelor			Viteza de încărcare [m/s]	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	31	15.37	15.32	15.60	0.62	3.87	0.394	0.394	65.23
	32	15.07	14.96	15.36		3.45	0.389	0.390	66.85
	33	14.95	15.76	15.72		4.12	0.391	0.391	66.12
	34	14.49	14.83	14.88		4.05	0.385	0.388	65.89
	35	15.74	14.70	19.85		3.95	0.388	0.388	66.02
	36	15.73	15.87	15.56	0.78	4.58	0.376	0.380	62.58
	37	15.00	14.63	15.13		3.68	0.369	0.372	62.12
	38	15.48	15.46	15.74		3.96	0.370	0.376	63.98
	39	15.60	15.61	15.86		4.08	0.371	0.371	63.05
	40	15.52	15.98	15.43		4.32	0.362	0.368	62.55
	26	14.88	14.91	15.20	0.94	4.56	0.366	0.367	64.23
	27	14.70	14.70	14.45		4.88	0.375	0.379	64.89
	28	15.81	15.40	15.70		4.21	0.369	0.375	65.44
	29	15.67	14.63	15.39		4.17	0.379	0.386	65.03
30	15.02	15.77	15.22	4.66		0.380	0.384	64.87	
80	26	14.13	13.13	13.52	0.78	5.02	0.500	0.479	58.91
	27	13.99	14.04	13.51		6.45	0.498	0.488	58.86
	28	14.66	14.03	14.22		5.84	0.501	0.492	60.02
	29	14.85	14.95	14.94		4.87	0.492	0.480	59.83
	30	14.24	14.94	14.62		4.67	0.481	0.481	60.91
	36	14.13	14.03	14.40	1.09	6.27	0.396	0.446	53.21
	37	13.88	14.70	14.65		5.82	0.442	0.442	54.74
	38	14.42	14.82	14.81		6.93	0.402	0.396	54.29
	39	14.34	15.36	15.03		7.02	0.435	0.428	53.89
	40	14.88	14.90	14.97		5.95	0.408	0.408	53.75
	31	14.17	14.42	14.20	1.28	5.89	0.436	0.431	59.27
	32	15.03	14.77	14.85		5.93	0.429	0.426	58.95
	33	14.59	14.48	14.76		6.14	0.425	0.412	58.65
	34	14.35	14.00	14.23		6.27	0.402	0.457	57.90
	35	13.60	14.03	14.05		5.67	0.431	0.402	59.90

Tabelul A.6. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de densitate și direcția de încărcare – direcția (2), T= 20°C (2)

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Nr. probă	Dimensiunile probelor			Viteza de încărcare [m/s]	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
120	36	12.96	13.48	13.56	1.28	34.52	1.498	1.488	58.28
	37	13.67	13.90	14.06		33.95	1.509	1.462	58.95
	38	13.79	13.71	13.71		36.77	1.562	1.456	58.46
	39	13.80	13.53	13.97		31.88	1.555	1.502	59.27
	40	13.89	13.99	13.96		32.39	1.542	1.485	59.06
	31	13.76	13.77	13.90	1.67	30.29	1.708	1.433	54.86
	32	13.82	13.30	13.73		32.31	1.738	1.461	53.41
	33	13.83	13.49	13.81		27.41	1.693	1.450	53.38
	34	13.89	13.72	13.74		34.32	1.740	1.529	54.38
	35	13.97	13.76	13.96		32.17	1.712	1.495	54.62
	26	13.25	13.55	13.24	1.98	32.62	1.773	1.581	56.48
	27	13.75	13.02	13.80		30.58	1.721	1.602	58.45
	28	13.82	13.80	13.94		31.26	1.709	1.593	57.62
	29	13.74	13.86	13.63		33.45	1.715	1.599	56.67
30	13.90	13.71	13.89	32.89		1.746	1.608	57.46	
140	26	14.00	14.17	14.06	0.94	30.55	1.655	1.579	56.35
	27	14.08	14.12	14.08		34.55	1.759	1.609	57.32
	28	13.80	13.99	13.90		34.11	1.798	1.618	57.02
	29	13.92	13.96	13.80		32.45	1.702	1.642	56.76
	30	14.07	14.09	14.05		33.85	1.698	1.635	56.95
	36	14.17	14.22	14.16	1.28	40.54	1.883	1.760	58.40
	37	14.06	14.09	14.09		37.99	1.859	1.708	56.82
	38	14.20	14.37	14.30		40.93	1.796	1.675	57.85
	39	14.40	14.50	14.38		38.75	1.826	1.692	57.92
	40	14.58	14.59	14.55		38.95	1.802	1.701	56.99
	31	14.10	14.08	14.11	1.67	37.82	1.861	1.559	57.28
	32	14.56	14.59	14.56		31.91	1.809	1.550	56.01
	33	14.40	14.40	14.39		32.45	1.808	1.587	57.33
	34	14.19	14.28	14.17		33.95	1.875	1.505	57.10
	35	14.34	14.34	14.35		31.23	1.868	1.553	57.88

Tabelul A.7. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de planul de formare – direcția (3), T= 20°C (1)

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Nr. probă	Dimensiunile probelor			Viteza de încărcare [m/s]	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]	
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]						
40	6	14.92	14.88	15.13	0.62	4.12	0.385	0.385	66.23	
	7	15.51	15.40	15.56		4.52	0.388	0.391	66.89	
	8	15.85	15.81	15.68		4.95	0.394	0.398	67.02	
	9	15.86	15.40	15.95		4.31	0.392	0.395	67.15	
	10	15.27	15.43	15.40		4.57	0.379	0.381	66.56	
	11	15.62	15.28	15.49	0.78	3.98	0.377	0.380	65.86	
	12	15.67	15.70	15.48		3.89	0.381	0.383	65.92	
	13	15.96	15.33	15.62		4.02	0.386	0.386	66.76	
	14	15.74	15.51	15.46		4.15	0.375	0.377	66.32	
	15	15.77	15.01	15.64		4.17	0.372	0.379	65.48	
	1	1	15.27	15.91	15.80	0.94	4.23	0.362	0.372	65.23
		2	15.35	15.26	15.64		4.56	0.365	0.365	65.81
		3	15.86	15.40	15.61		4.84	0.359	0.366	64.68
		4	15.83	15.82	15.77		4.29	0.368	0.370	64.89
		5	15.61	15.86	15.84		4.55	0.371	0.371	65.02
80	1	14.16	14.76	14.12	0.78	8.29	0.524	0.523	62.59	
	2	13.97	13.90	14.41		7.11	0.549	0.549	63.26	
	3	13.23	14.65	14.80		7.63	0.555	0.550	63.45	
	4	15.02	15.00	14.82		7.56	0.546	0.542	62.89	
	5	14.82	14.65	14.86		8.12	0.519	0.516	62.67	
	11	14.98	14.87	14.02	1.09	7.47	0.527	0.503	57.86	
	12	14.62	14.14	14.67		8.91	0.578	0.554	56.86	
	13	14.86	14.91	14.92		9.02	0.534	0.527	56.91	
	14	14.72	14.21	13.61		8.56	0.556	0.549	56.37	
	15	14.81	14.22	13.49		8.09	0.538	0.513	57.23	
	6	6	14.26	14.54	14.32	1.28	8.77	0.480	0.510	54.63
		7	14.86	14.63	13.98		8.48	0.464	0.489	55.01
		8	14.52	14.14	14.55		8.25	0.468	0.479	55.23
		9	14.86	15.20	14.61		7.95	0.479	0.482	54.73
		10	13.63	13.43	12.59		8.65	0.471	0.482	55.48

Tabelul A.8. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de planul de formare – direcția (3), T= 20°C (2)

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Nr. probă	Dimensiunile probelor			Viteza de încărcare [m/s]	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
120	11	13.91	14.00	14.00	1.28	25.00	1.166	1.166	59.43
	12	13.81	13.73	13.82		24.42	1.127	1.179	60.06
	13	13.85	13.79	13.80		23.85	1.145	1.162	60.12
	14	13.65	13.81	13.09		24.67	1.158	1.161	59.48
	15	13.49	13.80	13.90		24.92	1.162	1.162	59.88
	6	14.00	14.07	14.00	1.67	26.43	1.095	1.046	56.91
	7	14.31	14.31	14.28		26.85	1.112	1.098	57.86
	8	14.36	14.31	14.25		25.11	1.167	1.045	56.07
	9	14.39	14.13	14.10		28.84	1.170	1.140	57.16
	10	14.05	13.82	14.09		27.68	1.045	1.020	58.47
	1	14.37	14.35	14.39	1.98	26.24	1.091	1.163	58.64
	2	14.40	14.37	14.37		27.08	1.101	1.158	57.93
	3	14.36	14.37	14.38		26.95	1.112	1.146	57.65
	4	14.34	14.36	14.30		27.02	1.089	1.149	58.22
	5	14.36	14.35	14.35		27.15	1.128	1.153	58.03
140	1	12.74	12.83	12.76	0.94	22.25	1.002	1.024	57.56
	2	13.15	13.00	13.00		22.63	1.005	1.005	56.23
	3	13.38	13.26	13.20		21.24	0.942	1.056	56.98
	4	13.53	13.31	13.47		23.73	0.948	1.034	57.02
	5	13.55	13.33	13.40		21.99	1.006	1.090	57.12
	11	13.19	13.15	13.07	1.28	24.19	1.111	1.201	57.12
	12	13.17	13.17	13.13		23.98	1.132	1.118	56.95
	13	13.13	13.11	13.12		25.58	1.130	1.246	56.56
	14	13.05	13.06	13.03		25.69	0.996	1.229	56.88
	15	13.28	13.28	13.28		24.65	1.113	1.221	57.02
	6	12.42	13.34	13.41	1.67	22.06	1.005	0.921	52.62
	7	13.09	13.03	13.09		25.23	1.021	1.001	53.46
	8	13.13	13.09	13.10		29.55	1.107	1.043	52.25
	9	13.06	13.06	13.05		27.27	1.026	1.039	53.19
	10	13.90	12.93	12.84		23.97	1.087	1.045	52.95

Tabelul 3.9. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de temperatură,  $T = 60^{\circ}\text{C}$ 

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Nr. probă	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	41	15.03	15.18	14.97	(2)	4.05	0.375	0.375	64.53
	42	15.55	15.86	15.15		4.12	0.378	0.380	65.23
	43	15.46	15.67	15.33		4.58	0.369	0.369	65.78
	44	15.13	15.59	14.91		4.66	0.366	0.371	65.89
	45	15.20	15.46	14.92		4.87	0.361	0.366	65.32
	16	14.96	15.38	14.45	(3)	4.12	0.372	0.377	64.21
	17	15.78	15.77	15.74		3.98	0.375	0.376	64.86
	18	15.83	15.68	15.86		3.87	0.368	0.370	63.98
	19	15.08	14.55	14.93		4.02	0.362	0.362	64.12
	20	15.57	15.34	15.12		4.21	0.366	0.369	64.85
80	46	14.34	14.75	14.61	(2)	9.05	0.506	0.484	55.42
	47	14.69	14.71	14.49		8.10	0.510	0.489	53.61
	48	14.55	14.80	14.62		9.32	0.481	0.481	54.20
	49	14.34	14.38	14.77		8.32	0.501	0.480	53.91
	50	15.07	14.60	15.02		9.23	0.477	0.477	53.68
	16	14.61	14.84	13.92	(3)	55.28	0.618	0.583	54.12
	17	14.82	14.67	14.87		54.84	0.649	0.612	53.70
	18	14.86	14.28	14.73		53.80	0.650	0.542	54.20
	19	14.34	14.50	13.82		55.27	0.592	0.547	52.06
	20	14.09	14.79	14.70		57.83	0.604	0.562	53.85
120	41	13.81	13.81	13.78	(2)	70.06	1.876	1.621	58.90
	42	13.98	13.66	13.90		65.67	1.974	1.664	58.49
	43	14.02	13.98	13.87		68.95	1.979	1.502	59.00
	44	13.86	13.67	13.76		73.07	1.918	1.497	60.10
	45	13.68	13.62	13.36		71.25	1.889	1.589	58.95
	16	13.39	13.58	13.21	(3)	80.73	1.487	1.351	59.12
	17	13.79	13.65	13.70		77.59	1.447	1.350	59.30
	18	13.56	13.51	13.74		81.04	1.556	1.361	60.80
	19	13.58	13.79	13.83		79.52	1.421	1.326	59.44
	20	13.53	13.75	13.84		83.54	1.402	1.283	58.48
140	41	14.44	14.42	14.44	(2)	40.57	1.944	1.685	56.12
	42	14.27	14.25	14.25		39.71	1.959	1.689	55.25
	43	14.57	14.63	14.61		41.84	1.947	1.754	55.90
	44	14.36	14.41	14.39		41.35	1.926	1.702	55.29
	45	14.20	14.26	14.18		39.61	1.905	1.714	56.08
	16	13.26	13.25	13.24	(3)	50.98	1.355	1.365	53.87
	17	13.24	13.23	13.25		54.75	1.358	1.362	54.12
	18	13.13	13.13	13.13		50.14	1.369	1.422	54.20
	19	13.53	13.43	13.54		55.04	1.301	1.225	52.98
	20	13.40	13.40	13.40		52.38	1.342	1.351	53.26



Tabelul 3.10. Valorile caracteristicilor mecanice la compresiune dinamică funcție de temperatură,  $T = 100^{\circ}\text{C}$

Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Nr. probă	Dimensiunile probelor			Direcția de încărcare	Modulul de elasticitate [MPa]	Tensiunea la curgere [MPa]	Tensiunea de platou [MPa]	Densificarea [%]
		h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]					
40	46	15.74	15.99	15.36	(2)	21.57	0.232	0.232	63.63
	47	14.47	14.75	14.94		21.20	0.184	0.166	59.85
	48	15.38	15.98	15.60		22.67	0.260	0.211	60.89
	49	14.85	15.03	14.43		18.60	0.261	0.186	62.63
	50	15.29	15.94	15.74		23.54	0.265	0.195	63.12
	21	15.15	14.78	15.30	(3)	15.71	0.422	0.349	65.04
	22	15.21	14.89	15.67		17.32	0.465	0.354	63.12
	23	15.10	15.01	15.64		16.15	0.386	0.281	64.30
	24	14.88	15.27	15.87		17.54	0.326	0.289	65.30
	25	15.56	15.38	15.72		16.39	0.357	0.288	64.28
80	41	14.82	14.77	14.80	(2)	46.26	0.583	0.389	53.20
	42	15.42	15.35	14.83		46.55	0.577	0.477	50.63
	43	14.86	14.97	14.77		45.23	0.594	0.452	52.15
	44	14.81	14.75	14.37		47.61	0.555	0.397	51.67
	45	14.62	15.02	14.80		46.85	0.601	0.489	52.87
	21	14.60	14.13	14.66	(3)	63.54	0.492	0.359	53.89
	22	14.64	13.63	14.31		64.30	0.583	0.356	53.39
	23	14.20	14.30	12.81		62.51	0.544	0.499	53.40
	24	14.92	14.68	14.96		65.80	0.491	0.413	54.03
	25	14.55	14.87	14.62		67.46	0.432	0.373	52.84
120	46	13.68	13.62	13.76	(2)	124.20	1.713	1.237	56.62
	47	13.92	13.70	13.67		123.32	1.616	1.212	55.80
	48	13.85	13.84	13.91		115.95	1.615	1.384	56.62
	49	13.96	13.91	13.66		119.25	1.659	1.354	55.95
	50	13.54	13.71	13.80		120.98	1.695	1.328	56.02
	21	13.83	13.92	14.02	(3)	68.42	1.256	1.070	56.84
	22	13.58	13.92	14.01		61.30	1.190	1.067	55.00
	23	13.64	13.86	13.78		65.03	1.134	1.134	57.67
	24	13.94	13.73	13.85		62.85	1.205	1.087	56.62
	25	13.75	13.73	13.79		60.24	1.132	1.157	55.18
140	46	12.27	14.30	14.27	(2)	49.00	0.773	0.705	56.46
	47	14.29	14.32	14.31		49.22	0.811	0.744	55.54
	48	14.39	14.42	14.39		50.34	0.708	0.774	57.10
	49	14.27	14.29	14.18		53.20	0.835	0.677	55.06
	50	14.24	14.24	14.26		51.89	0.756	0.682	56.75
	21	13.17	13.18	13.17	(3)	12.54	0.582	0.621	53.95
	22	12.90	12.92	12.88		12.95	0.576	0.593	54.25
	23	12.99	13.00	12.97		13.14	0.560	0.784	54.10
	24	13.12	13.12	13.15		13.82	0.571	0.652	54.89
	25	12.88	12.85	12.86		12.50	0.594	0.707	53.88

### A.III. Rezultatele încercărilor experimentale de tracțiune

Tabelul A.11. Rezultatele modului de elasticitate și a rezistenței la rupere la tracțiune

Densitate	Nr. probă	Parametrii geometrici ai epruvetelor utilizate			Modulul de elasticitate	Rezistența la rupere la tracțiune
		$B_1$ [mm]	$B_2(B_3)$ [mm]	$L(L_0)$ [mm]		
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	-				E [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]
40	1	24.8	24.8	49.0	13.89	0.42
	2	24.6	24.8	49.5	14.02	0.49
	3	24.8	24.6	49.6	14.23	0.41
	4	24.6	24.4	49.8	13.95	0.45
	5	24.6	24.6	49.4	14.25	0.41
80	6	26.0	25.8	50.2	27.86	0.64
	7	25.8	25.8	50.3	27.40	0.90
	8	25.9	26.0	50.2	30.10	0.98
	9	26.1	25.9	50.2	28.45	0.68
	10	26.0	25.8	50.1	29.86	0.71
200	11	6.0	12.0	25.0	167.75	4.95
	12	6.1	12.0	25.2	172.74	5.62
	13	6.0	12.1	25.1	167.52	5.58
	14	6.0	12.1	25.1	171.25	5.35
	15	6.1	12.2	25.0	169.25	4.90

### A.IV. Determinarea experimentală a tenacității la rupere în regim static

Tabelul A.12. Valorile tenacității la rupere în funcție de densitate (1)

Nr. probă	Densitate $P$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța de rupere, $P$ [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Tensiunea la curgere, $\sigma_{ys}$ [MPa]
		Lățime $B$ [mm]	Înălțime $W$ [mm]	Deschidere $S$ [mm]	Lungimea Fisurii, $a$ [mm]			
1	40	13.85	25.56	100	12	6.17	0.03	0.38
2		13.93	25.62			7.92	0.03	
3		13.89	25.76			6.56	0.03	
4		13.75	25.37			7.73	0.04	
5		13.94	25.45			8.16	0.04	
1	80	13.08	25.54	100	12	10.52	0.05	0.48
2		12.87	25.67			14.86	0.07	
3		13.03	25.48			10.66	0.05	
4		12.94	25.90			11.66	0.05	
5		13.19	24.90			13.94	0.07	
1	120	13.04	25.02	100	12	25.77	0.12	0.89
2		12.97	25.03			24.95	0.12	
3		13.01	25.00			24.93	0.12	
4		13.01	24.90			23.96	0.12	
5		13.02	25.02			24.62	0.12	
1	140	13.42	25.81	100	12	37.17	0.16	1.05
2		13.32	25.82			35.44	0.16	
3		14.45	25.88			38.53	0.16	
4		13.35	25.95			35.61	0.16	
5		14.56	25.66			33.61	0.15	
1	160	13.58	29.98	75	12	55.01	0.20	3
2		13.69	30.30			60.98	0.22	
3		13.51	29.74			49.74	0.19	
4		13.51	30.10			56.25	0.21	
5		13.52	30.02			52.8	0.22	

Tabelul A.13. Valorile tenacității la rupere în funcție de densitate (2)

Nr. probă	Densitate $P$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța de rupere, $P$ [N]	Tenacitatea la rupere $K_{Ic}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Tensiunea la curgere, $\sigma_{ys}$ [MPa]
		Lățime $B$ [mm]	Înălțime $W$ [mm]	Deschidere $S$ [mm]	Lungimea Fisurii, $a$ [mm]			
1	200	11.53	24.75	100	12	74.53	0.41	4.14
2		11.65	25.29			74.82	0.40	
3		11.59	25.53			71.48	0.38	
4		11.62	26.09			78.24	0.39	
5		11.66	24.33			67.88	0.38	
1	300	13.41	29.99	75	13	158.32	0.58	5
2		13.51	29.95			161.56	0.60	
3		13.43	29.82			157.98	0.59	
4		13.53	30.05			154.44	0.57	
5		13.55	30.14			160.02	0.59	
1	480	13.47	29.83	75	13	298.58	1.13	12
2		13.5	30.01			289.56	1.08	
3		13.48	30.16			297.44	1.10	
4		13.54	29.79			301.15	1.13	
5		13.76	30.11			300.12	1.09	
1	540	13.51	29.92	75	13	338.02	1.26	20
2		13.55	30.02			335.89	1.26	
3		13.47	30.05			330.25	1.24	
4		13.50	29.95			333.56	1.25	
5		13.53	29.98			332.12	1.24	
1	600	13.55	29.93	75	13	365.02	1.33	22
2		13.62	29.98			370.12	1.35	
3		13.58	29.94			372.27	1.35	
4		13.61	30.05			366.23	1.33	
5		13.57	30.07			368.12	1.34	

Tabelul A.14. Valorile tenacității la rupere în funcție de densitate (3)

Nr. probă	Densitate $P$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța de rupere, $P$ [N]	Tenacitatea la rupere $K_{Ic}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Tensiunea la curgere, $\sigma_{ys}$ [MPa]
		Lățime $B$ [mm]	Înălțime $W$ [mm]	Deschidere $S$ [mm]	Lungimea Fisurii, $a$ [mm]			
1	620	13.57	30.08	75	13	398.12	1.47	24
2		13.55	30.11			390.92	1.44	
3		13.52	30.05			394.84	1.46	
4		13.61	30.14			389.20	1.44	
5		13.58	30.10			399.35	1.47	

Tabelul A.15. Valorile tenacității la rupere în funcție de viteza de încărcare

Nr. proba	Densitate P, [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța de rupere, P [N]	Tenacitatea la rupere K <sub>IC</sub> [MPam <sup>0.5</sup> ]	Viteza de încărcare, [mm/min]
		Lățime B [mm]	Înălțime W [mm]	Deschidere S [mm]	Lungimea Fisurii, a [mm]			
1	140	13.42	25.81	100	12	37.17	0.158	2
2		13.32	25.82			35.44	0.160	
3		14.45	25.88			38.53	0.155	
4		13.35	25.95			35.61	0.159	
5		14.56	25.66			33.61	0.150	
6		13.90	24.70			29.30	0.146	20
7		13.10	25.00			30.64	0.157	
8		13.80	25.00			29.03	0.142	
9		13.80	24.90			32.66	0.151	
10		13.60	25.00			31.56	0.149	
11		13.80	25.10			30.64	0.148	200
12		13.70	25.00			29.85	0.147	
13		14.10	25.00			27.16	0.130	
14		14.60	25.10			27.45	0.130	
15		14.60	24.90			27.41	0.128	
16		13.00	24.90			24.98	0.125	400
17		12.40	25.00			25.91	0.128	
18		12.80	24.90			26.38	0.133	
19		11.90	24.90			22.94	0.130	
20		12.30	25.00			25.06	0.132	

Tabelul A. 16. Valorile tenacității la rupere funcție de planul de formare

Nr. probă	Densitate P, [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța de rupere, P [N]	Tenacitatea la rupere K <sub>IC</sub> [MPam <sup>0.5</sup> ]	Direcția de încărcare
		Lățime B [mm]	Înălțime W [mm]	Deschidere S [mm]	Lungimea Fisurii, a [mm]			
1	40	25.5	49.4	180	25.0	17.4	0.0314	(2)
2		25.3	50.3			15.8	0.0267	
3		25.4	50.1			16.5	0.0271	
4		24.9	50.1			16.9	0.0292	
5		25.1	50.1			15.2	0.0249	
6		25.2	51.1			15.1	0.0283	(3)
7		24.9	50.5			13.8	0.0258	
8		25.7	50.7			14.4	0.0284	
9		25.5	50.4			14.3	0.0281	
10		25.4	50.1			13.6	0.0272	

Tabelul A.17. Parametrii geometrici și rezultatele tenacității la rupere. Efectul de scară

Tipul epruvetei	Densitate $\rho$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Direcția de încărcare	Forța critică, P [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Tensiunea nominală $\sigma_N$ [MPa]
		Lățime B [mm]	Înălțime W [mm]	Deschidere S [mm]	Lungimea Fisurii, a [mm]				
„S”	40	20	5.33	13.33	2.13	(2)	8.71	0.047	0.082
							8.78	0.048	0.082
							9.12	0.049	0.086
							8.70	0.047	0.082
							8.64	0.047	0.081
„M”		36.89	92.22	14.76	43.54		0.090	0.060	
					40.02		0.083	0.054	
					43.60		0.090	0.059	
					46.35		0.096	0.063	
					50.85		0.105	0.069	
„B”		256.0	640.0	102.4	217.11		0.170	0.042	
					200.16		0.157	0.039	
					212.51		0.166	0.042	
					205.12		0.161	0.040	
					215.95		0.169	0.042	



### A.V. Determinarea experimentală a tenacității la rupere în regim dinamic

Tabelul A.18. Valorile tenacității la rupere în regim dinamic în funcție de densitate

Nr. probă	Densitate $\rho$ , [Kg/m <sup>3</sup> ]	Dimensiunile probelor				Forța critică, P [N]	Tenacitatea la rupere $K_{IC}$ [MPam <sup>0.5</sup> ]	Energia W [J]
		Lățime B [mm]	Înălțime W [mm]	Deschidere S [mm]	Lungimea Fisurii, a [mm]			
6	40	13.48	25.39	100	12	14.36	0.065	0.09
7		13.83	24.90			14.36	0.066	0.09
8		13.93	24.67			14.36	0.067	0.08
9		13.89	24.77			14.36	0.067	0.08
10		13.65	24.98			14.36	0.067	0.08
6	80	13.91	25.54			30.76	0.134	0.11
7		13.92	25.12			28.71	0.129	0.11
8		13.97	25.37			28.71	0.126	0.11
9		13.85	25.37			28.71	0.127	0.11
10		13.75	25.56			28.71	0.127	0.11
6	120	13.04	25.00			43.07	0.209	0.14
7		13.06	25.04			38.96	0.188	0.14
8		13.02	25.04			38.96	0.189	0.14
9		12.80	25.06			41.02	0.202	0.14
10		13.00	24.37			41.02	0.210	0.14
6	140	13.02	25.70	55.37	0.255	0.20		
7		12.94	25.80	49.22	0.226	0.20		
8		12.66	25.22	49.22	0.242	0.19		
9		13.51	25.67	63.57	0.283	0.19		
10		13.45	25.21	55.62	0.257	0.20		

### A.VI. Determinarea numerică a tenacității la rupere cu ajutorul modelelor micromecanice

Tabelul A.19. Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare. Densitatea relativă=0.333; l=0.6 mm; t= 0.1 mm

Densitate relativă=0.333; l=0.6 mm; t= 0.1 mm								
Nr. cel.	a	a/w	Tenacitatea la rupere					
			PUR		PMMA		PVC	
			$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$
100	0.85	0.148	0.413	0.105	0.347	0.080	0.216	0.048
81		0.165	0.403	0.105	0.341	0.078	0.212	0.048
64		0.187	0.394	0.104	0.336	0.078	0.210	0.048
49		0.215	0.390	0.106	0.329	0.078	0.206	0.048
36		0.254	0.387	0.106	0.322	0.074	0.202	0.048
25		0.309	0.389	0.104	0.314	0.073	0.198	0.048
16		0.395	0.421	0.099	0.310	0.070	0.195	0.048
100	1.45	0.252	0.471	0.114	0.301	0.086	0.192	0.052
81		0.281	0.462	0.116	0.295	0.084	0.187	0.053
64		0.319	0.455	0.117	0.290	0.084	0.184	0.052
49		0.367	0.448	0.118	0.286	0.083	0.180	0.052
36		0.433	0.439	0.114	0.282	0.080	0.179	0.052
25		0.527	0.430	0.112	0.282	0.080	0.180	0.052
16		0.674	0.419	0.087	0.307	0.060	0.193	0.040
100	2.05	0.357	0.373	0.120	0.276	0.089	0.173	0.038
81		0.398	0.371	0.119	0.270	0.088	0.172	0.039
64		0.451	0.369	0.118	0.270	0.089	0.170	0.040
49		0.519	0.372	0.117	0.272	0.083	0.172	0.041
36		0.612	0.381	0.113	0.278	0.080	0.177	0.041
25		0.745	0.433	0.104	0.317	0.073	0.201	0.041
100		2.65	0.461	0.367	0.122	0.262	0.090	0.167
81	0.515		0.361	0.121	0.262	0.090	0.167	0.042
64	0.582		0.367	0.120	0.268	0.088	0.169	0.042
49	0.671		0.384	0.112	0.280	0.081	0.178	0.043

Tabelul A.20. Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare.  
Densitate relativă=0.182; l=0.55 mm; t= 0.05 mm

Densitatea relativă=0.182; l=0.55 mm; t= 0.05 mm								
Nr. cel.	a	a/w	Tenacitatea la rupere					
			PUR		PMMA		PVC	
			$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$
100	0.8	0.152	0.224	0.032	0.162	0.024	0.102	0.015
81		0.170	0.221	0.032	0.159	0.024	0.100	0.015
64		0.193	0.215	0.032	0.157	0.024	0.097	0.015
49		0.222	0.210	0.032	0.152	0.024	0.095	0.015
36		0.262	0.202	0.032	0.147	0.024	0.092	0.015
25		0.320	0.192	0.031	0.141	0.023	0.088	0.015
16		0.410	0.185	0.031	0.135	0.023	0.086	0.014
100		1.35	0.257	0.184	0.036	0.135	0.027	0.085
81	0.287		0.181	0.036	0.132	0.027	0.083	0.017
64	0.325		0.175	0.036	0.129	0.027	0.081	0.017
49	0.375		0.171	0.035	0.125	0.026	0.078	0.016
36	0.443		0.169	0.035	0.123	0.025	0.077	0.016
25	0.540		0.169	0.033	0.123	0.024	0.077	0.015
16	0.692		0.179	0.030	0.131	0.023	0.073	0.014
100	1.9		0.362	0.165	0.038	0.121	0.028	0.075
81		0.404	0.163	0.038	0.118	0.028	0.074	0.018
64		0.458	0.161	0.037	0.118	0.028	0.074	0.017
49		0.528	0.160	0.036	0.118	0.026	0.074	0.017
36		0.623	0.165	0.034	0.121	0.025	0.075	0.016
25		0.760	0.189	0.031	0.139	0.023	0.076	0.014
100		2.45	0.467	0.151	0.039	0.110	0.029	0.070
81	0.521		0.154	0.038	0.113	0.029	0.071	0.018
64	0.590		0.158	0.037	0.115	0.027	0.072	0.017
49	0.680		0.169	0.034	0.122	0.026	0.077	0.016

Tabelul A.21. Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare.  
Densitatea relativă=0.077; l=0.52 mm; t= 0.02 mm

Densitate relativă=0.077; l=0.52 mm; t= 0.02 mm								
Nr. cel.	a	a/w	Tenacitatea la rupere					
			PUR		PMMA		PVC	
			$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$
81	0.77	0.174	0.070	0.006	0.051	0.004	0.033	0.003
64		0.197	0.067	0.006	0.049	0.004	0.031	0.003
49		0.227	0.064	0.006	0.047	0.004	0.029	0.003
36		0.268	0.059	0.006	0.037	0.004	0.028	0.003
25		0.328	0.056	0.006	0.040	0.004	0.025	0.003
16		0.414	0.051	0.006	0.037	0.004	0.023	0.003
81	1.29	0.291	0.054	0.007	0.039	0.005	0.025	0.003
64		0.330	0.052	0.007	0.038	0.005	0.024	0.003
49		0.381	0.049	0.006	0.036	0.005	0.023	0.003
36		0.449	0.047	0.006	0.033	0.005	0.022	0.003
25		0.549	0.046	0.006	0.033	0.004	0.020	0.003
16		0.694	0.046	0.006	0.034	0.004	0.021	0.003
81	1.81	0.366	0.047	0.007	0.035	0.005	0.022	0.003
64		0.409	0.046	0.007	0.034	0.005	0.021	0.003
49		0.463	0.045	0.007	0.033	0.005	0.021	0.003
36		0.534	0.46	0.006	0.032	0.005	0.021	0.003
25		0.631	0.51	0.006	0.037	0.004	0.024	0.003
81	2.33	0.471	0.045	0.007	0.033	0.005	0.021	0.003
64		0.526	0.045	0.007	0.033	0.005	0.021	0.003
49		0.596	0.048	0.006	0.033	0.004	0.022	0.003

Tabelul A.22. Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare.  
Densitatea relativă=0.133; l=0.75 mm; t= 0.05 mm

Densitate relativă=0.133; l=0.75 mm; t= 0.05 mm								
Nr. cel.	a	a/w	Tenacitatea la rupere					
			PUR		PMMA		PVC	
			$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$
100	1.10	0.154	0.179	0.021	0.130	0.015	0.081	0.009
81		0.172	0.173	0.021	0.127	0.015	0.082	0.009
64		0.195	0.169	0.020	0.123	0.015	0.079	0.009
49		0.224	0.163	0.020	0.119	0.015	0.076	0.009
36		0.265	0.157	0.020	0.114	0.015	0.072	0.009
25		0.324	0.149	0.020	0.109	0.014	0.069	0.009
16		0.415	0.141	0.019	0.103	0.014	0.065	0.009
100		1.85	0.259	0.143	0.024	0.105	0.017	0.066
81	0.289		0.140	0.024	0.102	0.017	0.065	0.011
64	0.327		0.136	0.024	0.099	0.017	0.063	0.011
49	0.378		0.131	0.023	0.096	0.017	0.058	0.011
36	0.446		0.127	0.022	0.094	0.016	0.059	0.010
25	0.544		0.128	0.021	0.092	0.016	0.059	0.010
16	0.698		0.134	0.020	0.099	0.014	0.062	0.009
100	2.60		0.364	0.126	0.025	0.092	0.019	0.058
81		0.401	0.124	0.025	0.091	0.018	0.058	0.012
64		0.460	0.122	0.024	0.090	0.018	0.057	0.012
49		0.531	0.122	0.023	0.089	0.017	0.055	0.011
36		0.627	0.125	0.022	0.092	0.016	0.058	0.010
25		0.765	0.142	0.020	0.103	0.014	0.065	0.009
100		3.35	0.469	0.119	0.026	0.087	0.019	0.055
81	0.523		0.119	0.025	0.087	0.019	0.055	0.012
64	0.593		0.121	0.024	0.088	0.017	0.056	0.011
49	0.684		0.127	0.023	0.093	0.016	0.059	0.010

Tabelul A.23. Valorile tenacității la rupere pentru diferite materiale celulare.  
Densitatea relativă=0.105; l=0.955 mm; t= 0.05 mm

Densitate relativă=0.105; l=0.955 mm; t= 0.05 mm								
Nr. cel.	a	a/w	Tenacitatea la rupere					
			PUR		PMMA		PVC	
			$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IC}$ $MPa\sqrt{m}$	$K_{IIC}$ $MPa\sqrt{m}$
100	1.4	0.155	0.150	0.015	0.109	0.011	0.069	0.007
81		0.173	0.143	0.015	0.105	0.011	0.067	0.007
64		0.196	0.139	0.014	0.102	0.011	0.064	0.007
49		0.226	0.133	0.014	0.098	0.011	0.062	0.007
36		0.267	0.128	0.014	0.094	0.010	0.059	0.006
25		0.326	0.120	0.014	0.088	0.010	0.055	0.006
16		0.418	0.113	0.014	0.082	0.010	0.052	0.006
100	2.35	0.260	0.117	0.017	0.085	0.012	0.054	0.008
81		0.290	0.114	0.017	0.083	0.012	0.053	0.008
64		0.329	0.111	0.016	0.080	0.012	0.050	0.008
49		0.379	0.107	0.016	0.078	0.012	0.049	0.008
36		0.448	0.102	0.016	0.075	0.012	0.047	0.007
25		0.547	0.101	0.015	0.074	0.011	0.047	0.007
16		0.701	0.106	0.014	0.077	0.010	0.049	0.007
100	3.3	0.365	0.103	0.018	0.075	0.013	0.047	0.008
81		0.407	0.101	0.018	0.074	0.013	0.047	0.007
64		0.462	0.099	0.017	0.072	0.013	0.046	0.008
49		0.532	0.099	0.017	0.071	0.012	0.045	0.008
36		0.629	0.100	0.016	0.074	0.011	0.046	0.008
25		0.767	0.112	0.015	0.082	0.010	0.048	0.007
100	4.25	0.470	0.096	0.019	0.071	0.014	0.044	0.009
81		0.525	0.097	0.018	0.071	0.014	0.044	0.009
64		0.594	0.097	0.017	0.071	0.013	0.045	0.008
49		0.685	0.102	0.016	0.075	0.012	0.047	0.007

### A.VII. Caracterizarea structurilor de tip sandwich cu miez din materiale celulare

Tabelul A.24. Parametrii geometrici și forțele de rupere pentru grinzile sandwich (1)

Tip sandwich		Parametrii geometrici						Forța la rupere	
Fete	Miez	l [mm]	t [mm]	t/l [-]	c [mm]	b [mm]	d [mm]	F <sub>max</sub> [N]	F <sub>cr</sub> [N]
Stratimat	Spumă densitate 40 kg/m <sup>3</sup>	150	1.1	0.0073	21.80	51.6	22.90	225.87	153.43
						51.2		218.53	149.31
						51.4		221.67	151.86
						51.5		227.36	155.09
						51.4		222.16	152.87
						49.4		186.65	132.67
		200	1.1	0.0055	21.80	22.90	49.6	176.86	124.56
							49.7	179.32	126.42
							49.5	182.39	129.59
							49.5	185.47	131.92
							50.0	329.49	254.55
							50.1	341.05	250.17
Stratimat	Spumă densitate 40 kg/m <sup>3</sup>	70	1.3	0.0186	20.90	51.2	22.20	332.17	258.42
						50.8		338.86	255.02
						51.1		331.49	248.76
						50.0		288.86	222.86
						50.3		286.15	218.47
						50.8		284.32	217.53
		150	1.3	0.0087	20.90	22.20	50.1	286.76	217.95
							51.1	282.65	215.02
							50.3	256.73	181.83
							48.8	224.58	166.07
							50.3	236.01	179.67
							49.1	258.15	183.23
		200	1.3	0.0065	20.90	22.20	50.2	249.81	180.21
							51.4	412.34	232.84
							51.2	415.86	234.66
							51.4	408.32	227.15
							51.4	410.15	229.37
							51.3	405.67	225.93
Stratimat	Spumă densitate 40 kg/m <sup>3</sup>	70	1.4	0.0200	21.40	22.80	49.7	304.11	166.22
							49.9	297.53	161.39
							50.1	299.86	162.10
							49.9	302.67	165.49
		150	1.4	0.0093	21.40	22.80	49.9	302.67	165.49
							50.1	299.86	162.10
							49.9	302.67	165.49
							50.0	310.11	172.88

Tabelul A.25. Parametrii geometrice și forțele de rupere pentru grinzile sandwich (2)

Tip sandwich		Parametrii geometrice						Forța la rupere						
Fete	Miez	l [mm]	t [mm]	t/l [-]	c [mm]	b [mm]	d [mm]	F <sub>max</sub> [N]	F <sub>cr</sub> [N]					
Stratimat	Spumă densitate 40 kg/m <sup>3</sup>	70	1.5	0.0214	20.50	51.3	22.00	459.84	277.23					
						51.2		466.55	281.64					
						50.9		462.86	280.35					
						51.1		453.31	272.95					
						51.5		461.23	279.86					
						50.5		431.16	266.33					
		51.1		435.39		269.12								
		51.3		426.57		258.86								
		50.8		422.18		256.31								
		50.6		430.06		264.97								
		51.1		377.80		265.15								
		50.9		367.23		255.02								
		50.6		366.52		254.83								
		51.2		369.48		258.41								
		51.0		381.63		266.51								
		Stratimat		Spumă densitate 40 kg/m <sup>3</sup>		70		1.6	0.0229	21.20	51.1	22.80	382.66	206.45
											50.9		378.25	202.01
											51.3		371.06	191.56
51.2	372.53		193.58											
51.1	377.27		202.63											
49.7	262.83		114.48											
50.1	275.63		118.86											
50.0	289.84		125.64											
49.9	282.68		121.83											
49.8	286.34		127.33											
50.1	216.27		78.37											
50.3	233.11		94.68											
50.1	225.38		83.62											
49.9	219.68		91.36											
50.0	228.99		82.58											
Stratimat	Spumă densitate 200 kg/m <sup>3</sup>		70		2.0	0.0286	13.60		33.2		15.6		2723.98	2129.74
									32.8				2542.87	2010.67
									32.8				2498.86	1927.95
		32.9		2635.82				2076.38						
		33.1		2597.73				2015.98						
		32.00		1782.36				1293.98						
		31.6		1952.16				1420.65						
		31.4	1856.81	1323.39										
		31.4	1911.73	1385.55										
		31.8	1798.63	1399.68										



Tabelul A.26. Parametrii geometrice și forțele de rupere pentru grinzile sandwich (3)

Tip sandwich		Parametrii geometrice						Forța la rupere							
Fete	Miez	l [mm]	t [mm]	t/l [-]	c [mm]	b [mm]	d [mm]	F <sub>max</sub> [N]	F <sub>cr</sub> [N]						
Aluminiu	Spumă densitate 40 kg/m <sup>3</sup>	70	0.4	0.0057	26.40	48.8	26.80	265.32	185.85						
						48.7		245.86	189.36						
						48.4		248.66	179.62						
						48.7		256.32	191.88						
						48.5		259.31	182.56						
						48.4		208.12	156.33						
		150		49.2		201.56		148.59							
				49.6		216.35		159.37							
				48.8		205.18		149.59							
				48.2		199.53		153.16							
				48.0		175.42		135.76							
				48.6		185.28		142.21							
		200		48.6		164.53		127.37							
				48.7		167.86		129.22							
				48.3		171.97		134.73							
				Aluminiu		Plută		112	1.5	0.0134	5.00	12.4	6.50	112.90	63.52
												12.4		108.01	63.91
												12.3		96.34	59.65
12.3	94.63	61.27													
12.4	100.47	58.34													
Epoxy	Spumă densitate 200 kg/m <sup>3</sup>	40	0.17	0.0043	12.30	12.47	12.3	196.02	141.30						
							12.2	225.76	163.14						
							12.2	213.75	155.63						
							12.1	196.76	148.61						
							12.3	206.32	143.37						
		90		12.2	85.42	71.24									
				12.2	99.87	99.87									
				12.1	94.33	79.50									
				12.2	93.33	74.86									
				12.2	90.74	85.12									
Poliester	Spumă densitate 200 kg/m <sup>3</sup>	40	0.1	0.0025	12.30	12.40	12.2	212.35	158.53						
							12.2	206.95	145.74						
							12.3	193.48	140.67						
							12.2	194.73	139.76						
							12.2	199.85	141.53						
		90		12.3	104.58	76.37									
				12.2	81.49	81.49									
				12.2	76.71	76.71									
				12.3	89.05	77.86									
				12.3	89.21	79.36									

## Curriculum Vitae



### Informații personale

Nume / Prenume **LINUL Emanoil**

Adresa Str. DN 7, Nr. 194 , Com. Șibot, Jud. Alba, 517 750, România

Telefon +40 258 770 178 Mobil: +40 761 932 219

Fax +40 356 813 833

E-mail [linul\\_emanoil@yahoo.com](mailto:linul_emanoil@yahoo.com)  
[emanoil.linul@mec.upt.ro](mailto:emanoil.linul@mec.upt.ro)

Naționalitate Român

Data nașterii 12 Noiembrie 1984

Genul Masculin

### Experiență profesională

Perioada Octombrie 2008 – prezent

Funcția sau postul ocupat Doctorand cu frecvență

Activități și responsabilități principale Activitate de cercetare în domeniul rezistenței materialelor prin simulare numerică și măsurători experimentale pe diferite tipuri de mașini de încercat.  
Cursuri de master: Deformabilitate și rupere, Obiective strategii și metode în cercetarea științifică, Comunicare științifică și deontologie, Oboseala metalelor și structurilor, Optimizarea și selecția materialelor, Metode numerice în analiza stării de tensiune și deformație.

Numele și adresa angajatorului Universitatea „Politehnica” Timișoara, Piața Victoriei, nr. 2, Timișoara, România.

Tipul activității sau sectorul de activitate Învățământ superior

## **Educație și formare**

Perioada	Octombrie 2003 – Iunie 2008
Calificarea / diploma obținută	Diplomă de Inginer
Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite	Rezistența materialelor, Mecanică și vibrații, Mecanica fluidelor, Acționări hidraulice și pneumatice, Știința materialelor, Termotehnică, Mecanisme, Informatică și cibernetică în transporturi, Desen tehnic / Competențe specifice sectorului de cercetare – dezvoltare în domeniul Ingineriei Transporturilor.
Numele și tipul instituției de învățământ / furnizorului de formare	Universitatea „Politehnica” Timișoara, Facultatea de Mecanică, Catedra de Ingineria Transporturilor
Perioada	Septembrie 1999 – Iulie 2003
Calificarea / diploma obținută	Diplomă de Bacalaureat
Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite	Științe exacte și umaniste / Cunoștințe teoretice fundamentale cu accent pe științe exacte și domeniul transporturilor
Numele și tipul instituției de învățământ / furnizorului de formare	Grup Școlar “Nicolae Olahus”, Orăștie
Limba maternă	Româna
Limbi străine cunoscute	Engleză, Franceză
Competențe și aptitudini	Competențe în managementul proiectelor la care am luat parte în calitate de membru al echipei de cercetare, precum și competențe în organizarea conferințelor naționale și internaționale: <ul style="list-style-type: none"><li>• Contracte de cercetare pentru industrie - 5</li><li>• Lucrări științifice publicate - 13</li><li>• Organizare conferințe - 1</li></ul>

Competențe și aptitudini tehnice	Mecanica Ruperii, Rezistența Materialelor, Metode moderne de investigare experimentală, Metode numerice în analiza stării de tensiune și deformație
Competențe și aptitudini de utilizare a calculatorului	Sisteme de operare: Windows Pachete științifice: AutoCAD, MathCAD, Catia, Franc 2D, Abaqus Pachete PC uzuale: MS-Office, Adobe Photoshop
Alte competențe și aptitudini	Curs de pedagogie pentru desfasurarea de activități didactice

**Informații suplimentare**

Burse de studiu obtinute:

Bursă de doctorand cu frecvență obținută prin Programul „Burse Doctorale”, Proiect strategic ID 6998, contract POSDRU/6/1.5/S/13, „Racordarea programelor de studii doctorale europene”, Proiect cofinantat din Fondul Social European prin Programul Operational Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013-Investește în oameni!

**Lista contractelor de cercetare**

**Contracte de cercetare pentru industrie**

Contract de cercetare nr. 694/25.06.2007 cu titlul „Stress-strain load testing ACSS/TW 490/70 Conductor Construction SF 162/Iproeb + pr. EN 50xxx”  
Funcția: asistent de cercetare.

Contract de cercetare nr. 185/18.12.2008 cu titlul „Verificarea tehnică la aparatele de măsură tip DVIA-6, număr bucăți: 1, Serie 4/1982, utilizate pentru tensionarea ancorelor de la LEA”  
Funcția: asistent de cercetare.

Contract de cercetare nr. 2/12.01.2009 cu titlul „Încercări de materiale plastice”  
Funcția: asistent de cercetare.

Contract de cercetare nr. 14/19.01.2009 cu titlul „Incerari de stress-strain pentru conductoare din aluminiu si otel-aluminiu”  
Funcția: asistent de cercetare.

Contract de cercetare nr. 99/29.09.2009 cu titlul „Teste de stress-strain la conductorii electrici din AL si Otel, conf. SR CEI 1089-97 si SR-CEI 61089/A1 pentru conductor cu S=50 mm<sup>2</sup> si conductor OL-Al de 70/12 mm<sup>2</sup>”  
Funcția: asistent de cercetare.

## Lista de Lucrări Elaborate în Cadrul Programul ui de Cercetare a Tezei de Doctorat

### Lucrări științifice publicate în Reviste indexate ISI

1. Marsavina, L., Cernescu, A., Linul, E., Scurtu, D. and Chirita, C., "Experimental determination and comparison of some mechanical properties of comercial ploymers", *Revista Materiale Plastice*, Vol 47, nr. 1, pp. 85-89, Bucuresti, Romania, martie 2010.

2. Linul, E. and Marsavina, L., "Prediction of Fracture Toughness for Open Cell Polyurethane Foams using Finite - Element Micromechanical Analisis", *Iranian Polymer Journal*, 2011.

3. Bîrsan, M., Sadowski, T., Marșavina, L., Linul, E. and Pietras, D., "Mechanical behavior of sandwich composite beams made of foams and functionally graded materials", 2011 - în recenzie pentru *Mechanics of Materials*.

### Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate ISI

4. Faur N., Marșavina L., Cernescu A., Neș C. and Linul E., "The Influence of the Steel and Aluminium Components Separation at the Conductors Locking for Stress-Strain Tests", *Key Engineering Materials*, Vol. 417-418, ISBN 0-07849-315-8, ISBN-13 978-0-87849-315-9, Trans Tech Publications, pp. 693-696, 2010.

5. Linul, E., Marsavina, L., Sadowski, T. and Kneć, M., "Size Effect on Fracture Toughness of Rigid Polyurethane Foams", lucrare acceptată pentru publicare la 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS'11, Timisoara, 27-28 Octombrie 2011.

### Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate (BDI)

6. Linul, E., Marsavina, L. and Cernescu, A., "The effect of loading, the direction of deformation and density of rigid polyurethane foams subjected to compression", *Acta Technica Napocensis*, Series: Applied Mathematics and Mechanics, No. 53, Vol. II, pp. 311-316, 2010.

7. Linul, E. and Marsavina, L., "Experimental determination of compressive properties for rigid polyurethane foams", *Buletinul Universitatii Petrol-Gaze din Ploiesti*, Seria Tehnica, Vol. LXIII, No.1, pp.199-204, 2011.

8. Linul, E. and Marsavina, L., "The effect of loading rate and direction of formation on fracture toughness of rigid polyurethane foams", *Journal of Engineering Studies and Research*, ISSN 2068-7559, 2011.

**Lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) din străinătate (țări UE sau comparabile)**

9. Marsavina, L. and **Linul, E.** "Fracture toughness of polyurethane foams. Experiments versus micromechanical models", Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale, *18<sup>th</sup> European Conference on Fracture*, Dresden, Germany, August 30-September, 03 2010.

10. **Linul, E.** and Marsavina, L., "Influence of geometrical parameters on fracture toughness for open cell foams", *19<sup>th</sup> International Conference in Computer Methods in Mechanics*, pp. 313, Warsaw, Poland, 9-12 May 2011.

11. **Linul, E.**, Marsavina, L. and Cernescu, A., "Assessment of sandwich beams using failure mode maps", *16<sup>th</sup> International Conference on Composite Structures*, Porto, Portugal, June 2011 - în recenzie pentru Composite Structures.

**Lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice**

12. Neș C., Faur N., Cernescu A., **Linul E.**, "Achiziția și prelucrarea datelor la încercările de stress-strain pentru conductorii electrici din oțel-aluminiu", *Știință și inginerie*, Vol. 16, Ed. AGIR, București, 2009, ISBN 973-8130-82-4, ISBN 978-973-720-246-8, pp. 117-124.

13. **Linul, E.**, Marsavina, L., Cernescu, A., "Determinarea tenacitatii la rupere pentru materiale celulare de tipul spumelor poliuretanic", *Mecanica Ruperii*, Ed. Universitatii Petrol-Gaze din Ploiesti si Editura Universitatii „Lucian Blaga” din Sibiu, pp. 15-22, Sibiu, 6-7 Noiembrie 2009.