

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA STRUCTURILOR DIN MATERIALE CELULARE UTILIZATE ÎN ECHIPAMENTELE SPORTIVE

Teză elaborată în scopul obținerii titlului științific de doctor
în cadrul
Universității Politehnica Timișoara
în domeniul Inginerie mecanică
de către

Prof. Sorin Octavian SĂRĂNDAN

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, 2022

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

CUPRINS

1. INTRODUCERE	11
1.1. Justificarea alegerii temei	12
1.2. Materiale celulare utilizate în fabricarea echipamentelor sportive. Stadiul actual.....	14
1.2.1. Echipamente sportive.....	14
1.2.2. Încălțăminte sportivă	15
1.2.3. Echipamente de protecție a corpului.....	32
1.2.4. Echipamente de protecție a capului.....	36
1.3. Obiectivele cercetării	41
2. CARACTERIZAREA MECANICĂ A MATERIALELOR UTILIZATE ÎN FABRICAREA ECHIPAMENTELOR SPORTIVE	43
2.1. Prezentare generală	44
2.1.1. Pregătirea epruvetelor prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă.....	44
2.1.2. Pregătirea epruvetelor prelevate din echipamentele sportive de protecție	46
2.1.3. Determinarea densităților materialelor investigate.....	48
2.2. Încercări statice	49
2.2.1. Teste efectuate pe epruvetele prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă	49
2.2.2. Teste efectuate pe epruvete prelevate din echipamente sportive de protecție	54
2.2.3. Teste efectuate pe epruvete fabricate prin prototipare rapidă	55
2.3. Solicitări de lungă durată.....	60
2.3.1. Teste de relaxare	60
2.3.2. Teste de relaxare efectuate pe epruvete fabricate prin prototipare rapidă	60
2.4. Solicitări ciclice.....	64
3. CALIBRAREA MODELELOR DE MATERIAL VISCO-HIPERELASTIC	67
3.1. Baze teoretice.....	68
3.1.1. Introducere	68
3.1.2. Modele hiperelastice	71
3.1.3. Modele pentru spume flexibile	72
3.1.4. Efectul Mullins	73
3.1.5. Modele viscoelastice	76
3.1.6. Procesul de calibrare al modelelor numerice	79
3.2. Calibrarea modelelor pentru spume flexibile	81
3.2.1. Determinarea preliminară a coeficienților modelului de material pentru spume flexibile.....	81
3.2.2. Calibrarea modelului Ogden-Roxburgh.....	89
3.2.3. Determinarea curbei de relaxare	89
3.2.4. Determinarea caracteristicii instantanee a materialului	91

3.3. Calibrarea modelelor pentru elastomerii fabricați prin prototipare rapidă	96
3.3.1. <i>Determinarea preliminară a coeficienților modelului hiperelastic.....</i>	96
3.3.2. <i>Calibrarea modelului Ogden-Roxburgh.....</i>	102
3.3.3. <i>Determinarea curbelor de relaxare</i>	105
3.3.4. <i>Determinarea caracteristicilor instantanee a materialulelor.....</i>	109
4. SELECȚIA DE STRUCTURI DE METAMATERIALE DESTINATE APLICAȚIILOR DIN DOMENIUL SPORTULUI	121
4.1. Generalități privind materialele celulare.....	122
4.2. Structuri bazate pe sistemul cubic diamant	127
4.2.1. <i>Modelul geometric</i>	127
4.2.2. <i>Analize numerice</i>	129
4.3. Structuri de grinzi octet.....	133
4.3.1. <i>Modelul geometric</i>	133
4.3.2. <i>Analize numerice</i>	135
4.4. Structuri Kagome.....	139
4.4.1. <i>Modelul geometric</i>	139
4.4.2. <i>Analize numerice</i>	141
4.5. Structuri Kelvin.....	144
4.5.1. <i>Modelul geometric</i>	144
4.5.2. <i>Analize numerice</i>	146
4.6. Concluzii	150
5. IMPLEMENTAREA NOILOR MATERIALE CELULARE ÎN ECHIPAMENTE SPORTIVE	153
5.1. Modelul de referință	154
5.1.1. <i>Modelul geometric</i>	154
5.1.2. <i>Analiza numerică a modelului de referință</i>	155
5.2. Talpa de încălțăminte generată pe structură Kelvin.....	159
5.2.1. <i>Modelul geometric inițial</i>	159
5.2.2. <i>Analiza numerică a modelului inițial</i>	161
5.2.3. <i>Modelul actualizat</i>	166
5.2.4. <i>Analiza numerică a modelului actualizat</i>	168
5.3. Talpa de încălțăminte generată din structura tip Kagome	173
5.3.1. <i>Modelul geometric</i>	173
5.3.2. <i>Analiza numerică a modelului inițial</i>	175
5.3.3. <i>Modelul actualizat</i>	179
5.3.4. <i>Analiza numerică a modelului actualizat</i>	181
6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	187
6.1. Concluzii	188
6.2. Contribuții personale	191
7. BIBLIOGRAFIE	193

LISTA DE FIGURI

Fig. 1.1. Evoluția bugetului alocat salariilor în NBA (a), respectiv a veniturilor fotbaliștilor profesioniști (b)	12
Fig. 1.2. Tipuri de pantofi de-a lungul istoriei	15
Fig. 1.3. Evoluția pantofilor de atletism între 1860(a)-1940(b)-1960(c).....	16
Fig. 1.4. Evoluția pantofilor (modelul pentru baschet) (a) anii 1995-2000, (b) anii 2003-2007, (c) 2019.....	17
Fig. 1.5. Unele din cele mai bine vândute încălțăminte din lume cu venituri cumulate de peste 100 milioane de dolari (statista.com).....	18
Fig. 1.6. Anatomia unui pantof de alergare (runningmag.ro).....	19
Fig. 1.7. Diverse tălpi pentru pantofii de tenis	20
Fig. 1.8. Modele de încălțăminte sportivă	21
Fig. 1.9. Materialele reciclabile utilizate în componența pantofului de alergare.....	23
Fig. 1.10. Exemple de solide celulare: spumă 3D cu celule deschise (a), spumă 3D cu celule închise (b) [12]	26
Fig. 1.11. Structuri celulare utilizate în crearea pantofilor	26
Fig. 1.12. Materialul boost (poliuretan termoplastice) și produsul final	28
Fig. 1.13. Distribuția spumelor celulare într-o pereche de pantofi de sport [7].....	29
Fig. 1.14. Reprezentarea tensiune-deformație pentru încercarea de compresiune	31
Fig. 1.15. Structuri celulare de tip fagure pentru echipamente sportive	33
Fig. 1.16. Echipament de protecție a pieptului și umerilor	34
Fig. 1.17. Costum de protecție pentru sporturile automobilistice	35
Fig. 1.18. Căști de protecție pentru sporturi automobilistice (a), rugby (b) și ciclism (c)	37
Fig. 1.19. Căști de protecție în motociclism (a), fotbal american (b) și box (c).....	38
Fig. 1.20. Căști de protecție pentru fotbalul american.....	39
Fig. 1.21. Structuri de tip fagure utilizate în fabricarea căștilor	40
Fig. 2.1. Tălpile încălțăminte sportive	44
Fig. 2.2. Schița epruvetei de tracțiune	44
Fig. 2.3. Preducele destinate debitării epruvetelor de compresiune (a) și de tracțiune (b).....	45
Fig. 2.4. Prelevarea epruvetelor de tracțiune	45
Fig. 2.5. Epruvetele de compresiune (a) și de tracțiune (b) prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă.....	46
Fig. 2.6. Modelul de cască de protecție pentru jocul de rugby	47
Fig. 2.7. Celula (a) și spuma obținută în urma înlăturării materialului textil exterior (b)	47
Fig. 2.8. Epruvetele prelevate din spuma EVA utilizată în fabricarea căștii de protecție	47
Fig. 2.9. Epruvetă de compresiune la începutul (a) și finalul testului (b)	49
Fig. 2.10. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e).....	50
Fig. 2.11. Structura celulară a spumei EVA [24].....	51
Fig. 2.12. Comparatie între curbe tensiune-deformație ale unor epruvete reprezentative din fiecare material, cu evidențierea diferitelor stadii ale deformației celulelor.....	51
Fig. 2.13. Epruvetă de tracțiune la începutul testului (a) și înainte de rupere (b)	53
Fig. 2.14. Determinarea legii de variație a deformației cu timpul	53
Fig. 2.15. Variația tensiunii cu deformația pentru cele 5 materiale investigate.....	53
Fig. 2.16. Epruvetă de compresiune la începutul (a) și finalul testului (b)	54

Fig. 2.17. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul utilizat în fabricarea căștilor de protecție	55
Fig. 2.18. Epruvete fabricate prin prototipare rapidă.....	55
Fig. 2.19. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul Agil-U	56
Fig. 2.20. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul TPU	56
Fig. 2.21. Comparație între curbele tensiune-deformație obținute la compresiune pentru materialul Agil-U respectiv TPU.....	57
Fig. 2.22. Curba tensiune-deformație specifică la solicitarea de tracțiune pentru Agil-U.....	58
Fig. 2.23. Curba tensiune-deformație specifică la solicitarea de tracțiune pentru TPU	58
Fig. 2.24. Variația modulului de relaxare Et cu timpul pentru materialul Agil-U.....	60
Fig. 2.25. Variația modulului de relaxare normalizat et cu timpul pentru materialul Agil-U	61
Fig. 2.26. Variația modulului de relaxare Et cu timpul pentru materialul TPU	61
Fig. 2.27. Variația modulului de relaxare normalizat et cu timpul pentru materialul TPU	61
Fig. 2.28. Comparație între modulele de relaxare Et ale materialelor Agil-U și TPU	62
Fig. 2.29. Comparație între modulele de relaxare normalizate et ale materialelor Agil-U și TPU	62
Fig. 2.30. Mașina multiaxială INSTRON 8874 (a) și efectuarea testelor ciclice pe Agil-U (b)	64
Fig. 2.31. Curbele ciclice tensiune-deformație pentru EVA.....	65
Fig. 2.32. Curbele ciclice tensiune-deformație pentru materialul Agil-U	65
Fig. 2.33. Curbele ciclice tensiune-deformație pentru materialul TPU.....	66
Fig. 3.1. Reprezentare schematică a tipurilor de curbe tensiune-deformație.....	68
Fig. 3.2. Modificările volumice la deformații mari pentru cauciuc respectiv spume flexibile	69
Fig. 3.3. Variația razei cilindrului cu înălțimea	70
Fig. 3.4. Efectul Mullins [39]	73
Fig. 3.5. Primul ciclu de încărcare-descărcare	75
Fig. 3.6. Curba tensiune-deformație pentru două cicluri de solicitare	75
Fig. 3.7. Variația parametrului η și a tensiunii cu timpul.....	76
Fig. 3.8. Principiul lui Boltzmann pentru două tensiuni aplicate succesiv	77
Fig. 3.9. Modelul reologic pentru fluidul Maxwell (a) și solidul Kelvin (b) [46]	78
Fig. 3.10. Modelul Kelvin-Voigt generalizat	78
Fig. 3.11. Flow-chartul procesului de calibrare a modelelor de materiale.....	80
Fig. 3.12. Variația energiei specifice cu deformația pentru cele cinci materiale.....	81
Fig. 3.13. Variația experimentală și analitică a energiei specifice cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)	83
Fig. 3.14. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)	84
Fig. 3.15. Variația experimentală și analitică a energiei specifice cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)	85
Fig. 3.16. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)	86
Fig. 3.17. Ansamblul modelului utilizat în analizele numerice: vedere izometrică fără placa superioară (a) și vedere laterală (b)	87
Fig. 3.18. Modelul numeric în configurație inițială și la finalul analizei.....	87
Fig. 3.19. Variația experimentală, analitică și numerică a tensiunii cu deformația pentru materialul S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)	88
Fig. 3.20. Rezultatele calibrării modelului Ogden-Roxburgh pentru spuma felxibilă	89

Fig. 3.21. Suprapunerea polinomului de interpolare peste variația tensiunii cu timpul	90
Fig. 3.22. Comparație între variația modulului de relaxare normalizat în funcție de timp și seria Prony pentru 3600s (a), respectiv un detaliu pentru 100s (b)	91
Fig. 3.23. Comparație între variația experimentală a tensiunii cu deformația și rezultatele analizelor numerice utilizând modelul visco-hiperfoam inițial	92
Fig. 3.24. Variația parametrului adimensional k cu deformația și funcția polinomială $k\varepsilon$ rezultată	92
Fig. 3.25. Curbele tensiune-deformație pentru datele experimentale și modelul ajustat	93
Fig. 3.26. Variația energiei specifice cu deformația pentru modelul ajustat de spumă flexibilă	93
Fig. 3.27. Variația tensiunii cu deformația pentru Agil-U	94
Fig. 3.28. Comparație între variația modulului de relaxare normalizat cu timpul și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 100s (b)	95
Fig. 3.29. Variația energiei specifice cu deformația pentru Agil-U (a) și pentru TPU (b)	96
Fig. 3.30. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială calibrată după cele două metode	98
Fig. 3.31. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția Ogden calibrată după cele două metode	99
Fig. 3.32. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru Agil-U	99
Fig. 3.33. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială calibrată după cele două metode	100
Fig. 3.34. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția Ogden calibrată după cele două metode	101
Fig. 3.35. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru TPU	101
Fig. 3.36. Rezultatele calibrării modelului Ogden-Roxburgh pentru Agil-U: prima amplitudine a solicitării (a), a doua amplitudine a solicitării (b), a treia amplitudine a solicitării (c) respectiv comparația pentru cele trei amplitudini (d)	103
Fig. 3.37. Rezultatele calibrării modelului Ogden-Roxburgh pentru TPU: prima amplitudine a solicitării (a), a doua amplitudine a solicitării (b), a treia amplitudine a solicitării (c) respectiv comparația pentru cele trei amplitudini (d)	105
Fig. 3.38. Suprapunerea polinomului de interpolare peste variația tensiunii cu timpul pentru materialul Agil-U	106
Fig. 3.39. Comparație între variația cu timpul a modulului de relaxare normalizat și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 100s (b) pentru materialul Agil-U	107
Fig. 3.40. Suprapunerea polinomului de interpolare peste variația tensiunii cu timpul pentru materialul TPU	108
Fig. 3.41. Comparație între variația cu timpul a modulului de relaxare normalizat și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 100s (b) pentru materialul TPU	109
Fig. 3.42. Comparație între variația experimentală a tensiunii cu deformația și rezultatele analizelor numerice utilizând modelul visco-hiperelatic inițial pentru Agil-U: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a), respectiv curbele complete (b)	110
Fig. 3.43. Variația parametrului adimensional k cu deformația și funcția polinomială $k\varepsilon$ rezultată	111
Fig. 3.44. Curbele tensiune-deformație pentru datele experimentale și modelul ajustat	111
Fig. 3.45. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială calibrată prin cele două metode	112

Fig. 3.46. Variația tensiunii cu deformația pentru datele experimentale și funcția polimomială: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a), respectiv curbele complete (b).....	113
Fig. 3.47. Comparație între variația cu timpul a modulului de relaxare normalizat și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 120s (b).....	114
Fig. 3.48. Comparație între variația experimentală a tensiunii cu deformația și rezultatele analizelor numerice utilizând modelul visco-hiperelastice inițial pentru TPU: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a) respectiv curbele complete (b)	115
Fig. 3.49. Variația parametrului adimensional k cu deformația și funcția polinomială $k\varepsilon$ rezultată	116
Fig. 3.50. Curbele tensiune-deformație pentru datele experimentale și modelul ajustat	116
Fig. 3.51. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polimomială calibrată după cele două metode	117
Fig. 3.52. Variația tensiunii cu deformația pentru datele experimentale și funcția polimomială: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a) respectiv curbele complete (b).....	118
Fig. 3.53. Comparație între variația modulului de relaxare normalizat cu timpul și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 120s (b).....	119
Fig. 4.1. Variația rigidității relative (a) și a rezistenței relative (b) cu densitatea relativă pentru diferite clase de materiale [49]	123
Fig. 4.2. Imagine SEM a structurii celulare a unei spume poliuretanică [50]	123
Fig. 4.3. Structură metalică de tip fagure	124
Fig. 4.4. Curba de ecrusare utilizată în modelul de plasticitate pentru ABS.....	125
Fig. 4.5. Structura cristalină a diamantului (a), structura celulei cubice de tip diamant (b) și elementul de volum reprezentativ (c)	127
Fig. 4.6. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura diamant	128
Fig. 4.7. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura diamant.....	129
Fig. 4.8. Exemple de discretizări pentru structura cubică diamant	130
Fig. 4.9. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente..	130
Fig. 4.10. Curbele tensiune-deformație pentru structurile cubice diamant.....	131
Fig. 4.11. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile cubice diamant	131
Fig. 4.12. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile cubice diamant	132
Fig. 4.13. Structura celulei cubice de grinzi de tip octet (a) și elementul de volum reprezentativ (b)	133
Fig. 4.14. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura de grinzi octet	134
Fig. 4.15. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura de grinzi octet	134
Fig. 4.16. Exemple de discretizări pentru structura de grinzi octet	135
Fig. 4.17. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente pentru structura de grinzi de tip octet	136
Fig. 4.18. Curbele tensiune-deformație pentru structurile de grinzi octet.....	136
Fig. 4.19. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile de grinzi octet.	137
Fig. 4.20. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile de grinzi de tip octet.....	137
Fig. 4.21. Structura celulei de tip Kagome (a) și elementul de volum reprezentativ (b)	139

Fig. 4.22. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura Kagome	140
Fig. 4.23. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura Kagome	140
Fig. 4.24. Exemple de discretizări pentru structura Kagome	141
Fig. 4.25. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente	142
Fig. 4.26. Curbele tensiune-deformație pentru structurile de tip Kagome	142
Fig. 4.27. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile de tip Kagome	143
Fig. 4.28. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile de tip Kagome	143
Fig. 4.29. Structura celulei Kelvin (a) și elementul de volum reprezentativ (b)	144
Fig. 4.30. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura Kelvin.....	145
Fig. 4.31. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura Kelvin	146
Fig. 4.32. Exemple de discretizări pentru structura Kelvin	147
Fig. 4.33. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente	147
Fig. 4.34. Curbele tensiune-deformație pentru structurile Kelvin	148
Fig. 4.35. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile Kelvin	148
Fig. 4.36. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile Kelvin	149
Fig. 4.37. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile investigate	150
Fig. 4.38. Variația densității relative cu raportul d/l pentru structurile investigate.....	151
Fig. 4.39. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile investigate	151
Fig. 4.40. Curbele tensiune-deformație ale celor patru structuri, pentru densitatea relativă de 0,12.....	152
Fig. 5.1. Modelul CAD pentru încălțăminte sportivă (a) și modelul CAD al părții mediane a tălpii (b)	154
Fig. 5.2. Ansamblul utilizat în analiză.....	155
Fig. 5.3. Discretizarea indenterului (a), a suportului (b) și a tălpii mediane (c)	156
Fig. 5.4. Distribuția tensiunilor în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b) ..	157
Fig. 5.5. Distribuția tensiunilor în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)	158
Fig. 5.6. Distribuția tensiunilor în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)	158
Fig. 5.7. Graficul forță-deplasare rezultat din analiza de referință.....	158
Fig. 5.8. Structura de tip Kelvin cu densitatea relativă de 0,1924	159
Fig. 5.9. Modelul geometric reprezentând negativul călcâiului	160
Fig. 5.10. Poziționarea relativă a negativului și a structurii Kelvin	160
Fig. 5.11. Modelul tălpii proiectate din structuri Kelvin în vedere laterală (a), vedere de sus (b) și vedere izometrică (c).....	161
Fig. 5.12. Discretizarea modelului bazat pe structura Kelvin.....	162
Fig. 5.13. Distribuția tensiunilor în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)	163
Fig. 5.14. Distribuția tensiunilor în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)	164
Fig. 5.15. Distribuția tensiunilor în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b) ..	165
Fig. 5.16. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul bazat pe structura de tip Kelvin.....	165
Fig. 5.17. Comparație între rezultatele analizelor numerice pentru modelul de referință (spumă EVA) și modelul bazat pe structura Kelvin, diminuat cu factorul k	166
Fig. 5.18. Modelul actualizat al tălpii pe bază de structuri Kelvin în vedere laterală (a), în vedere de sus (b) și în vedere izometrică (c)	167

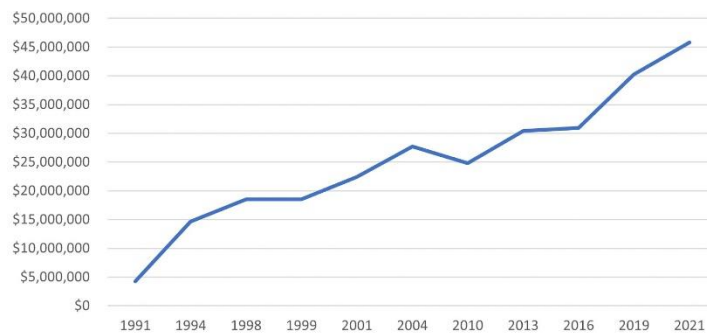
Fig. 5.19. Discretizarea modelului actualizat bazat pe structura Kelvin	168
Fig. 5.20. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)	169
Fig. 5.21. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b).....	170
Fig. 5.22. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)	171
Fig. 5.23. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul actualizat bazat pe structura de tip Kelvin	171
Fig. 5.24. Structura de tip Kagome cu densitate relativă de 0,1924.....	173
Fig. 5.25. Poziționarea relativă a negativului și a structurii Kagome	174
Fig. 5.26. Modelul tălpii pe bază de structuri Kagome în vedere laterală (a), în vedere de sus (b) și în vedere izometrică (c).....	174
Fig. 5.27. Discretizarea modelului bazat pe structura Kagome	175
Fig. 5.28. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)	176
Fig. 5.29. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b).....	177
Fig. 5.30. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)	178
Fig. 5.31. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul bazat pe structura de tip Kagome	178
Fig. 5.32. Comparație între rezultatele analizelor pentru modelul de referință (spumă EVA) și modelul bazat pe structura Kagome, diminuat cu factorul k	179
Fig. 5.33. Modelul actualizat al tălpii pe bază de structuri Kagome în vedere laterală (a), în vedere de sus (b) și în vedere izometrică (c)	180
Fig. 5.34. Discretizarea modelului actualizat bazat pe structura Kagome.....	181
Fig. 5.35. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)	182
Fig. 5.36. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b).....	183
Fig. 5.37. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)	184
Fig. 5.38. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul actualizat bazat pe structura de tip Kagome	185
Fig. 5.39. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul actualizat bazat pe structura de tip Kelvin și modelul actualizat generat pe structura Kagome	185

1. INTRODUCERE

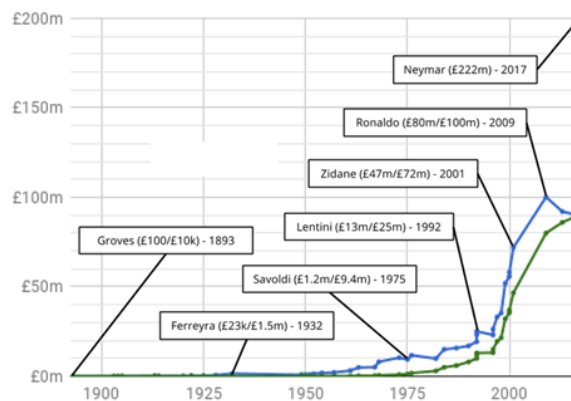
1.1. Justificarea alegerii temei

În ultimele decenii, sportul profesionist a devenit o adevărată industrie, din ce în ce mai productivă din punct de vedere financiar, susținută prin programe de marketing.

Spre exemplu, în baschetul profesionist american (NBA), în ultimii ani, bugetele echipelor au avut o creștere exponențială (Fig. 1.1 a) [1]. De asemenea, relevantă este creșterea veniturilor fotbalistilor profesioniști, creștere care prezintă un trend similar (Fig. 1.1 b) [2].



a)



b)

Fig. 1.1. Evoluția salariilor anuale ale jucătorilor de top din NBA (a), respectiv a veniturilor fotbalistilor profesioniști (b)

Această evoluție se datorează faptului că un număr semnificativ de companii care activează în diverse domenii, de la industria transporturilor la sectorul bancar, au investit masiv în programele publicitare și de marketing. Creșteri semnificative ale cifrelor de afaceri s-au obținut prin expunerea brandului și produselor firmei în cadrul competițiilor sportive prin panouri sau spoturi publicitare, prin finanțarea directă sub formă de sponsorizări, în schimbul imprimării logo-ului companiei pe echipamente de joc, sau prin rebranduirea competițiilor (Liga I Superbet, Cupa României Timișoreana, Serie A TIM, Turkish Airlines EuroLeague etc.).

Creșterea industriei sportului a atras după ea și dezvoltarea companiilor producătoare de echipament sportiv. Accesibilitatea produselor (susținută de apariția unor retaileri specializați în comercializarea de echipament sportiv), creșterea nivelului de trai (care a permis practicanților amatori achiziționarea de echipament sportiv specializat chiar și pentru activități recreaționale), asocierea brandurilor de echipament sportiv cu sportivii profesioniști de top (ceea ce a permis conceperea și comercializarea de echipamente ce poartă semnătura sportivilor respectivi), au condus la creșterea prețurilor de comercializare și a profiturilor companiilor.

Situațiile financiare excepționale au permis companiilor de top din domeniul industriei echipamentelor sportive să aloce bugete însemnate către departamentele de cercetare și dezvoltare de produse, adesea, în colaborare cu producătorii de materiale. Scopul principal constă în creșterea performanțelor produselor.

Ținând cont de natura dinamică a activităților sportive, *reducerea masei echipamentelor* reprezintă unul din obiectivele prioritare în proiectarea de noi produse, cu scopul îmbunătățirii agilității, vitezei și anduranței sportivilor.

Un alt aspect urmărit în dezvoltarea de noi produse este reprezentat de personalizarea caracteristicilor elastice și mecanice ale echipamentelor sportive. În multe cazuri, sportivii aleg un anumit produs datorită comportamentului acestuia în detrimentul brandului. Spre exemplu, unui alergător încălțăminte de top produsă de o anumită companie poate să i se pară prea rigidă sau prea compliantă, alegând astfel un produs de la o altă companie, care să îi satisfacă cerințele.

În această tendință, tema studiului constă în dezvoltarea de echipament sportiv bazat pe structuri celulare proiectate individual și fabricate prin prototipare rapidă.

Astfel, s-a evaluat oportunitatea fabricării de produse ale căror componente active să posedă densități reduse și caracteristici elastice și mecanice similare celor fabricate din materiale convenționale. Totodată, elementul de personalizare se poate realiza foarte ușor, datorită faptului că fiecare componentă activă bazată pe o structură va fi fabricată individual, spre deosebire de producția de serie caracteristică marilor companii. Acest lucru permite o modificare a parametrilor geometrici ai structurii, care, la rândul ei, determină o modificare a comportamentului produsului.

1.2. Materiale celulare utilizate în fabricarea echipamentelor sportive. Stadiul actual

1.2.1. Echipamente sportive

Obiectele vestimentare sunt indispensabile în viața modernă. Acestea au rolul de a proteja părțile sensibile ale corpului împotriva factorilor externi, dar și de a crește nivelul de confort și satisfacție al purtătorului. Pentru unele persoane, estetica și apartenența la un anumit grup pe baza modului de a se îmbrăca, sunt caracteristici definitorii, pentru atleți sunt esențiale caracteristicile legate de performanță, iar pentru majoritatea populației, un aspect definitoriu este dat de durabilitatea articolelor vestimentare. Toate cele menționate, alături de multe alte caracteristici, fac parte din proprietățile obiectelor vestimentare.

Restrângând zona de interes, echipamentele sportive, pe lângă performanțele ridicate, trebuie să asigure și o protecție cât mai bună pentru anumite zone ale corpului. De aceea, pantofii speciali de sport, pe lângă modul de înmagazinare a energiei și durabilitatea pe tipul de teren, trebuie să asigure și o bună protecție a gleznei. Un echipament de protecție a capului, pe lângă caracteristicile cunoscute a priori, din denumirea acestuia, trebuie să aibă și o greutate cât mai mică pentru a nu periclita capacitatea de mișcare a celui care îl folosește.

Istoria ne arată că oamenii utilizau echipamentele de protecție de mii de ani. Încă de la apariția primelor veșminte, care aveau rolul de a proteja corpul împotriva intemperiei și apariția primelor încălțări pe post de protecție a tălpilor, oamenii au realizat că este nevoie să se adapteze condițiilor și că înzestrarea naturală nu este suficientă. Astfel, chiar dacă utilizarea echipamentelor de protecție avea la început un singur scop, acela de a proteja corpul în luptă sau în acțiuni de procurare a hranei, de tipul vânătorii sau pescuitului, acestea au fost treptat utilizate și în viața zilnică. Grecii antici au lăsat în moștenire documente care atestă existența sporturilor și modul în care acestea erau practicate, unele menținându-se aproape în forma incipientă și în zilele noastre. În practicarea acestor sporturi sunt descrise și piesele vestimentare pe care sportivii erau nevoiți să le utilizeze în evenimentele oficiale. Odată cu dezvoltarea civilizației, protecția nu mai reprezintă singurul scop al echipamentului sportiv. Chiar dacă inițial, într-o luptă cu săbii, se practica reducerea agresivă a mobilității în schimbul unui grad ridicat de protecție, dat de o armură greoaie, în zilele noastre mobilitatea și confortul pe care un echipament îl conferă sunt caracteristici esențiale.

Un echipament sportiv de înaltă clasă trebuie să asigure o îmbunătățire a performanței individuale a sportivului și să confere stabilitate, confort și o bună protecție a zonei în care este utilizat. Echipamentele sportive se diferențiază în funcție de tipul de sport și de clasa de exerciții la care sunt întrebuițate. Diferențele apărute între echipamentele de același tip sunt date de materialele și tehnologiile utilizate.

Dezvoltarea rapidă a tehnologiei și a științei materialelor a dus la crearea unor echipamente care au caracteristici din ce în ce mai performante. Apariția noilor materiale și înglobarea rapidă a acestora în piața de consum, alături de investițiile masive în domeniul sporturilor, produc îmbunătățiri semnificative ale calității echipamentelor sportive, acestea devenind esențiale în drumul spre succes.

Explorarea unor noi tipuri de materiale compozite și utilizarea lor în fabricarea obiectelor sportive au dus la obținerea unei game exclusiviste de echipamente din punctul de vedere al performanțelor. Dintre aceste materiale fac parte combinații de fibră de nucă de cocos și EVA (etilen-acetat de vinil), utilizate în realizarea echipamentelor de protecție la impact, polipropilenă și laminate din fibră de in, din

categoria materialelor celulare textile, utilizate în realizarea căștilor de protecție [3]. Dintre materialele de interes, utilizate în fabricarea pantofilor pentru atleți, fac parte EVA-ul, poliuretanul, PVC-ul (policlorura de vinil) etc. Pentru a acoperi o gamă cât mai largă a echipamentelor sportive, acestea se vor împărți în categorii după criteriul utilizării. Astfel, în continuare, sunt prezentați pantofii speciali pentru sport, echipamentul de protecție a corpului și echipamentul de protecție a capului.

1.2.2. Încălțăminte sportivă

În alegerea unei perechi potrivite de încălțăminte trebuie să se țină cont de mai multe criterii, deoarece pantofii pot să ofere stabilitate, pot să mărească rigiditatea piciorului sau să-i confere o mai bună flexibilitate, dar pot să producă și răni, în cazul în care pantoful nu este în concordanță cu tipul piciorului.

Evoluția rapidă a stilului de viață și a tehnologiei a dus la implicări tot mai mari ale științei în domeniul de fabricare a echipamentelor sportive. În acest fel, la momentul actual se produc pantofi care conferă un confort ridicat în tandem cu performanța de cel mai înalt nivel. Dacă la apariția pantofilor se făceau compromisuri legate de performanță, în beneficiul confortului, acestea nu mai sunt acceptate acum.

Istoria pantofilor este strâns legată de dezvoltarea tehnologiei și a materialelor (Fig. 1.2). Primele perechi de pantofi prezervate ca mărturie datează de mai bine de zece milenii și sunt realizați din piele, au urmat cele din metal și mai apoi, treptat, ajungem la modelele pe care le purtăm în ziua de astăzi, majoritatea realizate din cauciuc și spume pentru talpă, respectiv materiale textile sau piele pentru partea superioară.



a)



b)



c)

Fig. 1.2. Tipuri de pantofi de-a lungul istoriei

Dezvoltarea încălțămintei pentru alergare își are originea în anii '60 ai secolului al XIX-lea, când pantofilor li se montau un anumit tip de crampoane metalice în talpă și erau utilizați pentru alergarea pe teren accidentat. La începutul secolului XX au fost create primele încălțări care utilizau talpa de cauciuc. Acestea erau realizate din pânză și cauciuc și au fost denumite "sneakers" deoarece te ajutau să mergi fără să te faci auzit (Fig. 1.3). Anii 1940-1960 sunt considerați decisivi în dezvoltarea pantofilor speciali pentru sport, prin apariției firmelor Adidas, Puma și Nike, alături de crearea primelor perechi speciale pentru atletism, punând bazele dezvoltării în acest domeniu.



Fig. 1.3. Evoluția pantofilor de atletism între 1860(a)-1940(b)-1960(c)

După apariția unei competiții acerbe în domeniul fabricării pantofilor sportivi și crearea unei concurențe serioase, s-a pus accent tot mai mare pe îmbunătățirea performanțelor pentru ca firmele principale să se mențină în top. Astfel, au început investițiile în cercetarea și dezvoltarea celor mai bune moduri de a distribui materialul în zona tălpii și căutarea celor mai performante combinații de materiale, care să crească și gradul de confort al purtătorului.

Anii '70 ai secolului al XX-lea aduc în prim-plan un material care revoluționează segmentul de încălțămintă, și anume, acetatul de etilen-vinil (EVA). Acest material, reprezentând o spumă cu infuzii de aer, este în prezent unul dintre cele mai utilizate materiale pentru fabricarea încălțămintei sportive deoarece are foarte bune proprietăți de amortizare a impactului și absorbție a șocului. Odată cu îmbunătățirile aduse, se observă o afinitate pentru încălțămintea ușoară ceea ce face ca mare parte a cercetării în domeniu să fie orientată pe reducerea greutateii pantofilor. În acest fel, apar și primele perechi speciale destinate femeilor. La începutul anilor '90, Nike inovează industria prin lansarea tehnologiei care utilizează bulele pe care le vedem și astăzi în modelele Air Max, cu principalul rol de a absorbi șocul din zona călcâiului și de a oferi o mai bună stabilitate prin lățirea zonei de contact dintre pantof și sol (Fig. 1.4).

Azi dispunem de pantofi cu greutate minime și performanțe maxime, datorită îmbunătățirilor aduse de-a lungul ultimelor decenii și a cercetării din acest domeniu. Provocările moderne sunt de a produce modele cât mai bune într-un timp cât mai

scurt, deoarece tehnologia a evoluat în așa fel încât modelele noi apar foarte repede pe piață, iar competiția este înverșunată.

O nouă direcție de concentrare a atenției o reprezintă utilizarea materialelor sustenabile în realizarea pantofilor, acest aspect contând din ce în ce mai mult. Astfel, materialele reciclabile și cele sustenabile sunt utilizate în realizarea echipamentului actual, dar principala caracteristica a acestora rămâne capacitatea de a ajuta atletul să-și îmbunătățească performanțele, să devină mai rapid.



Fig. 1.4. Evoluția pantofilor (modelul pentru baschet) (a) anii 1995-2000, (b) anii 2003-2007, (c) 2019

Un alt aspect important ce trebuie luat în considerare, pe lângă cele menționate anterior, este cel legat de modă, adică de modul în care sportivul dorește să fie perceput de către public. Din acest motiv foarte multe tipuri de încălțări au forme noi, neobișnuite, uneori extravagante, la fel și în cazul culorilor, acestea fiind mai accentuate sau mai sobre în funcție de personalitatea purtătorului. De aceea firmele oferă din ce în ce mai mult posibilitatea personalizării perechilor de încălțăminte, creând astfel o unicitate și oferindu-i beneficiarului sentimentul de contribuție la crearea echipamentului

De asemenea, pentru sporturile de performanță se utilizează studii individuale asupra formei piciorului și asupra tipului de mers pentru a obține cele mai bune performanțe. Astfel, au fost dezvoltate metode noi de obținere a pantofilor prin distribuirea diferită a materialului în zona de bază, pentru a oferi un imbold în performanța individuală a atletului. În acest fel se dezvoltă majoritatea încălțămintei pentru sportivi, de aceea se pune accent tot mai mare asupra cercetării din domeniul științelor legate de sport și mobilitate.

Trebuie să se țină cont și de faptul că industria de încălțăminte are ca scop obținerea profitului. De aceea, pe lângă faptul că produsele trebuie să fie competitive, să aducă un impuls performanței individuale și să ofere cea mai confortabilă și sigură purtare, acestea trebuie să fie pe placul multor oameni care sunt fani ai sporturilor sau ai brand-urilor de renume. De aceea echipamentele sportive sunt foarte des cele care deschid calea unui nou trend, o nouă modă și astfel design-ul și performanța

trebuie să prezinte o armonie (Fig. 1.5). După cum declară majoritatea revistelor de notorietate din domeniu, moda și funcționalitatea sunt parte din aceeași familie.



Fig. 1.5. Unele din cele mai bine vândute încălțăminte din lume cu venituri cumulate de peste 100 milioane de dolari (statista.com)

Înainte de a intra în detaliile intrinseci ale pantofilor, trebuie să înțelegem zonele de interes ale acestora și modul în care fiecare zonă contribuie la performanța finală (Fig. 1.6). Zonele sunt delimitate pe baza anatomiei piciorului, astfel:

- zona degetelor, situată în partea din față a pantofului, are rolul de a proteja degetele piciorului;
- zona de arcuire a vârfului piciorului, situată posterior de zona degetelor, reprezentată de distanța dintre vârf și zona de contact cu solul. Această zonă are rolul de a furniza un impuls crescut la contactul cu solul, foarte important la accelerarea în alergare;
- talpa exterioară, situată între zona de arcuire și zona mediană, cu rolul de a oferi tracțiune, deoarece reprezintă zona care se află în contact cu solul;
- zona mediană a tălpii este una foarte importantă deoarece în jurul acesteia stratul de material poate avea grosimi diferite și se pot utiliza materiale cu proprietăți ridicate de absorbție a energiei. Cele mai utilizate materiale sunt EVA și poliuretanul, alegerea sau combinarea lor făcându-se pe baza preferinței atleților și a tipului de suprafață pe care urmează să fie utilizați. Ascensiunea materialelor celulare în industria încălțăminte sportive culminează cu apariția spumei cu denumirea de "boost", creată de echipa de inovații Adidas în parteneriat cu BASF, institut de cercetare în industria chimică din Germania. [4];
- zona călcâiului, ultima zonă a tălpii piciorului, dar poate cea mai complexă deoarece are rolul de a amortiza șocul de la contactul cu solul și de a menține glezna într-o poziție corespunzătoare în vederea evitării accidentărilor. În această zonă se poate reduce sau crește cantitatea de material în funcție de anatomia purtătorului;
- zona superioară a pantofului, formată din protecția din zona călcâiului, brant (o combinație de spumă și material textil care acoperă interiorul pantofului cu rolul de a fixa cât mai bine pantoful pe picior) și limba (cu rolul de a crește

protecția și confortul). Partea superioară este confecționată din material textil, de obicei este o țesătură de tip plasă, și trebuie să fie realizată dintr-un material ușor, care să ofere protecție piciorului și totodată să ofere un confort sport și posibilitatea piciorului să respire.



Fig. 1.6. Anatomia unui pantof de alergare (runningmag.ro)

1.2.2.1. Structura încălțăminteii

Modul în care este fabricată încălțăminteii are o importanță crucială în consolidarea proprietăților finale. De aceea se pune accent tot mai mare asupra formei pantofilor și a distribuției de materiale în compoziția acestora.

Analiza mersului reprezintă un mod foarte eficient de a înțelege și determina distribuția plantară a forțelor și modul în care acestea se modifică odată cu mișcarea labei piciorului. Astfel se pot determina cu exactitate zonele în care este necesară o amortizare mai crescută sau o rigidizare a piciorului în funcție de anatomia unică a fiecărui sportiv. De asemenea, în realizarea pantofilor se ține cont de întrebuintarea acestora, astfel, au fost create categorii pentru fiecare sport competitiv iar modelele au diferențe substanțiale ale proprietăților. Spre exemplu, se utilizează tălpile din materiale moi sau lipicioase pentru a oferi o tracțiune cât mai mare, iar pentru a reduce coeficientul de frecare se vor utiliza materiale precum pielea sau PVC-ul. La fel și pentru partea superioară a pantofilor se diferențiază materialele utilizate în funcție de necesități. Astfel, se pot utiliza materiale flexibile sau rigide în funcție de sportul practicat. Grosimea zonei mediane se poate modifica prin crearea unei zone mai bombate la nivelul tălpii pantofilor. Prin ajustarea acesteia se poate crește gradul de manevrabilitate a încălțăminteii pe diferite terenuri.

Spre exemplu, în practicarea tenisului, performanțele sunt foarte mult influențate de forma pantofilor și de materialul din care aceștia sunt fabricați. Majoritatea pantofilor de tenis trebuie să confere o bună rigiditate în zona călcăiului și o zonă flexibilă în partea din față, lăsând zona mediană să amortizeze șocurile. Pe lângă acestea, facilitarea unui grad mare de mișcare, asemănător celui natural, este un plus din punct de vedere al performanțelor. Trebuie să existe o complementaritate

între forma și distribuția materialului și tipul de suprafață pe care este utilizat. Pentru un teren cu suprafață dură este nevoie de o talpă cât mai rigidă dar care are proprietăți crescute de amortizare a șocurilor produse de desprinderile repetate și rapide de la sol. Partea superioară trebuie să fie rezistentă și ușor mai rigidă pentru a asigura stabilitatea în timpul mișcării. Pentru suprafețele care îngreunează mișcarea, de tipul terenurilor de zgură, este indicat să se utilizeze pantofi care au talpa de forma osului de pește și zona laterală întărită cu material suplimentar pentru a avea un suport lateral crescut în timpul mișcării. Aici sunt recomandați pantofii realizați din materiale rezistente la deteriorare, deoarece condițiile în care sunt folosiți sunt mai dificile. Este necesară o fixare foarte bună în partea superioară, iar talpa trebuie să ofere o tracțiune cât mai bună, concomitent cu o încărcare redusă cu zgură (aceasta aderând foarte repede la talpa pantofilor). Pentru tenisul pe iarbă se utilizează o talpă aproape plată pentru pantofi, iar partea superioară este recomandat să fie realizată din materiale flexibile, care nu restricționează mișcarea piciorului [5].

Forma și dimensiunea canelurilor de pe zona de cauciuc a tălpii pot să varieze foarte mult în funcție de necesitate. Acestea sunt mai mici pentru un teren de iarbă, respectiv mai numeroase și mai largi pentru un teren cu zgură (Fig. 1.7). Talpa pantofilor este creată special pentru mișcare de tip înaintare, iar astfel trebuie să se țină cont de echilibrarea piciorului și de factorii de deteriorare a canelurilor de pe talpă pentru a putea dobândi performanța maximă.

Proprietățile superioare ale echipamentelor sunt datorate materialelor din care sunt fabricate. Întrebuințarea materialelor este condiționată de sportul practicat, dar acestea au rolul de a crea un pantof care să se așeze perfect pe picior. Materialul pentru talpa pantofului trebuie să fie mai rigid sau mai moale, să confere mai multă sau mai puțină tracțiune, în funcție de viitoarea utilizare. Materialul de căptușeală servește ca zonă de trecere de la picior la pantof. Aceasta are rolul de a absorbi transpirația din încălțăminte și de a evita evacuarea acesteia în exterior, spre materialul superior. Materialele des utilizate pentru căptușeală sunt de tipul țesăturilor, acestea fiind realizate cu ajutorul fibrelor sintetice (nylon, poliester) sau naturale (bumbac, mătase). O altă proprietate de care trebuie să se țină cont este izolarea termică. Utilizat în condiții de climat rece, echipamentul are nevoie de micro-fibre termice, care sunt folosite ca izolație [6].



Fig. 1.7. Diverse tălpi pentru pantofii de tenis

Celelalte părți ale încălțăminteii sunt frecvent atașate de un branț. Talpa interioară trebuie să fie absorbantă și să aibă permeabilitate pentru umezeală. Alte proprietăți ale branțului sunt flexibilitatea, durabilitatea, greutatea ușoară, uniformitatea, inhibarea bacteriilor, integritatea structurală și rezistența la transpirație și petele de murdărie.

În continuare sunt prezentate unele modele care încearcă să îmbunătățească proprietățile mecanice ale pantofilor sportivi. Fie că îmbunătățirea se referă la calitatea preluării șocului și înmagazinarea energiei sau la confort și stabilitate, unele modele duc gândirea creativă la un alt nivel (Fig. 1.8).



a) Enko Running Shoes



b) Reeboks ATV 19



c) Adidas Springblade Nanaya



d) Nike Shox R4



e) Adidas Yeezy 450



f) Adidas Bounce shoes

Fig. 1.8. Modele de încălțăminte sportivă

Unele din cele mai exclusiviste modele, precum cele realizate de Enko, au încorporat în talpă un sistem mecanic de absorbție a șocurilor, pentru a reduce energia produsă de contactul repetat cu solul, Fig. 1.8(a). Acest model este realizat cu două tălpi, un design care reduce riscul de accidentare și conține un arc reglabil în funcție de masa persoanei care folosește echipamentul. De asemenea, sunt concepuți pentru a lua în considerare faptul că unele persoane suferă de pronăție sau supinație. În acest fel se poate echilibra pe una din părți pentru a evita disconfortul în timpul alergării. Reducerea greutății pantofilor se realizează prin utilizarea țesăturilor ușoare care să asigure și ventilația în zona superioară. Talpa conține crampe interschimbabile, un întrerupător care ajustează modul de utilizare și un arc reglabil,

toate acestea oferind șansa de a crește performanțele atletului. Modelele (b),(c) și (d) utilizează conceptul de transfer direcțional de energie și reprezintă echipamente care transformă energia preluată din absorbția șocului sub forma unei forțe de recul, care să producă o accelerare mai mare în momentul desprinderii de pe sol [7]. Acestea au ca scop crearea unui avantaj pentru sportivul care utilizează echipamentul, prin creșterea vitezei de-a lungul direcției de mișcare a corpului.

Adidas Yeez, Fig. 1.8(e), reprezintă un exemplu perfect de personalizare a echipamentului sportiv. Acest model reprezintă un echipament ineficient pentru sporturile de performanță, dar are un cost foarte ridicat din cauza modului de prezentare și asocierea unui brand de elită cu o vedetă foarte populară. Astfel, se poate arăta cum moda influențează foarte mult produsele vândute, uneori fiind mai important felul în care arată un pantof, în detrimentul performanțelor sale.

După prezentarea unor echipamente care au aplicabilitate scăzută în cadrul sporturilor de performanță, urmează și modelele care nu doar promit o îmbunătățire, ci chiar o oferă. Un model ce conferă stabilitate suplimentară prin creșterea lățimii tălpilor, cu un design special creat pentru a oferi un confort de durată, este ilustrat în Fig. 1.8(f). Modelul este conceput pentru a amortiza șocurile, atât pe direcția de locomoție, cât și pe direcția tangențială acesteia. De asemenea, sunt utilizate materiale reciclabile pentru partea superioară, în vederea reducerii deșeurilor din mediul înconjurător. Bounce are o talpă specială ce conține tuburi cu secțiune transversală în formă de Θ încorporate. Transferul direcțional de energie, alături de rigiditatea pantofului, sunt parametri ce pot fi modificați cu ajutorul orientării tuburilor și a lungimii acestora. Legat de transferul direcțional al energiei sunt mai mulți parametri care caracterizează energia returnată în timpul alergării. Dintre aceștia se remarcă energia returnată în direcție orizontală (în direcția de locomoție) și energia totală a sistemului. Prin modificarea unghiului acelor tuburi se poate observa o îmbunătățire a accelerării sportivului [8].

1.2.2.2. Materiale utilizate

Materialele utilizate pentru fabricarea încălțămintei sportive se împart în două categorii: materiale pentru partea superioară și materiale pentru talpă.

Pentru partea superioară se utilizează multe materiale textile. Acestea au ca materie de bază fibrele, care pot fi naturale sau artificiale. Fibrele naturale, în special bumbacul, se utilizează pentru zona de susținere a gleznei, partea din spate a pantofului, datorită costului redus. De asemenea, firmele producătoare sunt permanente la activitățile sociale ale utilizatorilor. De aceea, se încearcă tot mai mult utilizarea materialelor biodegradabile, naturale. A fost introdusă încălțămintă cu procente foarte mari de fibre de bumbac, pentru a crea modele din materiale vegane, ținând cont de procentul ridicat de persoane care adoptă acest stil de viață. Ca materiale textile sintetice sunt folosite nylon-ul, poliamida, poliesterul, polipropilena și polietilena. Pentru a crea pantofi cât mai ecologici se pot utiliza materialele plastice reciclate și procesate. Țesăturile simple sunt foarte utilizate în realizarea învelișului superior, dar se pot utiliza și în componența căptușelii, materialul tricatat fiind folosit pe post de suport deoarece oferă durabilitate și rezistență suplimentară [9].

Textilele sunt adesea acoperite cu poliuretan și cu policlorură de vinil, utilizate în special pentru că sunt flexibile, durabile, oferă protecție suplimentară și pot crea un design modern. Se utilizează și foarte multe micro-fibre pentru că acestea sunt elastice și rezistente la rupere, despicare și abraziune. Micro-fibra este de asemenea permeabilă la vapori și permite piciorului să respire [10].

Un material foarte utilizat în trecut, dar care își pierde din popularitate datorită dilemelor sociale, este pielea. Ca material pentru încălțăminte, este respirabil, confortabil, poros, izolant și estetic. Pielea poate fi tratată și considerată rezistentă la apă, ceea ce este important în fabricarea pantofilor pentru sporturile practicate pe terenuri umede precum golf, fotbal sau rugby.



Fig. 1.9. Materialele reciclabile utilizate în componența pantofului de alergare

Materialele organice și reciclabile utilizate și zonele unde se pot folosi în design-ul unui pantof sunt prezentate în Fig. 1.9. Se poate observa în zona 1 eticheta care specifică amprenta de CO₂ pe care fabricarea unei perechi o are asupra mediului. Punctul 2 reprezintă talpa intermediară, fabricată din 10-20% conținut de trestie de zahăr, 3 este talpa exterioară, realizată din 10-15% cauciuc natural. Următoarele cifre, reprezentând segmente ale pantofului superior, sunt realizate din poliester reciclat (4,5,7,8), în proporție de minim 70% și chiar 100% (5,7,8). În zona superioară sunt utilizate și materiale organice precum fibrele din celuloză în proporție de 30% (4) și fibre realizate din trestia de zahăr (6) în proporție de 30%.

Reciclarea materialelor de către marii producători ajută la reducerea cantității de plastic din oceane și reutilizarea acestuia sub forma fibrelor de plastic. Producătorii de clasă mondială doresc să utilizeze poliesterul reciclabil la scară largă și să reducă impactul asupra planetei. Acest lucru se întâmplă și cu materialele utilizate pentru talpa pantofilor. Nike oferă informații legate de modul de reciclare și reutilizare a tălpilor pentru modelele Nike Air, afirmând că peste 50% din materiale sunt reciclate. Deși poliesterul virgin este cea mai utilizată fibră în industria vestimentară, cantitatea reciclată la nivel global este de doar 10%

Pentru că industria nu se rezumă doar la performanță, aspectul este una dintre principalele surse de venit ale companiilor. Cele mai bine vândute echipamente sunt acelea care realizează o complementaritate între performanțe și aspect. Pentru aceasta, materialele utilizate în realizarea pantofului superior trebuie să poată lua anumite forme, să fie respirabile și să fie atragătoare. Se utilizează fibrele polimerice, ca nylonul și poliesterul pentru a realiza echipamente ușoare și durabile, lycra pentru a crește elasticitatea și pânza de bumbac pentru a avea un aspect unic.

Pentru utilizarea unui anumit material textil se iau în considerare dimensiunea firului, compoziția fibrei, modelul de țesătură, materialul de ranforsare și tratamentele la care sunt supuse. Proprietățile fizice și aspectul final sunt rezultatul materialelor utilizate. Astfel sunt utilizate materiale elastice precum lycra pentru legături și

căptușeli, bumbac pentru pantofii vulcanizați din cauza topirii fibrelor sintetice, pânza de bumbac pentru exteriorul pantofilor. Tipurile de țesătură sunt esențiale în realizarea echipamentelor și au diferite proprietăți fizice. Dintre acestea, cele mai utilizate sunt țesătura simplă, de tip twill, satin, coș, olandeză și Doddy. Materialele cu un aspect 3D sunt utilizate pentru partea superioară și laterală a echipamentelor de alergare și este un criteriu tot mai întâlnit în realizarea pantofilor de competiții. Fibrele sunt tratate înainte de a fi utilizate, apoi sunt combinate cu diferite rășini pentru a fi acceptate ca materiale de fabricație a pantofilor. Materialele de acoperire a fibrelor sunt poliuretanul transparent, mai ieftin, prin care se pot observa fibrele, nefiind rezistent la apă, și PVC-ul, rezistent la apă, prin care nu se pot observa fibrele, oferind o senzație mai bună de fixare [7].

În realizarea pantofilor sunt luați în considerare mai mulți factori, dar atunci când se alege o talpă ideală, mișcările piciorului și ale corpului au nevoie de o atenție specială. Proprietățile funcționale ale tălpii sunt durabilitatea, impermeabilitatea și stabilitatea dimensională, iar pentru o performanță maximă trebuie luate în considerare și efectele modificării de temperatură și implicațiile pe care le au acestea asupra amortizării. Informațiile legate de aceste proprietăți se pot obține prin testarea materialelor constituente și interpretarea rezultatelor acestora. Spumele utilizate pentru realizarea tălpilor pantofilor sportivi sunt testate la diferite temperaturi pentru a observa modul de comportare și pentru a prezice cât mai corect performanțele ulterioare [11].

Materialele poliuretane, introduse în anii '70, având un amestec unic de durabilitate și masă redusă, au jucat un rol important în dezvoltarea echipamentelor sportive. Pentru pantofii de sport, acestea se pot utiliza la fabricarea tălpii exterioare, a tălpii intermediare, cât și în componența tălpii interioare.

Pentru a enumera materialele utilizate în realizarea pantofilor de sport se face o prezentare a evoluției acestora în ultimele decenii. Pentru realizarea pantofilor, înainte de anii 2000, se utilizau legături de nylon, piele, fibre naturale, poliester, sub formă de țesături sau plase, spume poliuretane, EVA, cauciuc, cauciuc termoplastic (material care conține caracteristicile cauciucului și ale plasticului). Odată cu evoluția tehnologiilor, s-au dezvoltat alte metode de țesere și s-au introdus mai multe game de materiale. Astăzi se folosesc țesături 4D realizate în programe speciale, ranforsările superioare se realizează din ionomeri de tip Surlyn, iar duritățile tălpilor intermediare sunt măsurate și menținute la parametrii care să aducă un confort individual. Se utilizează combinații de poliuretan (poliuretan termoplastic) și EVA pentru a obține cele mai bune performanțe ale tălpii și pentru amortizare și uneori pentru aspect, se pot utiliza bule de aer umplute cu nitrogen. Materialul trebuie să ofere un suport adecvat pe toată durata de viață a produsului. Un echipament prea rigid are o amortizare slabă, improprie multor aplicații (alergarea, baschetul) din cauza numărului foarte mare de solicitări de impact. Un material prea moale poate face ca talpa interioară să se comprime foarte mult în timpul impactului, ceea ce conduce la disconfort sau accidentări ale piciorului.

Tipurile de poliuretan utilizate în realizarea echipamentelor sportive sunt clasificate în: spume flexibile, spume rigide, elastomeri, compoziții pentru fibre sau filme, învelișuri pentru suprafețe sau chiar adevizi. Aceste spume sunt utilizate pe scară largă deoarece sunt versatile, se procesează ușor, sunt eficiente sub aspectul costului și se pot realiza în diferite configurații pe baza unei densități dorite.

Alegerea ideală pentru alergările prelungite este poliuretanul, iar pentru sporturile în care mișcările sunt multidirecționale și este nevoie de o absorbție foarte bună a șocurilor se utilizează EVA. Combinația celor două materiale îmbunătățește mult performanțele pentru anumite categorii de sporturi. Alegerea materialelor ideale

pentru talpa pantofului se face în funcție de mai mulți parametri, dar performanța este decisă de combinația și structura finală a acestora.

Tabelul 1.1. Materiale poliuretanic utilizate în fabricarea încălțăminte de sport

Material	Denumire comercială	Descriere
Poliuretan	Elastopan	Elastopanul reprezintă unul din cele mai utilizate materiale pentru încălțăminte. Foarte multe modele personalizate au la bază acest material. Îmbunătățește performanța, are o funcționalitate foarte bună și este confortabil.
Poliuretan termoplastic	Elastollan	Elastollan-ul asigură o performanță ridicată într-o varietate largă de aplicații. Poliuretanul termoplastic, utilizat în industriile de echipamente sportive, este un material versatil, adaptabil pentru automatizare, ceea ce îl face foarte util în modelarea produselor și obținerea unor forme complexe.
Poliuretan termoplastic expandat	Infinergy (E-TPU)	Infinergy (E-TPU) a revoluționat industria încălțăminte de performanță. Depășind toate așteptările în ceea ce privește performanța și confortul, designul său iconic este un succes pentru clienți. Este utilizat în echipamentele de performanță și în competiții.

Tabelul 1.2. Avantaje și dezavantaje ale utilizării PU sau EVA în compoziția tălpilor

Poliuretan		EVA	
Avantaje	Dezavantaje	Avantaje	Dezavantaje
Rezistență la compresiune	Densitate mare față de EVA	Densitate scăzută	Se comprimă ușor
Returnarea energiei în timpul deplasării	Probleme cu distribuția uniformă a greutateii	Amortizează foarte bine șocurile	Suferă deformări ireversibile după o utilizare prelungită
Durată de viață crescută	Cost mai ridicat	Material moale	Posibilitate de a absorbi apa
Oferă un foarte bun suport pentru gleznă		Se modelează foarte bine pe picior	
Amortizare bună a șocurilor		Distribuie foarte bine greutatea corpului	
Proprietățile nu se schimbă la alergarea pe distanțe lungi		Poate lua diverse forme complexe, formând un design unic	

1.2.2.3. Materiale celulare utilizate

Materialele celulare sub formă solidă sunt realizate din rețele interconectate de bare sau „plăci” care formează marginile, respectiv pereții celulei. În fabricarea echipamentelor sportive sunt folosite materialele celulare polimerice, în special spume, utilizate ca sisteme pentru amortizarea și absorbția energiei cinetice la impact, având proprietăți de înmagazinare a energiei și returnare parțială a acesteia. Folosirea lor pe scară largă se datorează proprietăților foarte bune, derivate, în esență, din tipul de material și structurile celulare utilizate [12]. În exemplul din Fig. 1.10 sunt prezentate aranjamentele celulelor din care sunt realizate spumele folosite în realizarea echipamentelor sportive.

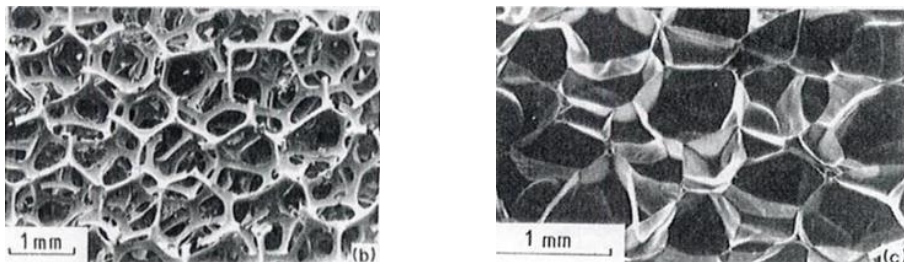


Fig. 1.10. Exemple de solide celulare: spumă 3D cu celule deschise (a), spumă 3D cu celule închise (b) [12]

O structură cu partea solidă concentrată doar în cadrul pereților reprezintă o *spumă cu celule deschise*, astfel, putem spune că două celule consecutive sunt conectate prin fețe deschise. Dacă fețele celulelor sunt pline, conțin material solid, două celule învecinate vor împărți același perete, rezultatul fiind o *spumă cu celule închise*. Desigur, există și spume hibride, formate din celule parțial închise și celule parțial deschise, utilizate pentru ajustarea densității relative a produsului final [12].



Fig. 1.11. Structuri celulare utilizate în crearea pantofilor

Pornind de la structurile de bază prezentate, producătorii de încălțăminte încearcă să realizeze structuri complexe, care să îmbunătățească performanțele echipamentelor sportive prin reducerea greutateii acestora, grade diferite de amortizare de-a lungul tălpii sau înmagazinarea și returnarea direcțională a energiei în timpul alergării.

Unele modele utilizează conceptul de structură celulară cu pereți deschiși, iar altele folosesc structurile cu pereți închiși. Aceste două tipuri de celule pot să apară simultan în fabricarea încălțăminte sportive, dar în zone diferite (exemplul prezentat în Fig. 1.13). De asemenea, se iau în considerare și densitățile celulelor, în special pentru realizarea pantofilor rezistenți la apă, care conțin spume cu celule închise și densitate mare a acestora pe unitatea de volum.

În 2017 au apărut pentru prima dată tălpile realizate prin printare 3D. Adidas "Futurecraft 4D", Fig. 1.11 (a), reprezintă primul model care folosește structurile celulare printate pentru realizarea tălpii. Aceștia sunt concepuți pentru a oferi un confort crescut și un aspect aparte folosindu-se de tehnologiile noi și revoluționare. Prin introducerea modelelor prototipate, firmele doresc să scoată în evidență și capacitatea de reciclare a materialelor utilizate. Astfel se utilizează materiale ce pot fi reprocesate după încheierea ciclului de viață al produsului. Aceste procedee sunt tot mai ample, deoarece se dorește ca industria de încălțăminte să producă din ce în ce mai puține deșeuri. Tălpile printate vin în combinație cu țesături speciale, care permit piciorului să respire și conferă o stabilitate crescută, unică fiecărui atlet datorită tehnologiei care poate să micșoreze sau să crească densitatea de celule din zonele afectate de șocuri. Un alt aspect care ține de ecologie este posibilitatea utilizării plasticului reciclat din oceane în vederea realizării materialului pentru prototiparea 3D a tălpii de pantofi [7].

În perioada 2012-2018 s-au testat foarte multe macrostructuri pentru a realiza tălpi care să crească aderența sportivilor pe orice suprafață. Astfel au fost dezvoltate tălpile care se aseamănă cu cea din Fig. 1.11 (b). Acestea folosesc ca premisă așezarea celulelor și densitatea acestora pentru a crea cea mai bună configurație, care să îmbunătățească performanțele pantofilor. Echipele de cercetare ale mai multor companii producătoare au creat variante de astfel de structuri, unele mai bune decât altele, dar, în general, acestea nu ofereau și confortul de care are nevoie un sportiv. Încălțările foloseau tălpi din material plastic cu proprietăți scăzute de absorbție a șocului, impactul cu solul resimțindu-se la nivelul piciorului.

Ultimii ani au adus îmbunătățiri majore ale proprietăților de amortizare a șocurilor și înmagazinare-returnare de energie. Un design inovator și promisiunea unor îmbunătățiri pe măsură este prezentat de forma pantofilor de la compania Mizuno, modelul Enerzy, Fig. 1.11 (c). Cercetarea structurilor celulare și a modului de aranjare a celulelor permite revoluționarea modului de fabricație a încălțăminte sportive. Cei de la Mizuno au reușit să combine două materiale considerate moi și să realizeze un model care permite reutilizarea energiei consumate în timpul alergării. Acest lucru este posibil prin folosirea spumelor celulare de tip EVA, în combinație cu o zonă centrală (denumită Enerzy Core) realizată dintr-un cauciuc special extrem de moale, cu realizarea unei spume celulare compozite ușoare și performante. De asemenea, structura celulară externă este vizibilă și are rolul de a atrage atenția prin noutate [13].

Modelele de încălțăminte sportivă ale companiei Adidas utilizează spume cu celule închise, realizate din acetat de etilen-vinil presat la cald sau spume de tip "boost" (poliuretan termoplastice sub formă granulară, expandate printr-un procedeu special, pentru a realiza celule cu pereți închiși în jurul unor bule de aer foarte mici).

Boost reprezintă o combinație de particule de poliuretan termoplastice foarte elastic, topite și apoi procesate pentru a lua forma tălpii încălțăminte. Boost este produsul cercetării comune dintre Adidas și compania germană BASF. Badische Anilin und Soda Fabrik este cel mai mare producător de produse chimice din lume și se concentrează pe produse cu grade înalte de performanță, materiale și soluții funcționale pentru diverse industrii. BASF a creat tehnologia spumei cu celule închise, realizate din particule elastice de poliuretan termoplastice, care poartă denumirea comercială "Infinergy".

Primul model de încălțăminte, utilizat în competiții, realizat cu spuma de tip boost a fost Adidas Energy Boost (Fig. 1.12). Prima caracteristică măsurabilă a fost proprietatea de revenire la starea inițială după o durată lungă de utilizare, urmată de rezistența la alergarea în medii diferite de temperatură.

Cel mai important beneficiu al utilizării spumelor de tip boost este dat de capacitatea acestora de a înmagazina energia consumată în timpul deformării și de a o returna alergătorului sub forma unui impuls în momentul desprinderii de pe sol. Astfel, un sportiv ar putea alerga aceeași cursă cu mai puțin efort sau poate alerga mai repede utilizând aceeași cantitate de energie [4, 7].



Fig. 1.12. Materialul boost (poliuretan termoplastice) și produsul final

Beneficiile tehnologiilor moderne sunt evidente când vine vorba de confort și performanță. Amortizarea șocurilor reprezintă principala calitate căutată de atleți, în special pentru pantofii de antrenament pe teren accidentat sau în condiții speciale de temperatură.

Companiile se bazează pe materiale cu proprietăți foarte bune de amortizare pentru a realiza încălțăminte de competiții. Dar când materialele își ating potențialul maxim, se caută modificarea formei pentru a crește performanțele. Astfel, au fost dezvoltate spumele cu structuri celulare și au crescut orizonturile de cercetare ale instituțiilor de vârf. Pentru spumele utilizate în pantofii de performanță se introduc structuri celulare. Aceste structuri, formate din celule închise în cea mai mare parte, au roluri specifice în funcție de zona în care sunt distribuite, de la amortizare ridicată, la creșterea confortului sau o mai bună absorbție a umidității.

Pentru vârful pantofilor se pot utiliza spume poliuretane cu pereți deschiși sau închisi, iar pentru zona călcâiului se utilizează spume din PVC cu pereți închisi pentru a crește rigiditatea, dar și confortul din zona respectivă [7].



Fig. 1.13. Distribuția spumelor celulare într-o pereche de pantofi de sport [7]

Pentru a determina duritatea unei tălpi pentru încălțăminte se utilizează, de regulă, un durometru Asker de tip C, acesta fiind standardul "de facto" în lume, pentru măsurarea cauciucurilor moi și a spumelor elastomerice. Spumele celulare utilizate în fabricarea pantofilor au valori în intervalul 25 - 60 măsurate pe durometrul Asker.

În tabelul 1.3 sunt prezentate proprietățile fizice ale acetatului de etilen-vinil și poliuretanului, două din cele mai utilizate spume pentru fabricarea tălpii intermediare a încălțăminte sportive. Comparativ, EVA este un material mai ușor, care se comprimă mai mult decât poliuretanul, astfel pierzând din capacitatea de amortizare. Poliuretanul primează ca alegere pentru fabricarea încălțăminte din cauza proprietăților foarte bune de înmagazinare a energiei, acesta având capacitatea de a amortiza mult mai bine șocurile din timpul efortului.

Tabelul 1.3 Comparatie între proprietățile fizice și mecanice ale EVA și PU

Proprietăți	EVA	PU
Densitate (kg/m^3)	200-240	280-400
Duritate (Asker)	50-62	45-60
Rezistența la tracțiune (MPa)	~2,7	~3,2
Elongație la rupere (%)	~230	~350
Rezistența la rupere (MPa)	~4,5	~3,5
Rezistența la compresiune (MPa)	~58	~5

Un inconvenient major al materialelor realizate din spume este dependența de temperatură. Cu cât valoarea temperaturii este mai joasă, cu atât materialele devin mai puțin elastice. Datorită acestor variații, la creșterea temperaturii, amortizarea și stabilitatea încălțămintei pot să-și piardă din performanțe [14]. Testele efectuate asupra spumelor utilizate relevă faptul că materialele mai moi reduc valoarea forțelor transmise în timpul interacțiunii dintre pantof și sol, datorită unei durate mai lungi de contact. Astfel, impactul resimțit de picior este redus și acțiunea asupra oaselor este ameliorată. Din aceste precizări, se poate observa importanța variațiilor de elasticitate cu temperatura pentru materialele utilizate în realizarea tălpilor de pantofi și se înțelege de ce sunt atât de necesare testele în medii cu temperaturi variate. Valoarea temperaturii la care este supusă spuma depinde de mai mulți factori, aceasta crește în primele minute de utilizare și apoi se realizează un echilibru termic relativ. Factorii cu rol esențial în modificarea temperaturii încălțămintei sunt: temperatura piciorului, frecarea dintre picior și încălțăminte, modul de comprimare a tălpii și temperatura mediului.

În realizarea echipamentelor sportive sunt foarte importante testele și verificările. Standarde mecanice, precum ASTM-F-1614, sunt utilizate pentru a determina proprietățile de amortizare ale materialelor celulare realizate din spumă.

Testele mecanice trebuie să fie corelate cu observațiile biometrice asupra fiecărui sportiv, deoarece s-a raportat că aceste reglementări nu reproduc foarte bine forțele de impact ce intervin la utilizarea pantofilor de sport. Prin testarea standardizată se pot obține rezultate cu privire la amortizarea produselor finale, dar nu se pot trage concluzii legate de îmbunătățirea comportamentului acestor spume.

Observațiile clinice oferă informații despre modul de apariție a șocului în timpul mersului și despre distribuția forțelor la nivelul piciorului. Studiile arată două momente cu intensitate crescută, unul fiind la contactul pantofului cu solul, iar celălalt la atingerea maximului forței musculare active. Absorbția șocurilor depinde de structura celulară, în special de densitate și modulul elastic, dar distribuția grosimii de strat trebuie realizată astfel încât amortizarea să fie maximă pentru fiecare individ. Astfel, se poate concluziona că este obligatorie o corelație între proprietățile mecanice și observațiile clinice [15].

Materialele utilizate în realizarea spumelor pentru echipamentele sportive trebuie să fie de calitate superioară, oferind proprietăți mecanice foarte bune și o durabilitate crescută. Dintre principalele proprietăți se remarcă:

- *Densitatea* spumei este unul din factorii esențiali, deoarece aceasta determină performanțele materialului și costul final de fabricare a echipamentelor. Prin evaluarea densității se poate determina raportul dintre materialul polimeric și aerul din compoziția spumei. Reprezentând raportul dintre masă și unitatea de volum, densitatea va defini majoritatea performanțelor finale. Aceasta se poate lua în considerare, alături de temperatura și umiditatea mediului în care sunt utilizate materialele, pentru a efectua teste de compresiune asupra spumelor, în condiții cât mai reale. Prin modificarea structurii interioare și fabricarea produsului final pe baza spumelor cu pereți deschiși, închiși sau micști se poate menține o anumită valoare a densității.
- *Duritatea* spumei este un factor care indică greutatea la care poate fi supusă și joacă un rol important în capacitatea acesteia de a amortiza șocurile în timpul utilizării.
- *Modulul de elasticitate al spumei și rezistența mecanică* oferă informații despre sarcina de încărcare și despre deformația rezultată. Elasticitatea unei spume este esențială pentru realizarea echipamentelor sportive, deoarece

acestea suferă comprimări și decomprimări succesive, iar capacitatea de revenire a spumei după o anumită deformare trebuie cunoscută.

- *Rezistența la oboseală* este importantă în determinarea duratei de viață a spumelor. Spumele oferă proprietăți excelente de amortizare pentru o durată lungă, de luni sau ani de zile, de aceea trebuie să fie rezistente la oboseală.
- *Confortul*, deși nu este o proprietate cuantificabilă analitic, este unul din cei mai întâlniți termeni în industria echipamentului sportiv. Senzația pe care un material o lasă și modul în care piciorul se așază într-un pantof sunt foarte importante și vin cu o categorie specială de cerințe. Confortul și performanțele crescute duc la creșterea posibilității de vânzare a echipamentelor.

Medicina recuperatorie necesită o clasă specială de echipamente. Structurile celulare care pot fi create în fabricarea spumelor sunt ideale pentru a proiecta echipamente care să ajute fixarea și sprijinirea membrilor sau articulațiilor, deoarece, pe lângă proprietățile ridicate, vin cu o masă scăzută, care nu reduce posibilitatea de mișcare. Un domeniu care folosește spumele poliuretanică este fabricarea încălțămintei pentru persoanele ce suferă de diferite boli de piele sau accidentări la nivelul piciorului, care îi obligă să folosească materiale ușoare dar cu o stabilitate crescută [16].

Comportamentul la compresiune al unei spume este evidențiat prin apariția a trei zone distincte. Examinarea graficului tensiune-deformație specifică se face prin delimitarea acestor zone. Un exemplu de curba tensiune-deformație specifică este ilustrat în Fig. 1.14. Se observă zona de răspuns liniar elastic al materialului încă de la începutul aplicării forței de compresiune. Această zonă se caracterizează prin legătura direct proporțională dintre tensiune și deformație. Urmează zona de platou, unde deformația crește în continuare, dar tensiunea rămâne la un nivel aproape constant. Această zonă necesită o atenție specială deoarece de aici se extrag informațiile legate de înmagazinarea energiei și gradul de amortizare pe care îl asigură spuma. În ultima zonă se observă o densificare a materialului. Aici spuma se comportă ca un material compact, iar cedarea structurii celulare impune o creștere a tensiunii necesare producerii unei deformări suplimentare. Creșterea temperaturii provoacă reducerea zonei liniar-elastice și a zonei de platou, dar păstrează valori ridicate în zona de densificare (Fig. 1.14) [9].

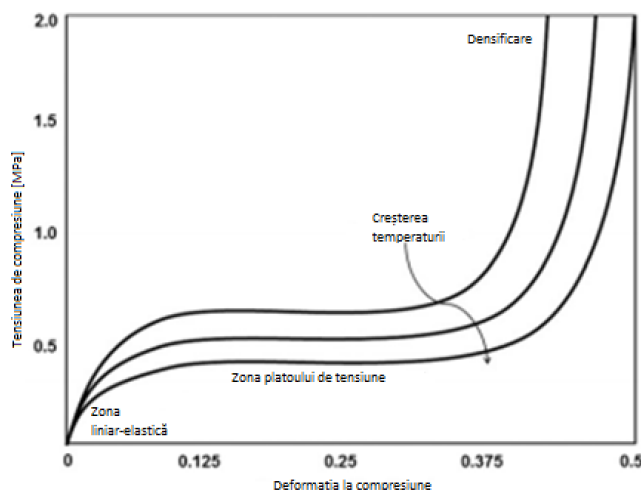


Fig. 1.14. Reprezentarea tensiune-deformație pentru încercarea de compresiune

Variația temperaturii afectează absorbția energiei de către spumele elastomerice. Scăderea temperaturii face ca spumele să-și piardă din elasticitate și să devină mai rigide, pe când creșterea de temperatură conduce la o creștere a elasticității. Ambele cazuri sunt problematice deoarece înmagazinarea energiei se modifică odată cu temperatura. Comprimarea materialului conduce la înmagazinarea în interiorul structurii a unei anumite cantități de energie, care poate fi redată sub formă de energie reutilizabilă de atlet, ușurând desprinderea de pe sol în timpul decomprimării. Prin reglarea nivelului de absorbție al spumelor se poate menține un ritm de alergare constant, dar efortul pe care atletul trebuie să îl susțină este mai redus. Astfel, se remarcă importanța înțelegerii și reglării nivelului de energie absorbită la nivelul tălpii încălțăminteii. O pereche de pantofi de sport care utilizează o spumă moale poate absorbi și reduce șocurile la contactul cu solul, pe când o spumă fermă poate propaga undele de șoc la nivelul articulațiilor. În timpul competițiilor sportive se vor alege perechile de pantofi și în funcție de temperatura mediului extern și a solului, pentru a reduce efortul muscular necesar fiecărui pas. Un alt aspect de considerat este rigidizarea spumelor cu temperatura, aceasta crescând gradul de efort și, prin urmare, riscul de accidentare pe vreme rece [6, 17, 18].

1.2.3. Echipamente de protecție a corpului

Protejarea corpului este esențială în sporturile extreme sau de contact. Rugby-ul, fotbalul, cursele de mașini sau boxul implică riscuri mari de accidentare prin contactul cu un obiect rigid sau cu o altă persoană. Din acest motiv este necesară protejarea cât mai bună a zonelor cu risc crescut de lovire.

În protejarea corpului se utilizează mai multe tipuri de materiale din clasele compozitelor sau spumelor. Cele mai comune sunt prezentate în tabelul 1.4.

Echipamentele de protecție trebuie să ofere o foarte bună rezistență la impact, acestea constituind primul strat de apărare al sportivului. Materialul din care sunt realizate trebuie să absoarbă șocurile și să fie cât mai ușor și confortabil pentru a nu îngreuna libertatea de mișcare a purtătorului. Cercetările se realizează pe materialele care au o rată mare de absorbție a șocului și care înmagazinează cât mai multă energie la impact.

Materialele compozite se utilizează frecvent pentru zonele rigide ale echipamentelor sportive, precum apărătorile tibiei, umerilor sau încheieturilor. Se pot utiliza diverse combinații de materiale, în funcție de proprietățile necesare.

Structurile de tipul fagure de miere sunt utilizate pentru a realiza echipamente de protecție a tibiei sau a umerilor. De asemenea, din ce în ce mai mulți producători realizează țesături tridimensionale în diverse forme. Aceste structuri sunt materiale compozite, realizate de cele mai multe ori dintr-o spumă specială și foi subțiri care acoperă spuma. Foile sunt realizate din materiale cu rigiditate crescută și cu foarte bune proprietăți de rezistență, de obicei fiind realizate din aliaje metalice ușoare sau fibre de carbon sau de sticlă. Miezul conferă o greutate scăzută datorită densității mici a spumelor și a modului de aranjare a celulelor. Structura de tip sandwich este frecvent utilizată cu foarte bune rezultate în industriile de vârf, de aceea se încearcă aplicarea acestor structuri în industria echipamentelor sportive.

Combinațiile de materiale produc echipamente ușoare, care au o rezistență raportată la greutate ridicată. Majoritatea materialelor utilizate trebuie să reziste unor forțe de impact mari și, în plus, acțiunii mediului. După tipul de sport, acestea trebuie să fie realizate din materiale care conferă și protecție termică, condițiile de desfășurare a jocurilor fiind diferite.

Tabelul 1.4

Nr.crt.	Denumirea pe piață	Utilizări	Material (materia primă)
1.	Sorbothane	Pentru absorbția șocurilor și atenuarea vibrațiilor.	Polimer visco-elastic sintetic
2.	Kryton	Utilizat în realizarea apărătorilor pentru umeri și coloană.	Spumă polietilenică
3.	Koog EVX	Zone întărite în echipamentele sportive în vederea atenuării impactului	Realizat din EVA
4.	Spandex	Unul din cele mai utilizate materiale în realizarea echipamentelor sportive. Are o elasticitate foarte mare (se poate întinde de 100 de ori față de lungimea inițială). Este utilizat deoarece face echipamentele mai ușoare și mai confortabile în timpul mișcării.	Spandex
5.	Nitrex EVO	Realizat din PVC-nitril sub formă triunghiulară, este utilizat pentru proprietățile elastice și impermeabile (fiind o spumă cu celule închise).	PVC-nitril
6.	POC-U	Permite modelarea în diferite forme.	Spumă poliuretanică
7.	Poron	Provenit din poliuretanul cu celule deschise, Poron este un material flexibil, ales pentru proprietățile de absorbție a șocurilor și pentru modul de comprimare a produselor fabricate.	Spumă poliuretanică

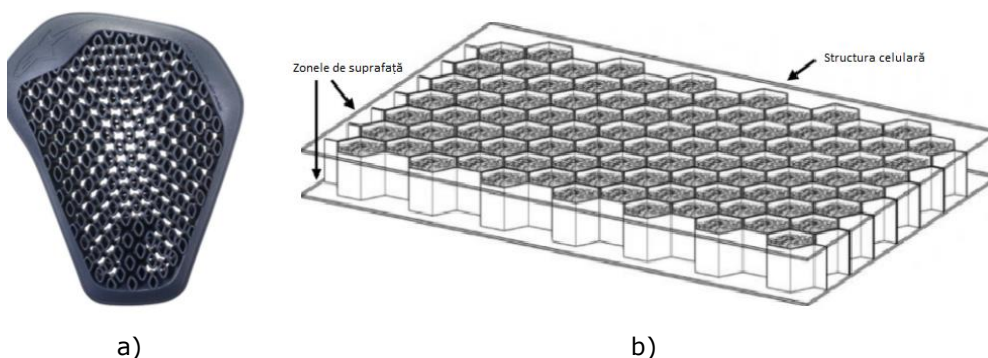


Fig. 1.15. Structuri celulare de tip fagure pentru echipamente sportive

Structurile celulare de tip fagure sunt compuse din miez, partea interioară, și fețe, partea exterioară. Miezul are rolul de a echilibra proprietățile mecanice ale

compozitului, având un rol important în rezistența la compresiune și forfecare, pe când fețele preiau încovoierea și încărcările normale. Astfel, miezul structurii trebuie să fie rigid și puternic, dar să se poată deforma pentru a absorbi șocurile.

Materialele de tip sandwich sunt utilizate pentru raportul ridicat greutate-rezistență, buna absorbție a șocurilor, rezistența la coroziune și variația de temperatură, izolarea fonică și rigiditatea la încovoiere.

În tabelul 1.5 sunt comparate unele proprietăți ale spumelor utilizate în realizarea panourilor de tip sandwich.

Tabelul 1.5 Proprietăți ale materialelor utilizate în echipamentele sportive

	Spuma polietilenică EFP30	Spuma ROHACELL	Spuma poliuretanică
Densitate (kg/m^3)	30	32	50
Rezistența la tracțiune (MPa)	0.28	1	0.5
Elongația (%)	18	10	12
Rezistența la compresiune (MPa)	0.5-1.2	0.5	0.6

Interesul și activitatea de cercetare se îndreaptă foarte mult spre sporturile cu un public larg. Investițiile din NFL (Liga Națională de Fotbal din SUA) au condus la dezvoltarea unor echipamente cu proprietăți de protecție extraordinare, Fig. 1.16. Acestea au fost dezvoltate astfel încât limitează riscurile accidentărilor grave, da în același timp conferă libertate de mișcare sportivului. Sunt utilizate structuri celulare pentru a reduce masa echipamentelor și a menține gradul de protecție. Foarte multe echipamente utilizează materiale de nișă, scumpe, comozite speciale și spume cu proprietăți foarte bune. Echipamentele de protecție sunt proiectate astfel încât să reducă șocul survenit în timpul impactului, deci necesită un comportament foarte bun la compresiune și impact. Pe lângă acestea, trebui să fie rezistente la coroziune, transpirație și șocuri repetate. Echipamentul de protecție se poate utiliza și pentru susținerea și fixarea membrilor vătămate, oferind protecție suplimentară la nevoie.



a)



b)

Fig. 1.16. Echipament de protecție a pieptului și umerilor

De asemenea, echipamentele de protecție sunt utilizate în sporturile automobilistice. Necesitatea costumelor ignifuge și a întăriturilor pentru încheieturi

este prevăzută în foarte multe regulamente ale sporturilor moto și auto. Formula 1 și Moto GP au emis reguli stricte privind materialele utilizate, în special pentru rezistența la foc. Nomex-ul este principalul material utilizat în realizarea costumelor ignifuge. Acesta este un material sintetic produs de compania DuPont. Nomex-ul își păstrează proprietățile de rezistență la foc, chiar și după o durată lungă de utilizare. Pe lângă acesta se mai utilizează costume din bumbac tratat cu Probac, care își conservă și el foarte bine proprietățile în timp.

Pentru echipamentul de protecție a gâtului sunt necesare materiale rigide, care limitează mișcările capului și previn oboseala mușchilor din zona respectivă. Pielea este un material utilizat des pentru fabricarea echipamentelor de protecție a mâinilor și picioarelor, deoarece are o porozitate bună, fiind un material respirabil.



Fig. 1.17. Costum de protecție pentru sporturile automobilistice

Echipamentele de protecție utilizate în regiunea pieptului și umerilor folosesc tehnologii avansate pentru obținerea structurilor celulare ale spumelor. Întăririle sunt din ce în ce mai ușoare, iar structurile celulare absorb mai multă energie față de materialele care nu utilizează structuri celulare. Din ce în ce mai multe echipamente utilizează mai multe straturi de spume, uneori în combinație cu diferite materiale compozite. Exemplul din Fig. 1.17 (b) folosește două spume încorporate pentru a crește eficiența împotriva șocurilor. Acest model a fost discutat pentru încălțăminte sportivă și s-a dovedit mult mai eficient pentru a realiza produse de excepție.

Pentru sporturile de contact, un criteriu important este preluarea șocului de către echipament și transmiterea unei cantități cât mai reduse de energie asupra corpului. De aceea, materialele și combinațiile dintre acestea, aranjarea și modul de fabricare sunt foarte importante. De asemenea, echipamentele trebuie să fie cât mai ușoare, să poată fi ajustate cu ușurință și să fie rezistente la acțiunea mediului.

Materiale precum polietilena și spumele poliuretanică, alături de acetatul etilvinil, sunt utilizate pe piața de îmbrăcăminte sportivă de zeci de ani și continuă să ofere rezultate foarte bune. Acestea au densități scăzute și proprietăți foarte bune de

absorbție a șocurilor. De asemenea, au utilizări împotriva vibrațiilor produse în timpul mișcării. Pentru echipamentele utilizate în motociclism se utilizează și întărituri metalice pentru coate și genunchi. Sporturile acestea au nevoie de echipamente care protejează bine zona coloanei vertebrale, astfel se utilizează materiale rezistente la impact. De asemenea, mănușile și ghetele trebuie să fie foarte bune izolatoare și să ofere o protecție sporită în caz de alunecare. Spumele cu pereți închiși sunt preferate pentru acest tip de echipamente din cauza proprietăților de impermeabilitate.

Materialele reciclabile cunosc un avânt și în industria echipamentelor sportive de protecția a corpului. Din ce în ce mai multe firme încorporează plasticul reciclat în fabricarea acestora. Avantajul reprezentat de prelucrarea plasticului sub formă de granule este regăsit în posibilitatea printării 3D a anumitor componente, astfel reducându-se costul cu matrițarea.

Materialele celulare se remarcă prin densitatea de goluri de aer dintre celule. Structurile cu celule deschise prezintă densități foarte mici și proprietăți foarte bune. Dintre acestea, spumele poliuretanică sunt printre cele mai eficiente și din punct de vedere al costului. Au proprietăți care variază cu temperatura, ceea ce poate fi considerat un avantaj, în anumite situații. Unii producători folosesc dependența de temperatură a proprietăților pentru a modela răspunsul la un impact puternic și de scurtă durată, materialul tinzând să devină mult mai rigid pentru o durată scurtă de timp din cauza scăderii punctului de tranziție vitrosă. Astfel, se pot realiza spume care să conțină bule dintr-un material dilatant, care se eliberează în momentul impactului, făcând spuma mult mai rigidă. Materialul de bază are proprietățile standard în timpul utilizării normale, fiind moale și relativ flexibil, iar în timpul unui impact cu o forță mai mare permite reducerea deformării prin eliberarea lichidului dintre celule.

Spumele de tip EVA sunt recunoscute ca foarte bune absorbante de șocuri. De obicei, sunt realizate cu celule închise și au proprietăți elastice foarte bune, revenind la starea inițială, chiar și de la comprimări relativ mari. În straturi mai groase de 10 (mm), spumele de tip EVA se comportă mult mai bine din cauza densificării care apare la compresiune. S-a observat experimental că în jurul valorii de 10 (mm), spuma EVA oferă proprietăți asemănătoare unei protecții din piele cu aceeași grosime [3].

Rezultatele încercărilor mecanice efectuate pe aceste materiale sunt esențiale. Cu ajutorul lor se pot înțelege mult mai bine comportamentele materialelor în diferite situații. Industria de echipamente sportive de protecție este una înfloritoare și trebuie să țină cont că, pe lângă calitatea materialelor și a produsului final, aspectul este definitiv în alegerea unui echipament în detrimentul altuia. Spumele cu structuri celulare sunt frecvent utilizate datorită modului bun de pliere pe diferite forme, a proprietăților mecanice înalte și a costului redus. Acestea au densități care pot fi ajustate și astfel se pot crea echipamente ușoare, dar cu forme complexe, care oferă rezultate bune la solicitările de impact. Materialele compozite și spumele sunt utilizate din ce în ce mai mult împreună pentru a acoperi o arie cât mai largă de proprietăți, echipamentele nefiind mereu folosite în aceleași condiții.

1.2.4. Echipamente de protecție a capului

Primele spume viscoelastice sau "cu memoria formei" au fost utilizate pentru reducerea forțelor experimentate de astronauți în timpul decolărilor și aterizărilor. Acestea au fost dezvoltate ca materiale cu rolul specific de amortizare a accelerației pe care o resimte astronautul. Datorită cercetărilor conduse de NASA în acest

domeniu, s-au dezvoltat multe industrii care folosesc spumele în acest mod. Mașinile de curse folosesc spume în fabricarea cabinelor și a căștilor de protecție, cu scopul de a amortiza vibrațiile și șocurile.

Spumele utilizate în realizarea echipamentelor de protecție trebuie să fie rezistente și să ofere confort utilizatorului. Materialele compozite se utilizează împreună cu diferite spume sau grilaje metalice pentru a realiza obiecte care oferă un grad ridicat de protecție împotriva accidentărilor produse din contact sau alunecare.

În funcție de sportul practicat, casca de protecție are o complexitate și geometrie diferită, Fig. 1.18 și Fig. 1.19. Cele mai multe sunt realizate din materiale plastice, pentru a fi ușoare, având un înveliș rezistent la impact și o structură special creată pentru a prelua șocurile.



Fig. 1.18. Căști de protecție pentru sporturi automobilistice (a), rugby (b) și ciclism (c)

Pentru fabricarea majorității căștilor comerciale se utilizează polistirenul expandat (EPS). Acesta are rolul de a disipa energia de impact și de a preveni propagarea șocurilor spre craniu, implicit spre creier. EPS este preferat, deoarece este ieftin, durabil, permite ventilarea și are proprietăți foarte bune de rezistență la impact. Căștile sunt realizate din granule de material plastic, topite și puse în matrițe pentru a lua forma dorită.

Alt material frecvent utilizat în fabricarea căștilor de protecție este ABS-ul, adică acrilonitrilul de butadien-stirenă. ABS-ul reprezintă un material termoplastic cu duritate și rezistență la impact foarte bune. Acesta se pretează foarte bine pentru realizarea căștilor, este mult mai ieftin decât compozitele cu fibră de carbon sau fibră de sticlă și are proprietăți bune de absorbție a șocurilor.

De obicei, căștile sunt prevăzute cu un material suplimentar, plasat în zona dintre cap și cască, pentru a preveni frecarea sau pentru a crește amortizarea în cazul unui accident. Materiale precum bumbacul se utilizează pe post de absorbant, pentru transpirație și pentru a reduce frecarea dintre scalp și cască. O problemă majoră a acestor echipamente de protecție este curățarea lor între utilizări. Fiind realizate din materiale greu deformabile la exterior și căptușite foarte bine pe interior, pentru a asigura protecție sporită, acestea tind să păstreze umezeala. De aceea trebuie luate în considerare materiale care permit respirația în zona respectivă. Materialele celulare sunt folosite și în acest mod, pentru a crește porozitatea materialului și a reduce masa echipamentului de protecție.



Fig. 1.19. Căști de protecție în motociclism (a), fotbal american (b) și box (c)

La început se utiliza foarte mult pielea pentru fabricarea echipamentului de protecție, iar interiorul căștilor era căptușit cu lână sau bumbac. Odată cu evoluția tehnologiei și a metodelor de prelucrare, au fost introduse căștile din materiale compozite și polimerice. Materialele plastice au adus o reducere substanțială a masei și, cu ajutorul tehnologiilor de formare, au început să apară formele ergonomice și aerodinamice în fabricarea căștilor de protecție.

Caracteristicile esențiale ale unei căști de protecție sunt: performanțele ridicate în absorbția șocurilor și rezistența la impact, masa redusă. Partea frontală a căștilor conține zone întărite cu bare metalice, ancore pentru absorbția șocurilor din aceste bare și pentru fixarea pe cască. Casca frontală trebuie să fie rezistentă la impact și destul de flexibilă pentru a prelua o mare parte din șoc. În zona cervicală se utilizează frecvent structuri celulare cu pereți deschiși pentru a reduce cantitatea de material și pentru a prelua foarte bine energia în cazul unei lovituri. În cazul căștilor utilizate la box, acestea sunt prevăzute cu protecție suplimentară în zona tâmpelor și a urechilor. Această protecție este realizată cu ajutorul materialelor polimerice, pentru a obține un echipament ușor, care nu reduce mobilitatea. Problema care apare este limitarea grosimii de material. Spumele necesită o grosime mai mare pentru a prelua cât mai bine șocurile loviturilor. Astfel, trebuie realizat un compromis între greutate și proprietățile ridicate. De obicei, în acest scop se folosesc materiale cu proprietăți complementare, spume și materiale compozite, pentru a realiza echipamente universale.



Fig. 1.20. Căști de protecție pentru fotbalul american

Se poate observa în Fig. 1.20 o secțiune printr-o cască de protecție. Spumele se utilizează în toată cască, partea externă este urmată de un strat destul de gros de spumă celulară cu rol de amortizare și distribuire controlată a forțelor de impact. Chiar dacă majoritatea producătorilor utilizează ca material EPS-ul, în zonele din interior se adaugă și alte tipuri de spume, precum cele poliuretanică, din PVC sau EVA.

Structurile celulare de tip fagure sunt utilizate în realizarea echipamentului de protecție pentru cap. Acestea sunt rezistente și au masa scăzută, fiind o alegere bună pentru căștile motocicliștilor și bicicliștilor, Fig. 1.21. Structuri nu se limitează la celulele hexagonale, ci pot lua forme diferite, de tuburi, triunghiuri sau patrulatere.



Fig. 1.21. Structuri de tip fagure utilizate în fabricarea căștilor

Pericolul accidentelor la cap este tratat în foarte multe reviste de specialitate, atenția îndreptându-se spre impactul puternic și de scurtă durată, dar și spre loviturile de intensitate scăzută și frecvență ridicată. Protecția se realizează cu ajutorul materialelor din compoziția echipamentelor. De aceea, se caută materiale care să ofere proprietăți înalte, indiferent de mediu sau temperatură. Combinațiile de materiale sunt des utilizate în realizarea căștilor. Zona externă este realizată din materiale plastice rezistente precum policarbonatul care, pe lângă rezistența mare la impact, are și o bună rezistență la coroziune și temperatură, păstrându-și proprietățile la variațiile de mediu.

Porozitate spumelor este un factor controlabil, iar alături de modul de aranjare a structurilor, poate ajusta răspunsul viscoelastic al spumelor, una din cele mai importante caracteristici mecanice. De aceea, sunt importante testele efectuate pe materialele utilizate, dar și pe echipamentele complete.

Designul are un rol foarte important în conceperea căștilor de protecție, în special în cadrul competițiilor automobilistice sau în cazul sporturilor de contact, precum fotbalul american sau rugby-ul. O structură proiectată corect are rolul de a reduce forțele aplicate la impact și de a modifica direcția acestora, pentru a evita propagarea spre creierul sportivului. Utilizarea celulelor hexagonale în zona frunții are rolul de a prelua și a redistribui uniform forțele de impact în cazul unui contact direct. Combinațiile de materiale dure pentru partea exterioară și o spumă cu proprietăți de absorbție a șocurilor în zona interioară sunt des întâlnite. Spumele poliuretanică sau cele obținute din cauciuc sintetic sunt ideale pentru a absorbi energia din timpul contactului și a opri propagarea spre craniu. Partea externă, pe lângă policarbonat, poate fi fabricată din polimeri termoplastici rezistenți la impact.

Pe lângă proprietățile menționate, materialele utilizate în zona de interior trebuie să fie antibacteriene, ignifuge, hidrofobe, antistatice sau izolatoare fonic, în funcție de cerințele speciale de utilizare. Aceste proprietăți se obțin prin utilizarea materialelor speciale, tratate cu diferite substanțe pentru modificarea proprietăților.

Alegerea unui echipament pentru sporturile de performanță depinde mult de materialele utilizate și de modul în care acestea sunt fabricate. Structura și designul îmbunătățesc proprietățile, iar un aspect modern va crește mereu cota de piață a echipamentelor.

1.3. Obiectivele cercetării

Teza de doctorat are drept scop dezvoltarea de noi echipamente sportive pe bază de structuri celulare care, pe de o parte, să posede proprietăți superioare față de echipamentele convenționale (fie proprietăți mecanice sporite la mase similare, fie mase reduse pentru performanțe similare), iar pe de altă parte, să poată fi modificate ușor în funcție de preferințele fiecărui sportiv. În atingerea acestui scop, au fost considerate o serie de etape de parcurs.

În primă etapă, sunt investigate proprietățile mecanice ale materialelor celulare utilizate în fabricarea echipamentelor sportive, precum și cele ale materialelor ce stau la baza structurilor proiectate. Ținând cont de caracteristicile spumelor flexibile și ale elastomerilor, o caracterizare exhaustivă include teste monotone (tracțiune și compresiune) în regim static și dinamic, teste lungă durată (relaxare), respectiv solicitări ciclice.

Pe baza proprietăților mecanice determinate experimental, în cea de-a doua etapă, vor fi calibrate modele constitutive cu scopul de a reproduce cât mai exact particularitățile acestei clase de materiale. Caracteristica tensiune-deformație specifică este modelată utilizând funcții hiperelastice, pentru a reda comportamentul neliniar. Pentru a simula comportamentul la solicitări de lungă durată, vor fi utilizate modele viscoelastice, bazate pe seriile Prony. În final, comportamentul la solicitări ciclice (efectul Mullins) va fi modelat prin calibrarea modelului Ogden-Roxburgh.

În dezvoltarea noilor echipamente sportive vor fi utilizate structuri de metamateriale, datorită bunelor caracteristici mecanice pe care le prezintă [19, 20, 21]. În cea de-a treia etapă a lucrării, vor fi investigate mai multe tipuri de structuri prezentate în literatura de specialitate, pentru selecția tipurilor de structuri care vor fi implementate. Identificarea structurilor optime implică determinarea variației rigidității relative și a rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă.

În final, structurile selectate vor fi modelate în scopul integrării lor în echipamente sportive. Determinarea fezabilității utilizării de echipamente sportive pe bază de structuri de metamateriale va fi realizată prin compararea rezultatelor analizelor numerice efectuate pe acestea cu rezultatele obținute pentru modele de referință, care au în componență materiale convenționale.

2. CARACTERIZAREA MECANICĂ A MATERIALELOR UTILIZATE ÎN FABRICAREA ECHIPAMENTELOR SPORTIVE

2.1. Prezentare generală

2.1.1. Pregătirea epruvetelor prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă

Pentru a determina proprietățile materialelor celulare utilizate în fabricarea tălpii intermediare a încălțăminte sportive au fost considerate 5 modele diferite de încălțăminte (denumite S1..S5), având diferite aplicații: modelele S1 (producătorul A) și S4 (producătorul B) sunt destinate alergării, modelul S3 (producătorul A) este utilizat în practicarea tenisului, iar modelele S2 (producătorul C) și S5 (producătorul D) sunt destinate sporturilor de sală (handbal, baschet, volei etc.). În acest studiu s-a utilizat încălțăminte îmbătrânită, în scopul determinării proprietăților stării de echilibru a materialelor.

Primul pas în pregătirea epruvetelor a constat în îndepărtarea părții superioare a încălțăminte, fără a deteriora tălpile (Fig. 2.1).



Fig. 2.1. Tălpile încălțăminte sportive

Pentru testele de compresiune s-au utilizat epruvete cilindrice cu diametrul $\phi 20\text{ mm}$, după recomandările ASTM D575 [22]. Înălțimea a rezultat ușor variabilă, depinzând de grosimea tălpii. Epruvetele de tracțiune au avut forma prezentată în Fig. 2.2, cu lungimea calibrată egală cu 35 mm , conform ASTM D412 [23].

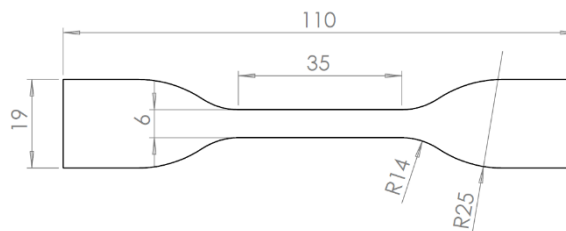


Fig. 2.2. Schița epruvetei de tracțiune

Cu scopul prelevării epruvetelor din tăpile de încălțăminte au fost utilizate preducele fabricate din oțel. Preducelea cu secțiune circulară din Fig. 2.3 (a) a fost achiziționată din comerț, iar cea destinată pentru prelevarea epruvetelor de tracțiune prezentată în Fig. 2.3 (b) a fost proiectată în acord cu recomandările ASTM D412 [23] și executată prin frezare CNC.



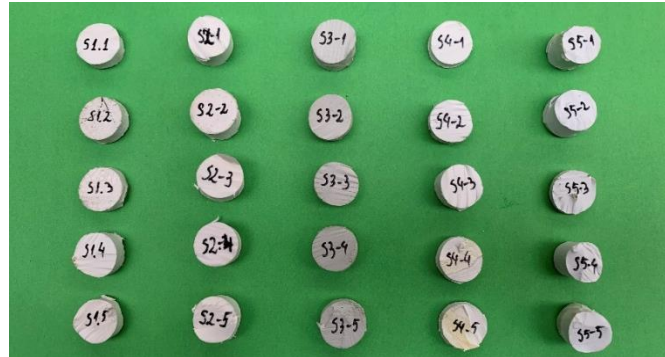
Fig. 2.3. Preducele destinate debitării epruvetelor de compresiune (a) și de tracțiune (b)

Debitarea epruvetelor s-a executat pe mașina universală LBG TC 100, de sarcină maximă egală cu 100 kN , prin aplicarea forțelor de compresiune necesare tăierii materialului (Fig. 2.4).



Fig. 2.4. Prelevarea epruvetelor de tracțiune

În total au fost prelevate câte 5 probe de compresiune și câte 2 sau 3 probe de tracțiune din fiecare material, în funcție de suprafețele tăpilor și posibilitățile de debitare (Fig. 2.5).



a)



b)

Fig. 2.5. Epruvetele de compresiune (a) și de tracțiune (b) prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă

2.1.2. Pregătirea epruvetelor prelevate din echipamentele sportive de protecție

Din categoria echipamentelor sportive de protecție s-a ales spre investigare casca Rugby R900 OFFLOAD, Fig. 2.6, produs comercializat de compania Decathlon.

Produsul este conceput pentru rugby, asigurând protecție și confort. Pad-urile mari sunt adaptate normelor de densitate și grosime ale asociației internaționale World Rugby.

Pad-urile sunt fabricate din spumă EVA, interiorul căștii este căptușit dintr-un material pe bază de poliester și elastan, iar exteriorul este confecționat dintr-un material textil cu o compoziție poliamidă-poliester-elastan.

Prin debitare, pad-urile au fost extrase din corpul căștii, iar materialul textil exterior a fost îndepărtat, Fig. 2.7.



Fig. 2.6. Modelul de cască de protecție pentru jocul de rugby

Ulterior, epruvetele de compresiune, Fig. 2.8, au fost prelevate utilizând preduceaua cu secțiune circulară prezentată în Fig. 2.3 (a).



a)



b)

Fig. 2.7. Celula (a) și spuma obținută în urma înlăturării materialului textil exterior (b)



Fig. 2.8. Epruvetele prelevate din spuma EVA utilizată în fabricarea căștii de protecție

Epruvetele cilindrice prelevate din cască de protecție au avut înălțimea medie egală cu $h = 10,01 \text{ mm}$, abaterea standard $\pm 0,325 \text{ mm}$, și diametrul $d = 19,88 \text{ mm}$, abaterea standard $\pm 0,202 \text{ mm}$. Fiecare epruvetă testată a fost măsurată pe trei direcții diferite.

2.1.3. Determinarea densităților materialelor investigate

Pentru toate cele patru materiale investigate (epruvete prelevate din tălpi, epruvete prelevate din cască de protecție și epruvete fabricate din doi elastomeri diferiți) s-au calculat densitățile prin măsurători efectuate pe epruvetele de compresie.

Masa epruvetele s-a determinat utilizând o balanță analitică de tipul KERN PCB 350-3, cu masă maximă de 350 gr. și precizia de 0,001 gr.

Diametrul d și înălțimea h au fost măsurate cu un șubler Mitutoyo cu precizia de 0,01 mm. Măsurătorile au fost efectuate pe câte trei direcții diferite pentru fiecare dimensiune și epruvetă. Pentru fiecare material au fost utilizate câte cinci epruvete.

Densitatea s-a determinat pe baza bine-cunoscutei relații de calcul

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{h \cdot \frac{\pi d^2}{4}} \quad (2.1)$$

Rezultatele măsurătorilor, valoarea medie și abaterea standard, sunt prezentate în Tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Determinarea densității materialelor

	h (mm)	d (mm)	m (g)	ρ (g/cm ³)
spumă EVA (cască OFFLOAD)	9,42	22,21	0,181	0,0483
	±0,401	±2,619	±0,055	±0,001
spumă EVA (încălțăminte sport)	12,43	18,80	0,656	0,1895
	±1,302	±0,362	±0,094	±0,009
Agil-U	12,61	28,00	8,962	1,1539
	±0,052	±0,061	±0,011	±0,005
TPU	12,78	28,50	8,028	0,9852
	±0,039	±0,029	±0,008	±0,003

Cea mai mică densitate o are spumă EVA din cască de protecție OFFLOAD, spuma EVA din încălțăminte sport fiind de aproximativ 4 ori mai mare. Elastomerii Agil-U și TPU au densitățile de același ordin de mărime.

2.2. Încercări statice

2.2.1. Teste efectuate pe epruvetele prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă

Încercările statice de compresiune și tracțiune pe epruvetele prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă au fost efectuate în Laboratorul "Ștefan Nădășan" de Rezistența, Integritatea și Durabilitatea Materialelor, Structurilor și Conductorilor din Universitatea Politehnica Timișoara.

2.2.1.1. Teste de compresiune

Testele de compresiune au fost efectuate pe mașina universală pentru încercări statice Zwick/Roell Z005, echipată cu un traductor de forță de 5 kN în solicitare uni-axială, în clasa de precizie 0,5 pe domeniul de măsurare a forței 1 – 130%, conform ISO 7500-1. Mașina universală Zwick/Roell Z005 este prevăzută cu soft-ul TestXpert de prelucrare a datelor și un extensometru incremental cu eroarea maximă de $\pm 1 \mu\text{m}$ la măsurarea diferențială a deplasării între două puncte de măsurare în domeniul 20 – 200 μm . De asemenea, mașina universală Zwick/Roell Z005 este prevăzută cu dispozitive pentru încercări de tracțiune, compresiune și încovoiere în trei puncte.

Încercările la compresiune (Fig. 2.9) au fost efectuate în modul deplasare controlată, la temperatura ambiantă 23°C, astfel:

- viteza de deplasare a traversei egală cu 10 mm/min;
- înregistrarea forței F și a deplasării Δ a traversei mașinii;
- testele s-au considerat încheiate la atingerea forței de 1 kN.

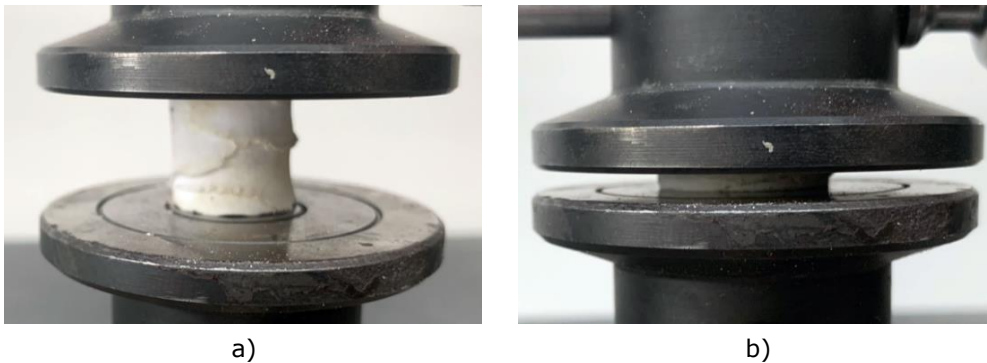


Fig. 2.9. Epruvetă de compresiune la începutul (a) și finalul testului (b)

Deformațiile specifice longitudinale ε au fost determinate din deplasarea traversei Δ , iar tensiunile normale de compresiune σ din forța înregistrată F .

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{h} \quad (2.2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

50 Caracterizarea mecanică a materialelor utilizate pentru echipamente sportive – 2

unde h este înălțimea inițială, măsurată pentru fiecare epruvetă în parte, iar A este aria inițială a secțiunii transversale a epruvetei.

Rezultatele încercărilor de compresiune, în forma curbelor caracteristice tensiune-deformație specifică, sunt prezentate în Fig. 2.10.

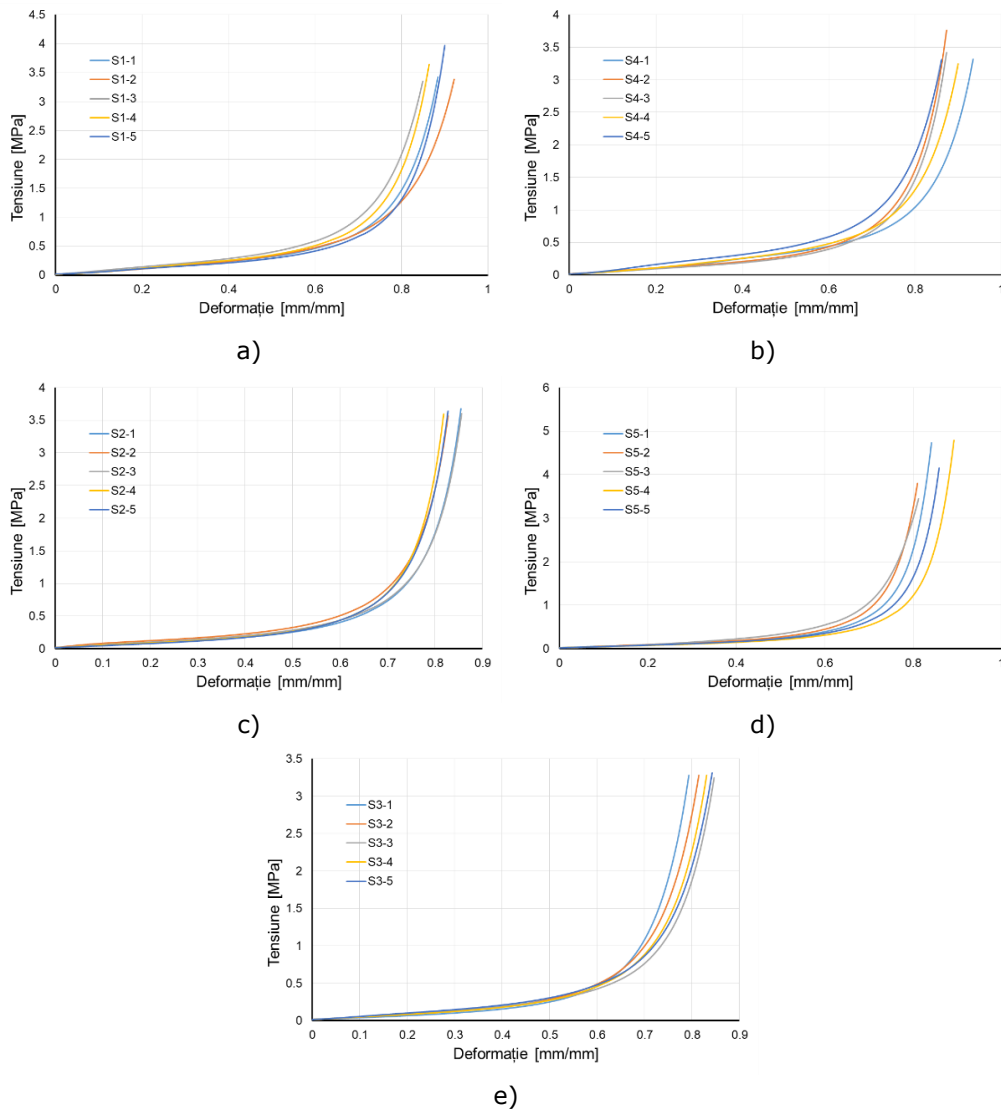


Fig. 2.10. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)

Din rezultatele încercărilor de compresiune se poate evidenția comportamentul similar al materialelor investigate. În prima parte a solicitării, până la o deformație de aproximativ 60%, materialele prezintă o rigiditate relativ scăzută, urmată de o creștere exponențială a tensiunii cu deformația. Acest fenomen se poate

explica ținând seama de structura celulară a materialelor utilizate în fabricarea tălpilor intermediare ale încălțămintei sportive (Fig. 2.11).

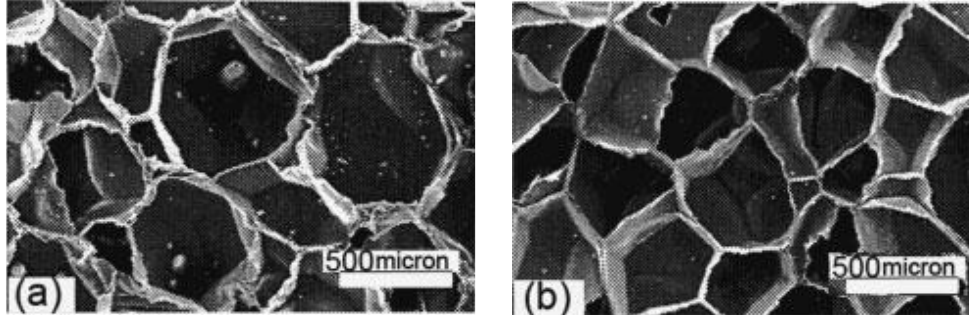


Fig. 2.11. Structura celulară a spumei EVA [24]

Astfel, la deformații mai mici de 60%, comportamentul materialului este determinat de deformația pereților celulelor. Luând în considerare faptul că materialul de bază are un comportament hiperelastic (poate suferi deformații reversibile foarte mari), curba caracteristică a spumelor flexibile nu prezintă o porțiune de palier, comportament specific spumelor rigide (determinat de cedarea progresivă a pereților celulelor) [12]. Ultima porțiune a curbei tensiune-deformație este caracterizată de colabarea celulelor și, în consecință, de comprimarea materialului de bază, rigiditatea acestei porțiuni tinzând asimptotic spre rigiditatea materialului de bază (Fig. 2.12).

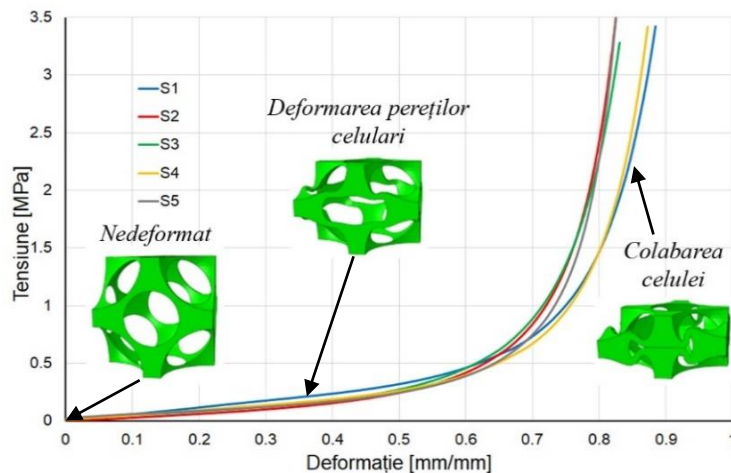


Fig. 2.12. Comparație între curbe tensiune-deformație ale unor epruvete reprezentative din fiecare material, cu evidențierea diferitelor stadii ale deformației celulelor

Rezultatele testelor de compresiune sunt prezentate în sinteză în Tabelul 2.2. Rezistența la compresiune este evaluată pentru o deformație specifică egală cu 80%. Pentru fiecare producător de încălțămintă sportivă, de la S1 la S5, este listată valoarea medie și abaterea standard (între paranteze rotunde).

Comportamentul la compresiune al materialelor studiate variază semnificativ, împrăștierea rezultatelor fiind relativ ridicată. Fenomenul este explicat de faptul că epruvetele au fost prelevate din tălpile încălțămintei sport fabricată de producători diferiți. În plus, prelevarea s-a efectuat din zone diferite ale tălpilor.

Tabelul 2.2. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialele prelevate din tălpi

	S1	S2	S3	S4	S5	Medie
$\sigma_{c\ 80\%}$ (MPa)	1,59 (0,349)	2,27 (0,811)	2,04 (0,578)	1,86 (0,630)	1,86 (0,429)	1,93 (0,250)

2.2.1.2. Teste de tracțiune

Testele de tracțiune au fost efectuate pe mașina universală Zwick/Roell Z005 pentru încercări statice, echipată cu un traductor de forță de 5 kN, la temperatura ambiantă de 23°C și cu o viteză constantă a traversei de 10 mm/min [23].

Tensiunea din epruvete a fost determinată ținând cont de forța F înregistrată, pe baza relației:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

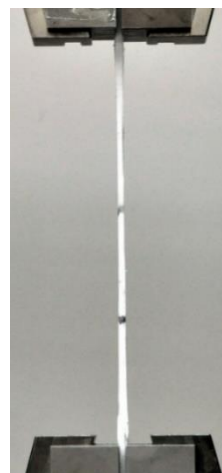
unde A este aria inițială a secțiunii transversale a epruvetei.

Deformația epruvetelor pe parcursul testelor s-a determinat utilizând metoda *Mark Tracking*, utilizarea extensometrului în domeniul acestor deformații mari fiind practic imposibilă.

În acest scop, pe fiecare epruvetă a fost marcată o zonă calibrată, constând din două marcaje orizontale (Fig. 2.13). Imagini digitale ale epruvetei au fost preluate la intervale regulate de timp de 30 sec. Imaginile au fost prelucrate cu ajutorul software-ului SigmaScan™ pentru calibrarea acestora (relația dintre pixeli și o lungime de referință) și pentru determinarea distanței dintre marcaje.



a)



b)

Fig. 2.13. Epruvetă de tracțiune la începutul testului (a) și înainte de rupere (b)
Astfel, s-a obținut variația deformației specifice longitudinale cu timpul.

$$\varepsilon(t_i) = \frac{l(t_i) - l(t_0)}{l(t_0)} \quad (2.5)$$

unde $\varepsilon(t_i)$ este deformația specifică longitudinală la momentul t_i , $l(t_i)$ este distanța măsurată între marcaje la momentul t_i iar $l(t_0)$ este distanța inițială dintre marcaje.

Pentru a obține corelația dintre deformația specifică ε și tensiunea normală σ , variația deformației specifice cu timpul a fost evaluată prin intermediul unor funcții polinomiale de ordinul al doilea (Fig. 2.14).

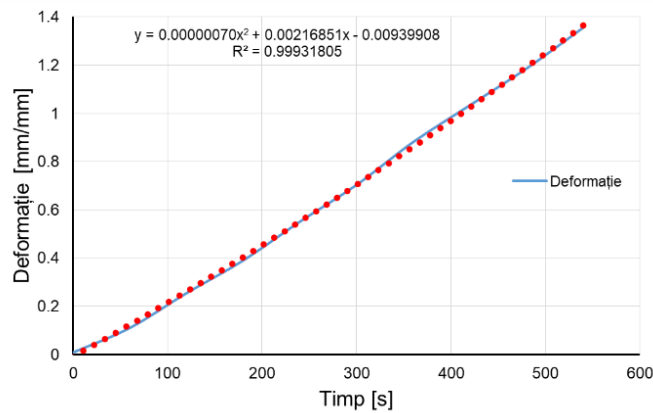


Fig. 2.14. Determinarea legii de variație a deformației cu timpul

Relația dintre deformația specifică și tensiunea normală s-a obținut integrând legea de variație a deformației cu timpul în perechile de valori timp-tensiune generate de către mașina universală Zwick/Roell Z005. Câte o curbă caracteristică reprezentativă pentru fiecare material este prezentată în Fig. 2.15.

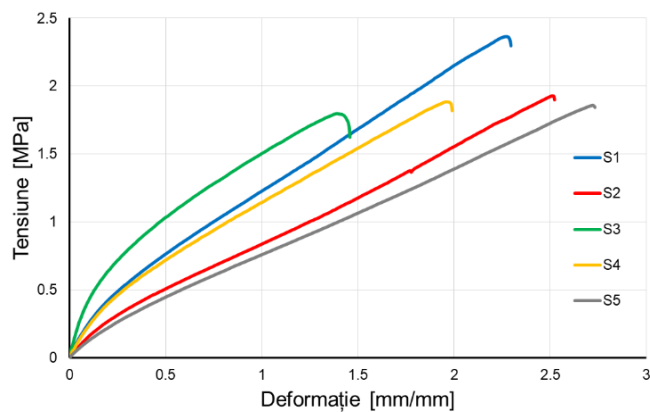


Fig. 2.15. Variația tensiunii cu deformația pentru cele 5 materiale investigate

Pentru cele cinci materiale prelevate din tăpile de încălțăminte sportivă, rezistența la tracțiune și alungirea la rupere, media și abaterea standard (notată între paranteze) sunt prezentate într-o formă sintetică în Tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Rezultatele testelor la tracțiune pentru materialele prelevate din tălpi

	S1	S2	S3	S4	S5	Medie
σ_t (MPa)	2,37	1,93	1,79	1,88	1,86	1,966 (0,231)
ε_t (mm/mm)	2,271	2,509	1,389	1,960	2,718	2,169 (0,519)

Comportamentul la tracțiune al materialelor studiate variază semnificativ, similar celor de compresiune, împrăștierea rezultatelor fiind ridicată. Fenomenul este explicat de faptul că epruvetele au fost prelevate din tăpile încălțăminte sport fabricată de diferiți producători. În plus, prelevarea s-a efectuat din zone diferite ale tălpilor.

2.2.2. Teste efectuate pe epruvete prelevate din echipamente sportive de protecție

2.2.2.1. Teste de compresiune

Testele de compresiune au fost efectuate pe mașina universală pentru încercări statice Zwick/Roell Z005, echipată cu un traductor de forță de 5 kN în solicitare uni-axială, în acord cu reglementările ISO 7500-1.

Încercările la compresiune, Fig. 2.16, au fost efectuate în modul deplasare controlată, la temperatura ambiantă, astfel:

- viteza de deplasare a traversei egală cu 5 mm/min;
- înregistrarea forței F și a deplasării Δ a traversei mașinii;
- testele s-au considerat încheiate la atingerea deformației specifice de 95 %.

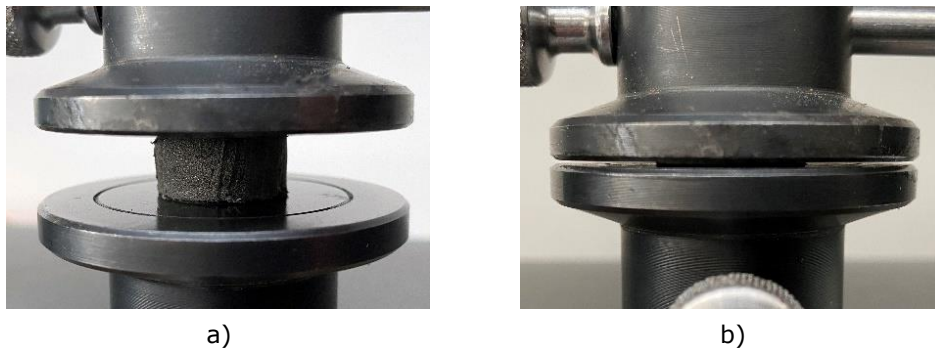


Fig. 2.16. Epruvetă de compresiune la începutul (a) și finalul testului (b)

Deformațiile specifice longitudinale ε au fost determinate din deplasarea traversei Δ , iar tensiunile normale de compresiune σ din forța înregistrată F , conform ecuațiilor (2.2) și (2.3).

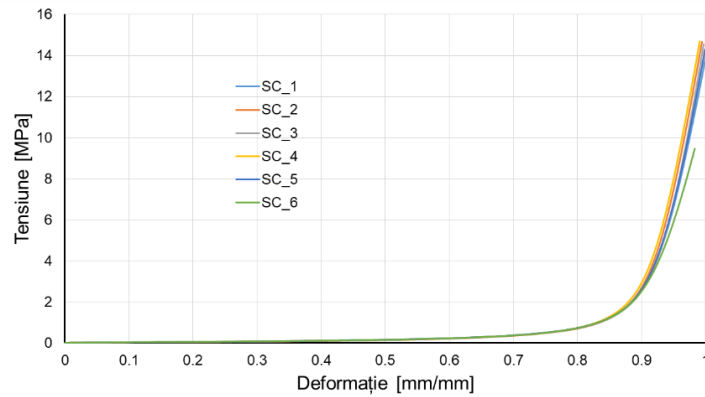


Fig. 2.17. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul utilizat în fabricarea căștilor de protecție

Rezultatele încercărilor la compresiune, în forma curbelor caracteristice tensiune-deformație specifică, sunt prezentate în Fig. 2.17.

Din rezultatele încercărilor de compresiune efectuate pe materialul din care este confecționată casca de protecție, se evidențiază în prima parte a solicitării o rigiditate relativ scăzută (până la o deformație de aproximativ 80%), urmată de o creștere exponențială a tensiunii cu deformația. Acest fenomen se poate explica ținând seama de structura celulară a materialului investigat.

Comportamentul este similar materialelor celulare utilizate la confecționarea tălpilor încălțămintei sportive. Pentru o deformație specifică de 80% valoarea medie a tensiunii de compresiune pentru epruvetele testate este egală cu 0,74 (MPa), abaterea standard egală cu 0,015 (MPa).

2.2.3. Teste efectuate pe epruvete fabricate prin prototipare rapidă

2.2.3.1. Teste de compresiune

Epruvetele fabricate prin prototipare rapidă din materialele TPU și Agil-U sunt prezentate în Fig. 2.18. Epruvetele, câte 10 bucăți din fiecare material și tip de test, au fost realizate prin fabricație aditivă de către compania Nutechnologies, Timișoara.



a) tracțiune

b) compresiune

Fig. 2.18. Epruvete fabricate prin prototipare rapidă

Testele de compresiune au fost efectuate pe mașina universală pentru încercări statice LBG TC 100, echipată cu un traductor de forță de 100 kN în solicitare uni-axială, în acord cu reglementările ISO 7500-1.

Încercările la compresiune au fost efectuate în modul deplasare controlată, la temperatura ambiantă, astfel:

- viteza de deplasare a traversei egală cu 10 mm/min;
- înregistrarea forței F și a deplasării Δ a traversei mașinii;
- testele s-au considerat încheiate la atingerea unei deformații specifice prestabilite, pentru trei trepte de încărcare în intervalul 70 – 85 % pentru materialul TPU, respectiv în intervalul 80 – 95 % pentru materialul Agil-U.

Rezultatele încercărilor de compresiune, în forma curbelor caracteristice tensiune-deformație specifică, sunt ilustrate în Fig. 2.19 pentru materialul Agil-U, respectiv în Fig. 2.20 pentru materialul TPU.

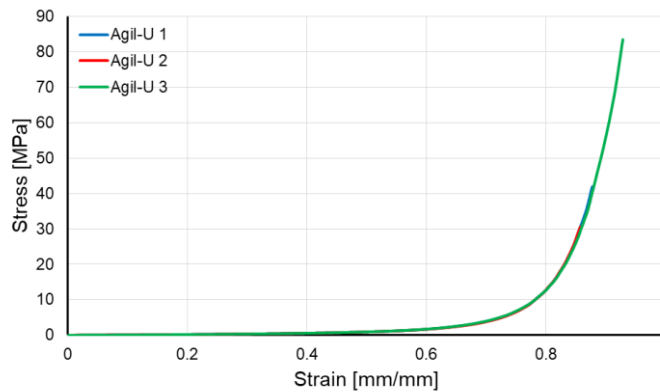


Fig. 2.19. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul Agil-U

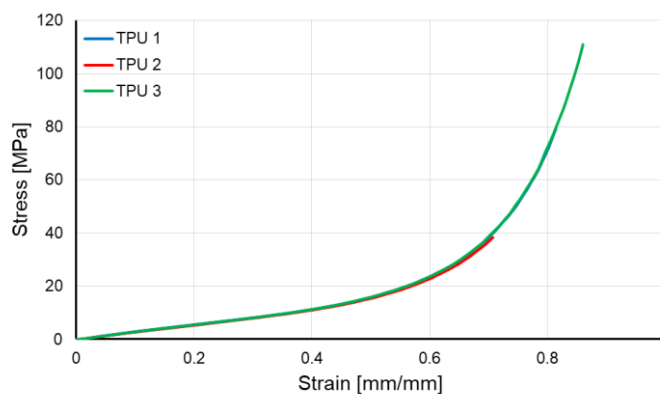


Fig. 2.20. Rezultatele testelor de compresiune pentru materialul TPU

Sinteza rezultatelor testelor de compresiune pentru materialele prototipate Agil-U și TPU sunt listate în Tabelul 2.4. Pentru dimensiunile epruvetelor sunt listate valorile medii și abaterea standard (între paranteze).

Tabelul 2.4. Rezultatele testelor de compresiune pentru Agil-U și TPU

	test	h (mm)	d (mm)	Δ (mm)	F (kN)	ε (mm/mm)	σ (MPa)
Agil-U	1	12,49 (0,015)	27,72 (0,040)	10,708	18,49	0,858	30,62
	2	12,53 (0,021)	27,75 (0,057)	10,997	25,37	0,877	41,94
	3	12,37 (0,040)	27,72 (0,047)	11,490	50,38	0,929	83,50
TPU	1	12,63 (0,050)	28,31 (0,090)	8,931	24,16	0,707	38,37
	2	12,65 (0,032)	28,33 (0,060)	10,303	49,95	0,814	79,23
	3	12,73 (0,025)	28,31 (0,072)	10,948	69,89	0,860	111,01

În Fig. 2.21 sunt ilustrate, prin comparație, curbele caracteristice tensiune-deformație specifică pentru cele două materiale la cel de-al treilea nivel de încărcare (test 3).

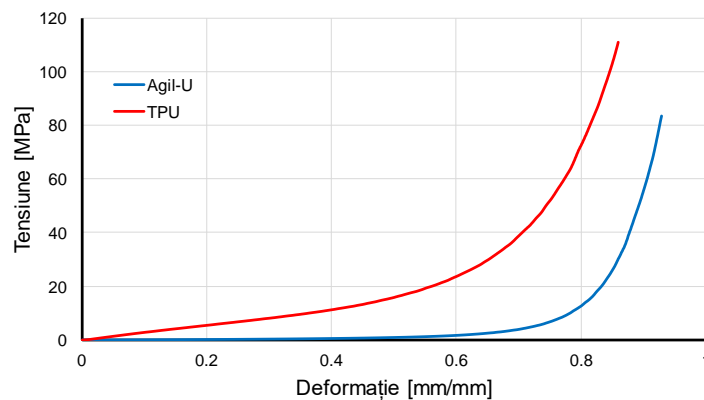


Fig. 2.21. Comparație între curbele tensiune-deformație obținute la compresiune pentru materialul Agil-U respectiv TPU

Se constată că rigiditatea elastomerului TPU este semnificativ mai ridicată decât cea determinată pentru Agil-U. Creșterea exponențială a tensiunii cu deformația se produce la niveluri mai reduse de solicitare pentru TPU (începând de la o deformație specifică de aproximativ 60%), prin comparație cu materialul Agil-U (creșterea exponențială a tensiunii se produce de la o deformație de aproximativ 75%).

2.2.3.2. Teste de tracțiune

Testele de tracțiune au fost efectuate pe mașina universală Zwick/Roell Z005 pentru încercări statice, echipată cu un traductor de forță de 5 kN, la temperatura ambiantă de 23°C și cu o viteză constantă a traversei de 10 mm/min.

De asemenea s-a utilizat o pre-încărcare de 1 N pentru materialul Agil-U, respectiv de 10 N pentru materialul TPU.

Tensiunea din epruvete a fost determinată ținând cont de forța F înregistrată și de aria inițială a secțiunii transversale.

Deformația epruvetelor pe parcursul testelor s-a determinat utilizând metoda *Mark Tracking*, prezentată anterior, utilizarea extensometrului în domeniul acestor deformații mari fiind practic imposibilă.

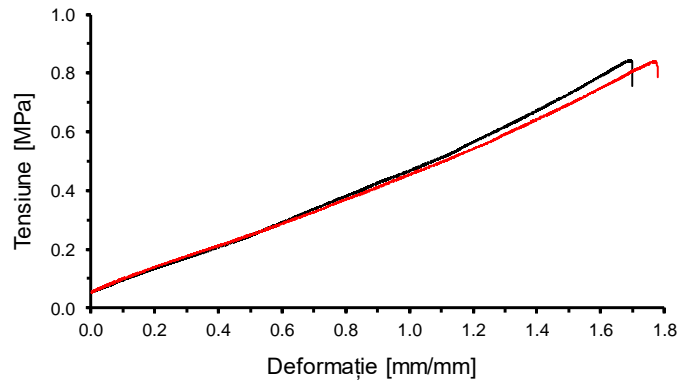


Fig. 2.22. Curba tensiune-deformație specifică la solicitarea de tracțiune pentru Agil-U

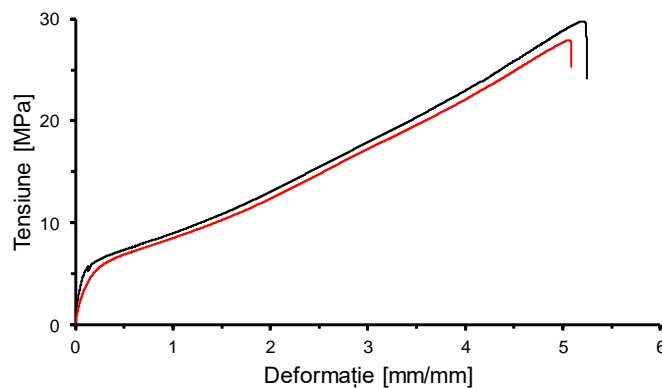


Fig. 2.23. Curba tensiune-deformație specifică la solicitarea de tracțiune pentru TPU

Rezultatele încercărilor de compresiune, în forma curbelor caracteristice tensiune-deformație specifică, sunt ilustrate în Fig. 2.22 pentru materialul Agil-U, respectiv în Fig. 2.23 pentru materialul TPU.

Sinteza rezultatelor testelor de tracțiune pentru materialele prototipate Agil-U și TPU sunt listate în Tabelul 2.5. Pentru grosime t și lățimea w a epruvetelor sunt listate valorile medii și abaterea standard (între paranteze).

Pentru forța maximă înregistrată și rezistența la tracțiune sunt listate valorile medii și abaterea standard (între paranteze rotunde).

Prin comparație cu materialul prelevat din tălpile de încălțăminte sportivă rezistența la tracțiune a materialului Agil-U este de aproximativ două ori mai mică, fiind egală cu $\sigma_t = 0,80 \text{ MPa}$. În schimb, deformația specifică este de același ordin de mărime cu cea determinată pentru materialul prelevat din tălpile de încălțăminte sportivă.

Rezistența la tracțiune a materialului TPU este egală cu $\sigma_t = 28,21 \text{ MPa}$. Deformația specifică mult mai mare pentru TPU este determinată de direcția de printare utilizată, cu orientarea la 45° .

Tabelul 2.5. Rezultatele testelor la tracțiune pentru Agil-U și TPU

	test	t (mm)	w (mm)	F (kN)	σ_t (MPa)
Agil-U	1	3,09 (0,043)	5,77 (0,135)	15,02	0,84
	2			14,96	0,83
	3			13,40	0,73
Medie				14,46 (0,918)	0,80 (0,060)
TPU	1	3,12 (0,031)	6,12 (0,013)	570	29,76
	2			535	27,94
	3			514	26,92
Medie				539,67 (28,290)	28,21 (1,439)

2.3. Solicitări de lungă durată

2.3.1. Teste de relaxare

Un test de relaxare presupune comprimarea unei epruvete până la o anumită deformație ε_0 , urmată de menținerea constantă a deformației pentru o perioadă de timp prestabilită [25]. În timpul testelor de relaxare se înregistrează variația forței de compresiune F cu timpul, rezultând implicit și variația tensiunii normale σ cu timpul. Pe baza acestor date se determină variația modului de relaxare $E(t)$ cu timpul

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.6)$$

În calibrarea modelului constitutiv pentru un material viscoelastic, se utilizează variația modului de relaxare normalizat $e(t)$ cu timpul

$$e(t) = \frac{E(t)}{E_0} = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} \quad (2.7)$$

unde E_0 reprezintă modulul de elasticitate instantaneu

$$E_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.8)$$

Pentru toate testele de relaxare s-a admis o deformație specifică de aproximativ $0,25 \text{ mm/mm}$, aceasta fiind menținută pentru o perioadă de timp egală cu o oră. Pentru fiecare tip de material au fost efectuate câte trei teste de relaxare.

Testele de relaxare s-au efectuat pe mașina universală Zwick/Roell Z005 prin aplicarea unei solicitări de compresiune.

2.3.2. Teste de relaxare efectuate pe epruvete fabricate prin prototipare rapidă

Pentru epruvetele fabricate din materialul Agil-U, la menținerea constantă a deformației specifice de $\varepsilon_0 = 24 \%$, s-a determinat o tensiune inițială egală cu $\sigma_0 = 0,277 \text{ MPa}$.

Variația modului de relaxare $E(t)$ cu timpul pentru o epruvetă fabricată din materialul Agil-U este prezentată în Fig. 2.24.

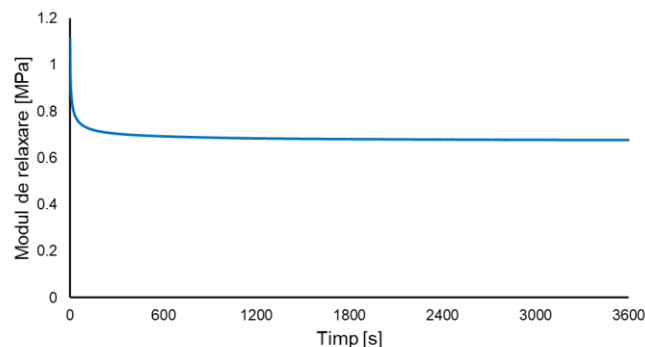


Fig. 2.24. Variația modului de relaxare $E(t)$ cu timpul pentru materialul Agil-U

Pentru o epruvetă fabricată din materialul Agil-U, variația modului de relaxare normalizat $e(t)$ cu timpul este prezentată în Fig. 2.25.

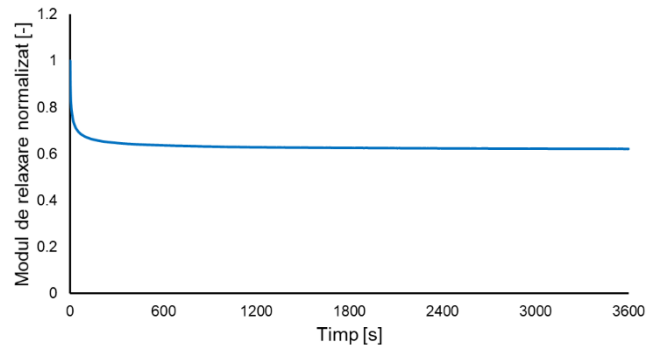


Fig. 2.25. Variația modului de relaxare normalizat $e(t)$ cu timpul pentru materialul Agil-U

Pentru epruvetele fabricate din TPU, la menținerea constantă a deformației specifice $\varepsilon_0 = 0,32\%$, s-a determinat o tensiune inițială egală cu $\sigma_0 = 7,047\text{ MPa}$.

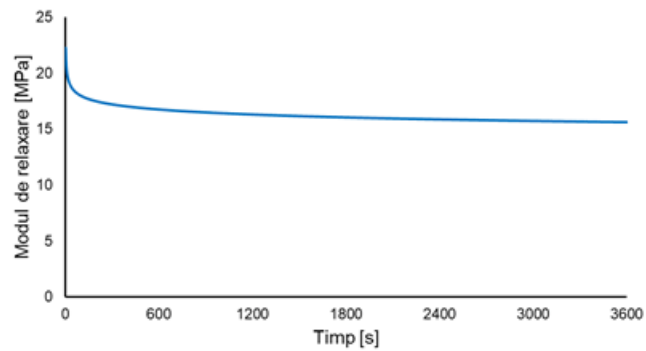


Fig. 2.26. Variația modului de relaxare $E(t)$ cu timpul pentru materialul TPU

Variația modului de relaxare $E(t)$ cu timpul pentru o epruvetă fabricată din materialul TPU este prezentată în Fig. 2.26.

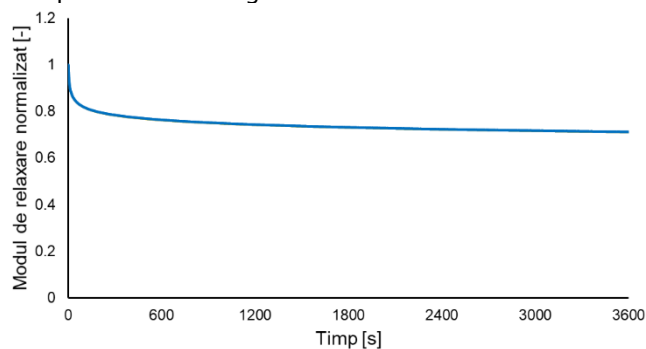


Fig. 2.27. Variația modului de relaxare normalizat $e(t)$ cu timpul pentru materialul TPU

Variația modului de relaxare normalizat $e(t)$ cu timpul pentru o epruvetă fabricată din materialul TPU este prezentată în Fig. 2.27.

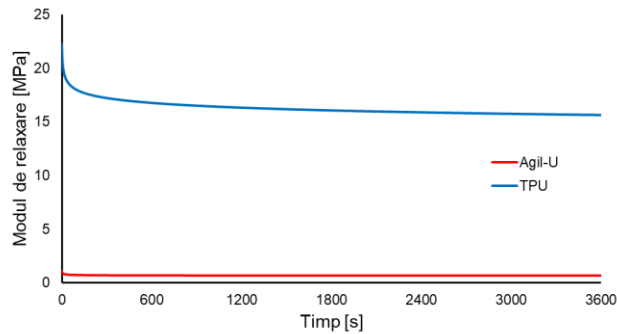


Fig. 2.28. Comparație între modulele de relaxare $E(t)$ ale materialelor Agil-U și TPU

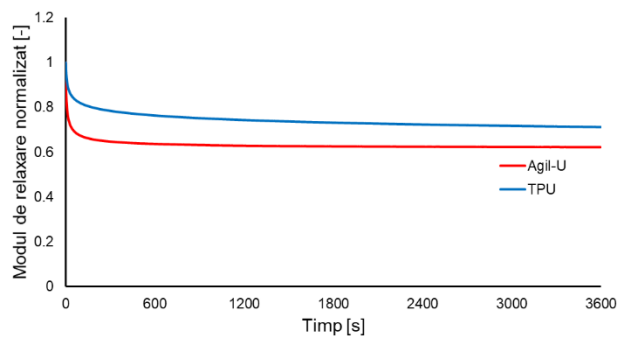


Fig. 2.29. Comparație între modulele de relaxare normalizate $e(t)$ ale materialelor Agil-U și TPU

În Fig. 2.28 și Fig. 2.29 sunt prezentate comparativ variațiile modului de relaxare $E(t)$, respectiv a modului de relaxare normalizat $e(t)$, pentru cele două materiale testate, Agil-U și TPU.

Rezultatele testelor de relaxare sunt prezentate într-o formă sintetică în Tabelul 2.6, prin valorile medii și abaterea standard. Pentru fiecare material au fost efectuate câte trei teste.

Tabelul 2.6. Rezultatele testelor de relaxare

		t_0			$t = 120 \text{ (sec.)}$			
		$\varepsilon_0 \left(\frac{mm}{mm}\right)$	$\sigma_0 \text{ (MPa)}$	$E_0 \text{ (MPa)}$	$\varepsilon \left(\frac{mm}{mm}\right)$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$E \text{ (MPa)}$	$e(t)$
Agil-U	Medie	0,24	0,277	1,171	0,24	0,180	0,750	0,652
	Abatere st.	0,016	0,002	0,089	0,019	0,012	0,020	0,046
TPU	Medie	0,32	7,047	22,319	0,32	5,732	18,013	0,813
	Abatere st.	0,001	0,006	0,092	0,003	0,011	0,230	0,001

Se constată că materialul Agil-U are un modul de relaxare mai redus decât materialul TPU. La timpul $t = 120 s$ se constată o reducere cu 35,96 % a modulului de relaxare pentru materialul Agil-U, respectiv cu 19,29 % pentru TPU. Același comportament este evidențiat și de evoluția modulului de relaxare normalizat.

2.4. Sollicitări ciclice

Încercările ciclice s-au efectuat în Laboratorul de Încercări al Centrului de Cercetare în Inginerie Medicală, Departamentul de Mecanică și Rezistența Materialelor. S-a utilizat mașina multiaxială pentru încercări statice și dinamice INSTRON 8874, Fig. 2.30 (a), cu următoarele caracteristici: forța axială maximă de 25 kN, momentul de torsiune maxim egal cu 100 Nm, deplasarea liniară maximă de 100 mm, respectiv deplasarea unghiulară maximă de 130°. Mașina multiaxială INSTRON 8874 este înzestrată cu software-urile de control și prelucrare a datelor *BlueHill* și *WaveMatrix*.

Ținând cont de rezultatele testelor de compresiune statică, încercările ciclice s-au efectuat în condițiile listate în Tabelul 2.7, conform recomandărilor din literatură [26, 27]. Nivelul sollicitării este determinat prin deformația specifică exprimată procentual.

Frecvența sollicitării de 0,5 Hz a rezultat din limitarea impusă de rigiditatea redusă a epruvetelor. Frecvența de citire a datelor a fost setată la 25 Hz.

Tabelul 2.7. Parametrii testelor ciclice

	Nivelul sollicitării	f (Hz)	F_{max} (N)	F_{min} (N)	ΔF (N)	F_{ampl} (N)	F_{med} (N)	N (cicluri)
EVA	1 (25%)	0,5	30	5	25	12,5	17,5	50
	2 (50%)	0,5	70	5	65	32,5	37,5	50
	3 (75%)	0,5	300	5	295	147,5	152,5	50
Agil-U	1 (25%)	0,5	165	5	160	80	85	50
	2 (50%)	0,5	565	5	560	280	285	50
	3 (60%)	0,5	3200	5	3195	1597,5	1602,5	50
TPU	1 (25%)	0,5	4300	100	4200	2100	2200	50
	2 (50%)	0,5	10000	100	9900	4950	5050	50
	3 75(%)	0,5	32300	100	32200	16100	16200	50



a)



b)

Fig. 2.30. Mașina multiaxială INSTRON 8874 (a) și efectuarea testelor ciclice pe Agil-U (b)

Încercările ciclice s-au efectuat la solicitarea de compresiune, Fig. 2.30 (b) pe epruvete cilindrice cu înălțimea h și diametrul d prezentate în Tabelul 2.4.

În cazul testelor efectuate pe materialul EVA, datorită complianței ridicate a materialului și capacitatea ridicată a celulei de forță a mașinii de încercat, rezultatele pentru nivelurile de solicitare de 25% respectiv 50% au determinat valori ale reacțiunii situate în marja de eroare a celulei de forță. Astfel, doar rezultatele pentru nivelul de solicitare de 75% au putut fi procesate. În Fig. 2.31 este prezentată o comparație între curba tensiune-deformație descrisă de o solicitare monotonă de compresiune și curbele tensiune-deformație pentru al 110-lea, 120-lea, 130-lea, 140-lea respectiv al 150-lea ciclu. Din imagine se poate observa că materialul EVA prezintă o disipare relativ redusă de energie (suprafața descrisă de curba de histererez). Efectele viscoelastice acumulate în timpul solicitărilor ciclice au determinat o scădere sensibilă a tensiunii pentru aceleași valori ale deformației, în comparație cu valorile determinate de testul monoton.

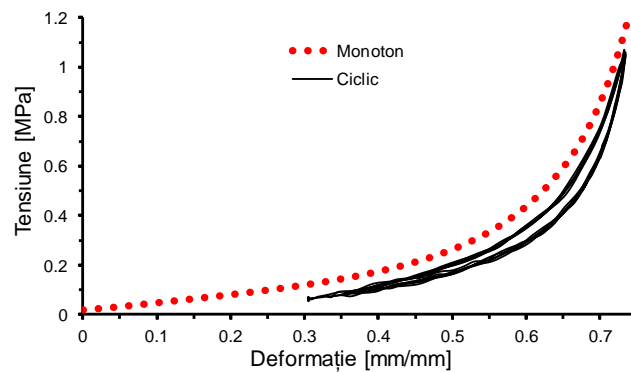


Fig. 2.31. Curbele ciclice tensiune-deformație pentru EVA

Rezultatele testelor ciclice sunt prezentate în Fig. 2.32 pentru materialul Agil-U. În acest caz, testele ciclice sunt reprezentate prin intermediul a 15 curbe (5 pentru fiecare nivel de solicitare, cu un increment de 10 cicluri).

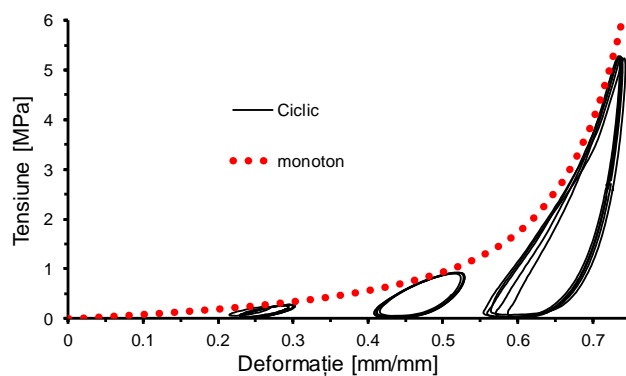


Fig. 2.32. Curbele ciclice tensiune-deformație pentru materialul Agil-U

În acest caz se poate observa o mai bună corelare a comportamentului la solicitări ciclice cu cel descris de testele monotone (curba tensiune-deformație a testelor monotone fiind tangentă la curbele descrise de testele ciclice), efectele viscoelastice fiind mai însemnate la valori relative mici ale tensiunii pentru fiecare nivel de solicitare.

Comparația între curba tensiune-deformație pentru un test monoton și curbele descrise de solicitările ciclice sunt prezentate în Fig. 2.33 pentru materialul TPU, observându-se un comportament similar cu cel al materialului Agil-U. Și în acest caz, curba tensiune-deformație descrisă de un test monoton este tangentă la curbele descrise de solicitările ciclice, iar efectele viscoelastice sunt mai pronunțate la valori relativ mici ale tensiunii rezultate din testele ciclice.

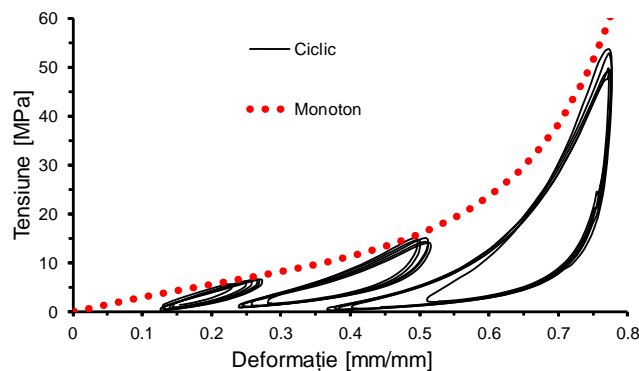


Fig. 2.33. Curbele ciclice tensiune-deformație pentru materialul TPU

Analizând rezultatele testelor ciclice se concluzionează că materialele investigate prezintă cele trei caracteristici specifice efectului Mullins: o scădere treptată a rigidității cauzată de solicitări ciclice multiple în aceleași intervale de tensiuni, reluarea traseului descris de un test monoton după ce s-a depășit valoarea maximă a tensiunii determinate în ciclurile anterioare și o buclă de histererezis descrisă în timpul descărcărilor [28, 29, 30].

3. CALIBRAREA MODELELOR DE MATERIAL VISCO-HIPERELASTIC

3.1. Baze teoretice

3.1.1. Introducere

Elasticitatea liniară consideră că, urmare solicitărilor, materialele prezintă o proporționalitate directă a tensiunii σ cu deformația ε prin intermediul modulului de elasticitate E .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Indiferent de material, comportamentul linear elastic se consideră a fi valid doar pentru valori reduse ale solicitării. Unele categorii de materiale (materialele ceramice, polimerii termorigizi, rășinile ranforsate cu fibre etc.) cedează în domeniul linear elastic, acest comportament fiind numit fragil. Majoritatea metalelor și a polimerilor termoplastici prezintă o modificare a pantei curbei tensiune-deformație după un anumit punct (denumit punct de curgere), datorită apariției deformațiilor plastice. În acest caz, cedarea se produce în domeniul plastic, acest comportament fiind denumit ductil. O a treia categorie de materiale prezintă un comportament neliniar de la începutul deformației. Acest comportament, denumit hiperelastic, este caracteristic materialelor care prezintă deformații foarte mari până la cedare (care pot depăși 500%, după cum s-a observat în capitolul anterior), exemple de astfel de materiale fiind cauciucul, elastomerii termoplastici, spume flexibile sau diverse țesuturi biologice. O comparație între curbele caracteristice pentru aceste trei clase de materiale este prezentată în Fig. 2.1.

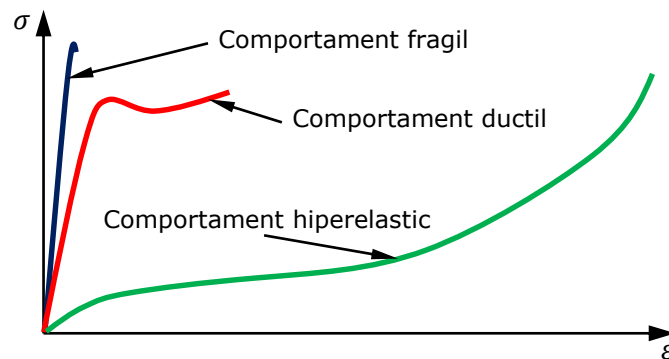


Fig. 3.1. Reprezentare schematică a tipurilor de curbe tensiune-deformație

Ținând cont de comportamentul mecanic al materialelor la deformații foarte mari, acestea pot fi clasificate în două categorii: materiale care suferă modificări volumice mici (în unele cazuri fiind considerate incompresibile) și materiale care suferă modificări volumice mari. Din prima categorie fac parte materialele din clasa cauciucurilor și elastomerilor termoplastici pe când din a doua categorie fac parte spumele flexibile (Fig. 3.2).

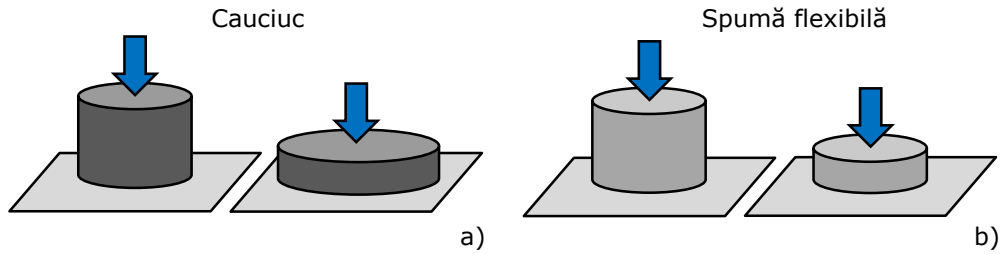


Fig. 3.2. Modificările volumice la deformații mari pentru cauciuc respectiv spume flexibile

După cum sugerează și numele, în cazul materialelor incompresibile, volumul unei epruvete rămâne constant în urma solicitărilor. Spre exemplu, considerând o solicitare de compresiune a unei epruvete cilindrice de rază inițială R și înălțime inițială H , având volumul inițial V

$$V = \pi R^2 H \quad (3.2)$$

în urma deformației, epruveta are o rază finală r și o înălțime finală h , volumul final v fiind

$$v = \pi r^2 h \quad (3.3)$$

Ținând cont de condiția de incompresibilitate

$$V = v \quad (3.4)$$

relațiile dintre dimensiunile epruvetei cilindrice înainte și după deformație sunt

$$\begin{aligned} \pi R^2 H &= \pi r^2 h \\ \frac{r^2 h}{R^2 H} &= 1 \\ \lambda_r \sqrt{\lambda_h} &= 1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

unde

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \quad (3.6)$$

reprezintă extensia specifică pe direcția radială, iar

$$\lambda_h = \frac{h}{H} \quad (3.7)$$

reprezintă extensia specifică pe direcția de compresiune.

Astfel, pentru acest exemplu, o scădere a înălțimii epruvetei cilindrice determină o creștere a razei după o funcție putere (Fig. 3.3).

$$r = \alpha h^{0.5} \quad (3.8)$$

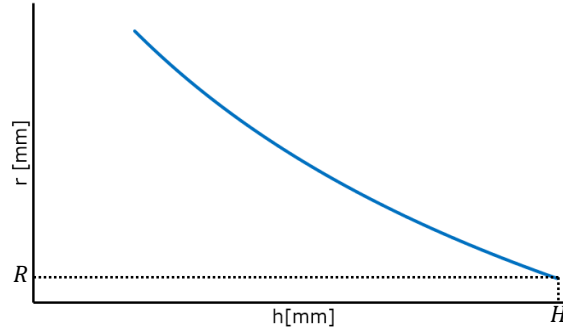


Fig. 3.3. Variația razei cilindului cu înălțimea

Ținând cont de definițiile deformației specifice în direcție radială ε_r respectiv longitudinală ε_h

$$\varepsilon_r = \frac{r - R}{R} = \lambda_r - 1 \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_h = \frac{h - H}{H} = \lambda_h - 1 \quad (3.10)$$

coeficientul lui Poisson se poate exprima prin

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_h} = -\frac{\lambda_r - 1}{\lambda_h - 1} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\lambda_h}} - 1}{\lambda_h - 1} \quad (3.11)$$

În cazul spumelor flexibile, precum cele utilizate în fabricarea tălpilor de încălțăminte sportivă sau a echipamentelor de protecție, în timpul deformației la comprimare, se observă o modificare nesemnificativă a razei cilindului. În cazul extrem, se poate considera că raza cilindului rămâne constantă, astfel că volumul final v al cilindului se exprimă prin:

$$v = \pi R^2 h \quad (3.12)$$

În consecință, relația dintre volumul inițial și volumul curent din timpul deformației este

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{\pi h}{v} = \frac{\pi H}{V} \\ \frac{h}{H} &= \frac{v}{V} \\ v &= \lambda_h V \end{aligned} \quad (3.13)$$

Astfel, se poate observa că volumul din timpul deformației v are o variație proporțională cu extensia specifică λ_h . Acest lucru devine semnificativ la deformații foarte mari, ținând cont că în timpul exploatării, λ_h poate atinge valori de sub 0,1 pentru solicitări de compresiune și peste 5 pentru solicitări de tracțiune.

3.1.2. Modele hiperelastice

Ținând cont de comportamentul nelinier al materialelor hiperelastice, legea lui Hooke nu poate fi utilizată în modelarea acestora [31, 32, 33]. În consecință, în aproximarea variației tensiunii cu deformația se utilizează ipoteza lui Green, care consideră energia potențială de deformație ψ (reprezentând lucrul mecanic pe care elementul de volum îl poate efectua în timpul deformației). Tensiunea este obținută prin derivarea energiei potențiale în raport cu deformația [34, 35]

$$\sigma = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} \quad (3.14)$$

Deoarece diversele formulări ale deformațiilor prezintă o divergență semnificativă la valori mari, funcțiile hiperelastice au fost exprimate prin extensiile specifice [36, 37]. De-a lungul anilor, s-au dezvoltat mai multe astfel de formulări, cele mai des utilizate fiind funcția polinomială, funcția polinomială redusă și funcția Ogden.

3.1.2.1. Funcția polinomială

Funcția polinomială are expresia [34, 35]

$$\psi = \sum_{i+j=1}^n C_{ij} (I_\lambda - 3)^i (II_\lambda - 3)^j + \sum_{k=1}^m \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad (3.15)$$

unde

$$I_\lambda = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3.16)$$

$$II_\lambda = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3.17)$$

$$J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \quad (3.18)$$

iar C_{ij} și D_k sunt constante de material, iar λ_1 , λ_2 respectiv λ_3 extensiile specifice în direcțiile principale.

Prima parte a relației modelează modificarea formei corpului în timpul deformației pe când a doua parte modelează modificarea volumului. În cazul materialelor incompresibile, $J = 1$, astfel că cel de-al doilea termen devine nul.

Un caz particular al funcției polinomiale se obține pentru $n = 1$, funcția fiind denumită Mooney-Rivlin.

$$\psi = C_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_{01}(\lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 - 3) \quad (3.19)$$

3.1.2.2. Funcția polinomială redusă

Funcția polinomială redusă neglijează termenul care depinde de II_{λ} , având forma [34, 35]

$$\psi = \sum_{i=1}^n C_i (I_{\lambda} - 3)^i + \sum_{k=1}^m \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad (3.20)$$

Un caz particular al acestei funcții, pentru $n = 1$, are denumirea de funcția Neo-Hooke, fiind primul model matematic utilizat în simularea comportamentului materialelor hiperelastice.

$$\psi = C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (3.21)$$

Un alt caz particular des întâlnit în aplicațiile numerice este funcția Yeoh, pentru care se consideră $n = 3$

$$\psi = C_1 (I_{\lambda} - 3) + C_2 (I_{\lambda} - 3)^2 + C_3 (I_{\lambda} - 3)^3 \quad (3.22)$$

3.1.2.3. Funcția Ogden

Funcția Ogden consideră două constante de material (μ_i respectiv α_i) pentru fiecare ordin, având forma [38]

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} [\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3] \quad (3.23)$$

3.1.3. Modele pentru spume flexibile

Funcția utilizată la modelarea spumelor flexibile are la bază formularea Ogden, incluzând un termen suplimentar, care ajustează relația energiei specifice pentru deformații volumice mari [39]

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left\{ \hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} [(J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1] \right\} \quad (3.24)$$

unde

$$J^{el} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (3.25)$$

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (3.26)$$

$$\nu_x = \nu_z = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y} \quad (3.27)$$

3.1.4. Efectul Mullins

Efectul Mullins reprezintă un fenomen observat în cazul solicitărilor ciclice aplicate elastomerilor, fiind caracterizat prin trei aspecte:

- 1) În cazul solicitărilor ciclice (încărcare-descărcare), curba tensiune-deformație din timpul descărcării descrie un traseu diferit de cel observat în timpul încărcării. Astfel, va rezulta un fenomen de histererezis, reprezentând o măsură a energiei disipată prin efectele viscoelastice (care este, în mare măsură, reversibilă) [40].

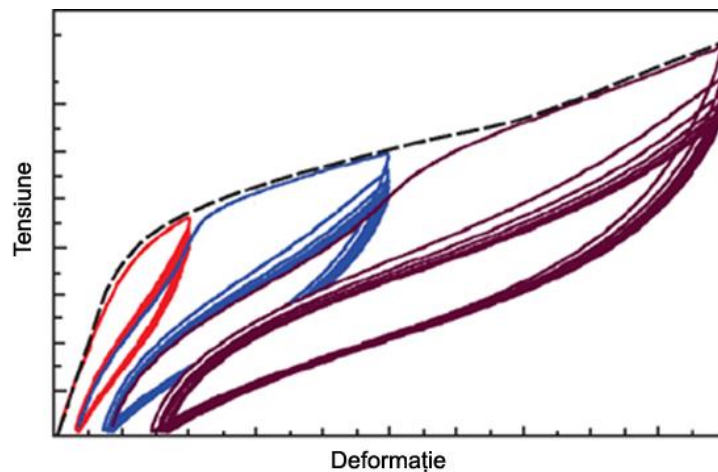


Fig. 3.4. Efectul Mullins [39]

- 2) În cazul mai multor solicitări ciclice la aceeași amplitudine, se observă o scădere progresivă a rigidității materialului până într-un anumit punct (de regulă, după un interval de 10-50 de cicluri, depinzând de material [41]). În urma acestor solicitări ciclice se determină răspunsul stabilizat al materialului [42].
- 3) În cazul în care, în urma mai multor solicitări ciclice la aceeași amplitudine, materialul este supus unei tensiuni mai mari, curba tensiune-deformație va urma traseul descris de curba tensiune-deformație determinată în urma unui test monoton [43].

Cel mai des utilizat model matematic în simularea efectului Mullins este reprezentat de formularea Ogden-Roxburgh [44, 45]. Acest model presupune descompunerea energiei specifice de deformație Ψ în două componente: energia specifică de deformație efectivă ψ și energia disipată ϕ . Energia specifică de

deformație efectivă reprezintă energia specifică totală diminuată prin înmulțirea sa cu un parametru η .

$$\begin{aligned}\psi &= \eta\Psi, \quad \eta \in (0, 1] \\ \Psi(\lambda_i, \eta) &= \eta\Psi(\lambda_i) + \phi(\eta)\end{aligned}\tag{3.28}$$

Parametrul adimensional η este definit ca o funcție de energia specifică totală Ψ înregistrată la o anumită deformație, energia specifică totală maximă înregistrată în istoria deformației Ψ^{max} (valoarea maximă a energiei specifice care s-a înregistrat în timpul solicitărilor anterioare) și trei constante de material r , m și β . Variația parametrului adimensional η se exprimă prin intermediul funcției de eroare $\text{erf}(x)$

$$\eta(\Psi) = 1 - \frac{1}{r} \text{erf}\left(\frac{\Psi^{max} - \Psi}{m + \beta \cdot \Psi^{max}}\right)\tag{3.29}$$

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt\tag{3.30}$$

Conform definiției, componentele tensorului tensiunilor efective $\hat{\sigma}$ se determină prin derivarea energiei specifice totale în raport cu extensiile specifice principale. Ținând cont de faptul că energia disipată ϕ nu este o funcție de extensiile specifice, derivata acesteia va fi nulă, astfel că tensiunea efectivă va fi egală cu tensiunea totală înmulțită cu parametru η .

$$\hat{\sigma} = \frac{\partial \Psi(I_1^\lambda, I_2^\lambda, I_3^\lambda)}{\partial \lambda_i} = \eta(\Psi) \cdot \sigma(\lambda_i)\tag{3.31}$$

La prima solicitare, energia specifică maximă este egală cu energia specifică din timpul deformației $\Psi(\lambda_i) = \Psi^{max}$, astfel că parametru $\eta(\Psi)$ va fi egal cu 1, iar energia disipată ϕ va fi nulă. În cazul descărcării de la o anumită valoare a tensiunii, valoarea energiei specifice maximă Ψ^{max} va corespunde tensiunii maxime (de la finalul încărcării σ_1) $\Psi_{\sigma_1}^{max}$, parametru $\eta(\Psi)$ căpătând valori subunitare, micșorându-se pe măsură ce deformația materialului scade (Fig. 3.5).

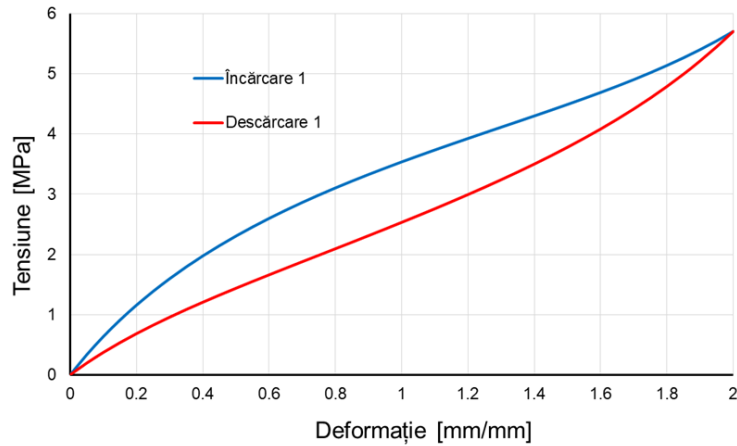


Fig. 3.5. Primul ciclu de încărcare-descărcare

Pentru un al doilea ciclu cu o amplitudine σ_2 mai mare decât cea corespunzătoare primului ciclu σ_1 , valoarea parametrului $\eta(\Psi)$ va crește până la atingerea valorii de 1, în momentul în care $\Psi(\lambda_i) = \Psi_{\sigma_1}^{max}$, corespunzătoare stării de solicitare $\sigma(\lambda_i) = \sigma_1$. Din acest punct, valoarea energiei specifice din timpul deformației va avea valoarea maximă în fiecare increment $\Psi(\lambda_i) = \Psi^{max}$ până la atingerea valorii tensiunii maxime din acest ciclu $\Psi_{\sigma_2}^{max}$. În timpul descărcării, similar primului ciclu, valoarea parametrului $\eta(\Psi)$ se va diminua pe măsura scăderii deformației (Fig. 3.6).

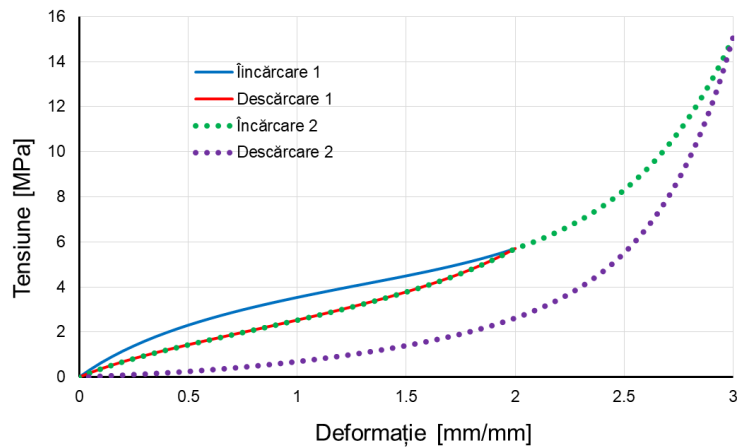
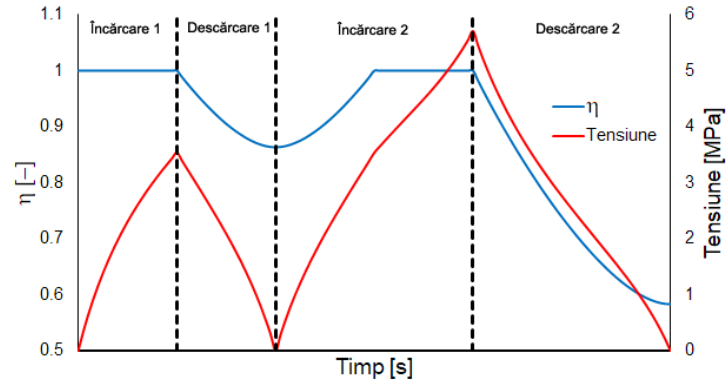


Fig. 3.6. Curba tensiune-deformație pentru două cicluri de solicitare

Influența parametrului η asupra variației tensiunii cu timpul este prezentată în Fig. 3.7.

Fig. 3.7. Variația parametrului η și a tensiunii cu timpul

3.1.5. Modele viscoelastice

Viscoelasticitatea reprezintă proprietatea materialelor de a avea în timpul deformației atât caracteristici atribuite solidelor (elasticitate liniară, hiperelasticitate) cât și caracteristici atribuite fluidelor (viscozitate) [46, 47, 48]. Din punct de vedere matematic, acest lucru se poate modela prin mai multe metode, cele mai des întâlnite fiind cea care are la bază principiul lui Boltzmann (principiul superpoziției) respectiv cea care are la bază modelele reologice.

Pentru o sollicitare de fluaj la o tensiune constantă σ_0 , deformația variază cu timpul prin intermediul complianței $D(t)$

$$\varepsilon(t) = D(t) \cdot \sigma_0 \quad (3.32)$$

În cazul aplicării unei tensiuni σ_1 la momentul t_1 , deformația va evolua conform relației

$$\varepsilon(t) = D(t - t_1) \cdot \sigma_1 \quad (3.33)$$

Principiul lui Boltzmann postulează că fiecare tensiune acționează independent, efectele tensiunilor fiind cumulate

$$\varepsilon(t) = D(t) \cdot \sigma_0 + D(t - t_1) \cdot \sigma_1 \quad (3.34)$$

Principiul lui Boltzmann este reprezentat grafic în Fig. 3.8

Acest fenomen se poate generaliza pentru un număr oarecare n de sollicitări

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot D(t - t_i) \quad (3.35)$$

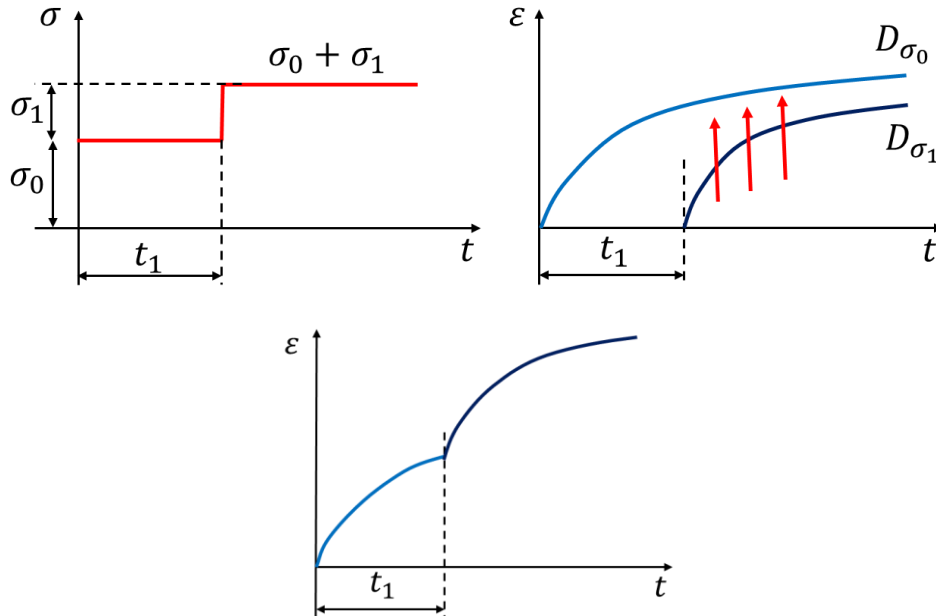


Fig. 3.8. Principiul lui Boltzmann pentru două tensiuni aplicate succesiv

În cazul unei solicitări continue $\sigma = \sigma(\tau)$, variația tensiunii se poate considera ca o însumare a unor tensiuni care acționează la intervale infinitesimale de timp $d\tau$, astfel că suma poate fi transformată într-o integrală.

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} D(t - \tau) d\tau \quad (3.36)$$

În mod analog, principiul lui Boltzmann se poate aplica și în cazul solicitărilor de relaxare, prin intermediul modului de relaxare E

$$\sigma(t) = \int_0^t \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} E(t - \tau) d\tau \quad (3.37)$$

Modelele reologice consideră comportamentul materialului ca fiind determinat de două componente distincte. O componentă elastică (care poate să fie descrisă atât de un comportament elastic cât și de un comportament hiperelastic) și o componentă vâscoasă (care poate fi caracterizată de viscozitate newtoniană sau non-newtoniană). Cele două componente pot fi schematizate sub forma unui resort respectiv a unui amortizor.

Primele formulări viscoelastice au fost formulate de James Clerk Maxwell (fluidul Maxwell) și William Thomson, 1st Baron Kelvin (solidul Kelvin).

Fluidul Maxwell consideră elementul elastic legat în serie cu elementul vâscos (Fig. 3.9 a) [34].

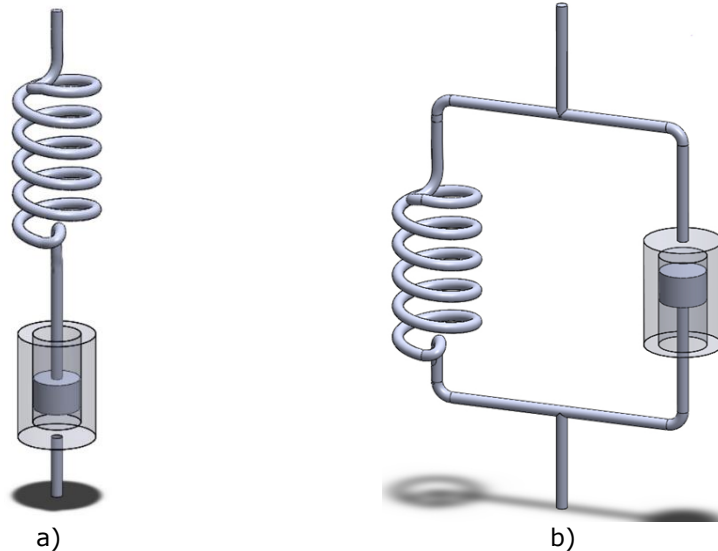


Fig. 3.9. Modelul reologic pentru fluidul Maxwell (a) și solidul Kelvin (b) [49]

Relația constitutivă pentru acest model este definită de o ecuație diferențială de forma

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{\sigma(t)}{\mu} \quad (3.38)$$

unde ε este deformația modelului, σ este tensiunea din model, E este constanta elastică a resortului iar μ este vâscozitatea amortizorului.

Solidul Kelvin presupune conectarea celor două componente în paralel (Fig. 3.9 b), modelul fiind caracterizat de relația constitutivă [34]

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \cdot E + \mu \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3.39)$$

De-a lungul timpului, s-au dezvoltat o serie de modele bazate pe cele două formulări de bază, constând în legarea în serie sau în paralel a acestora sau a unor elemente (fie elemente elastice, fie elemente vâscoase). În programele de analiză prin metoda elementului finit, cel mai des implementat model este modelul Kelvin-Voigt generalizat, care constă într-o conectare în serie a unui resort cu mai multor modele Kelvin (Fig. 3.10).

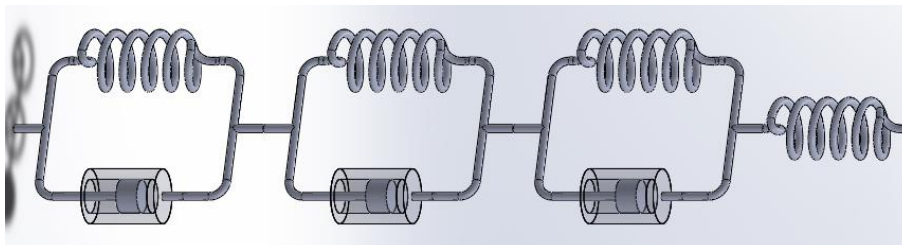


Fig. 3.10. Modelul Kelvin-Voigt generalizat

Aplicând principiul lui Boltzmann pentru acest model, se poate demonstra forma ecuației constitutive [34, 39]

$$\varepsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_0} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} (1 - e^{-t/\tau_i}) \right] \quad (3.40)$$

unde E_0 este rigiditatea resortului liber, E_i reprezintă rigiditățile resorturilor în elementele Kelvin iar τ_i reprezintă timpii de relaxare

$$\tau_i = \frac{\mu_i}{E_i} \quad (3.41)$$

În simulările numerice, în scopul aplicării modelului viscoelastic pentru orice fel de elasticitate, se utilizează modulul de elasticitate normalizat $e(t)$

$$e(t) = \frac{E(t)}{E(0)} = 1 - \sum_{i=1}^N e_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3.42)$$

unde e_i reprezintă modulele de relaxare normalizate

Astfel, rigiditatea materialului definită de relația sa constitutivă (elasticitate liniară, hiperelasticitate, modele pentru spume flexibile etc) este diminuată prin intermediul modelului de elasticitate normalizat. Relația (3.42) poartă numele de seria Prony, perechile de valori (e_i, τ_i) fiind determinate în urma calibrării funcției cu ajutorul datelor experimentale.

Trebuie remarcat faptul că, deși în forma schematizată, modelele reologice pot fi supuse doar solicitărilor de tracțiune sau compresiune, aceste formulări se pot aplica pentru orice tip de solicitare (forfecare, solicitări biaxiale, triaxiale etc.).

3.1.6. Procesul de calibrare al modelelor numerice

În scopul reproducerii cât mai exacte a comportamentului materialelor în analize numerice, trebuie incorporate toate caracteristicile descrise în acest capitol. Astfel, datele experimentale obținute pentru solicitări monotone vor fi utilizate în calibrarea preliminară a modelelor pentru spumele flexibile respectiv a modelelor hiperelastice, datele experimente obținute pentru solicitări ciclice vor fi utilizate în calibrarea modelului Ogden-Roxburgh (efectul Mullins) iar datele experimentale obținute în urma solicitărilor de relaxare vor fi utilizate în calibrarea seriei Prony (comportamentul viscoelastic). Implementarea seriei Prony în modelul de material va determina o influență a timpului asupra curbei caracteristice, valorile tensiunilor diminuându-se pe măsură ce viteza de deformație scade.

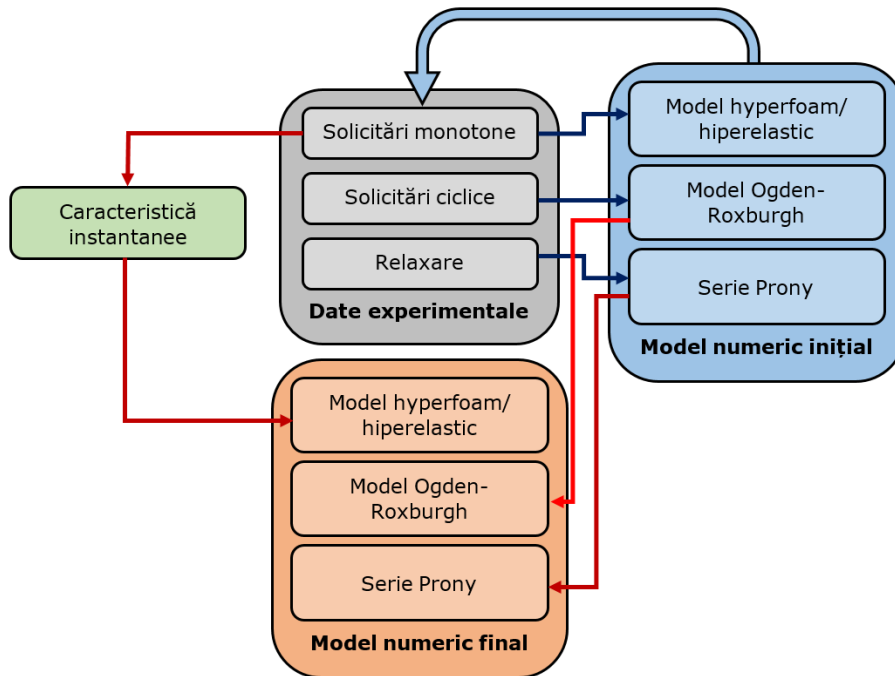


Fig. 3.11. Flow-chart-ul procesului de calibrare a modelelor de materiale

Astfel, în scopul obținerii unor rezultate exacte, valorile tensiunilor determinate experimental trebuie augmentate în scopul aproximării unui răspuns instantaneu al materialului (echivalent unor teste monotone efectuate la viteze de deformare suficient de mari astfel încât fenomenele viscoelastice să nu poată avea loc). Procesul este schematizat în Fig. 3.11.

În consecință, prima etapă a calibrării modelelor de material va consta în efectuarea unor analize numerice pentru solicitări monotone la viteza de deformare stabilită pentru încercările experimentale. Rezultatele obținute se vor compara cu valorile experimentale, determinându-se astfel un factor de augmentare al tensiunilor, prin împărțirea valorilor tensiunilor rezultate experimental la valorile tensiunilor determinate de simulări, pentru aceeași valoare a deformației.

A doua etapă se va aproxima răspunsul instantaneu al materialelor utilizând valorile tensiunilor determinate experimental, augmentate cu factorii determinați. Modelele de spume flexibile/hiperelastice se vor calibra din nou utilizând noile date. Modelele finale de materiale vor consta în funcțiile *hyperfoam*/hiperelastice recalibrate, modelele Ogden-Roxburgh respectiv seriile Prony, parametrii evaluați în prima etapă pentru ultimele două modele constitutive rămânând neschimbați. Validarea modelelor finale se va realiza prin efectuarea unor analize numerice pentru solicitări monotone respectiv pentru solicitări de relaxare, și compararea rezultatelor cu cele determinate experimental.

3.2. Calibrarea modelelor pentru spume flexibile

3.2.1. Determinarea preliminară a coeficienților modelului de material pentru spume flexibile

În prima fază, se calibrează modelele de material pentru spume flexibile pe baza încercărilor cvasi-stactice la compresiune. Ținând cont de comportamentul viscoelastic al materialului, parametrii rezultați după această calibrare vor corespunde comportamentului materialului la o viteză de deformație de 1.333 %/s (echivalentul unei viteze de încărcare de 10 mm/min). Comportamentul instantaneu al materialului va fi aproximat ulterior luând în seamă curba de relaxare.

Pentru a putea efectua calibrarea modelelor matematice, este necesară determinarea variației energiei specifice de deformație ψ cu deformația ε . Conform definiției, energia specifică de deformație reprezintă suprafața delimitată de curba tensiune-deformație. Din punct de vedere matematic, valoarea energiei specifice la o anumită deformație evaluează prin integrarea funcției tensiunii între limitele specificate:

$$\psi(\varepsilon_n) = \int_0^{\varepsilon_n} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.43)$$

Ținând cont de faptul că variația tensiunii cu deformația nu se poate exprima exact printr-o funcție analitică, variația energiei specifice cu deformația se obține utilizând regula trapezului de integrare numerică.

$$\psi(\varepsilon_n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})(\sigma_i + \sigma_{i-1}) \quad (3.44)$$

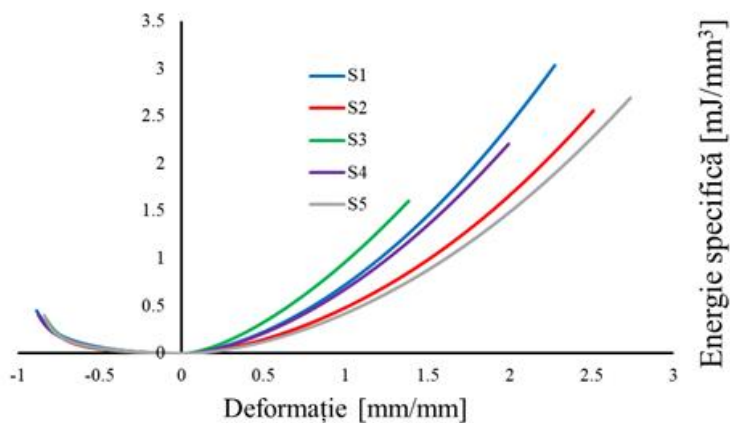


Fig. 3.12. Variația energiei specifice cu deformația pentru materialele prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă

Pentru început, pentru spumele flexibile, s-au utilizat date provenind atât din încercările de compresiune, cât și din încercările de tracțiune. Variația energiei

specifice cu deformația pentru cele cinci materiale investigate este prezentată în Fig. 3.12.

Pe baza acestor date, pentru fiecare material, s-a calibrat modelul Ogden de ordinul 3 pentru spume flexibile, utilizând algoritmul de aproximare în sensul celor mai mici pătrate [50, 51].

$$\psi = \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left\{ \hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} [(J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1] \right\} \quad (3.45)$$

Extensiile specifice pe direcțiile principale $\hat{\lambda}_i$ au fost determinate din deformațiile nominale

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_1 = \varepsilon_y + 1 \\ \hat{\lambda}_2 = \varepsilon_x + 1 \\ \hat{\lambda}_3 = \varepsilon_z + 1 \end{cases} \quad (3.46)$$

unde ε_y este deformația axială obținută experimental, iar deformațiile transversale ε_x respectiv ε_z s-au evaluat în funcție de coeficientul lui Poisson ν . Pentru spumele investigate, ținând seama de deformațiile transversale foarte mici observate experimental, valoarea aleasă pentru coeficientului lui Poisson a fost de 0,05, deformațiile transversale fiind definite prin

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = -\varepsilon_y \cdot \nu \quad (3.47)$$

În urma calibrării, s-au determinat constantele de material prezentate în Tabelul 3.1

Tabelul 3.1. Constantele modelului de material pentru spume flexibile

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	β_1	β_2	β_3
S1	0,481	3,009	0	1	0	1	0,005	0,005	0,005
S2	0,324	2,963	0	1	0	1	0,005	0,005	0,005
S3	0,438	4,443	0	1	0	1	0,005	0,005	0,005
S4	0,511	2,871	0	1	0	1	0,005	0,005	0,005
S5	0,353	2,608	0	1	0	1	0,005	0,005	0,005

Din datele prezentate în Tabelul 3.1 se poate observa că modelul Ogden de spume flexibile este redus la ordinul I. Comparația între variația curbelor determinate analitic și cele obținute experimental este prezentată în Fig. 3.13 pentru cele cinci materiale.

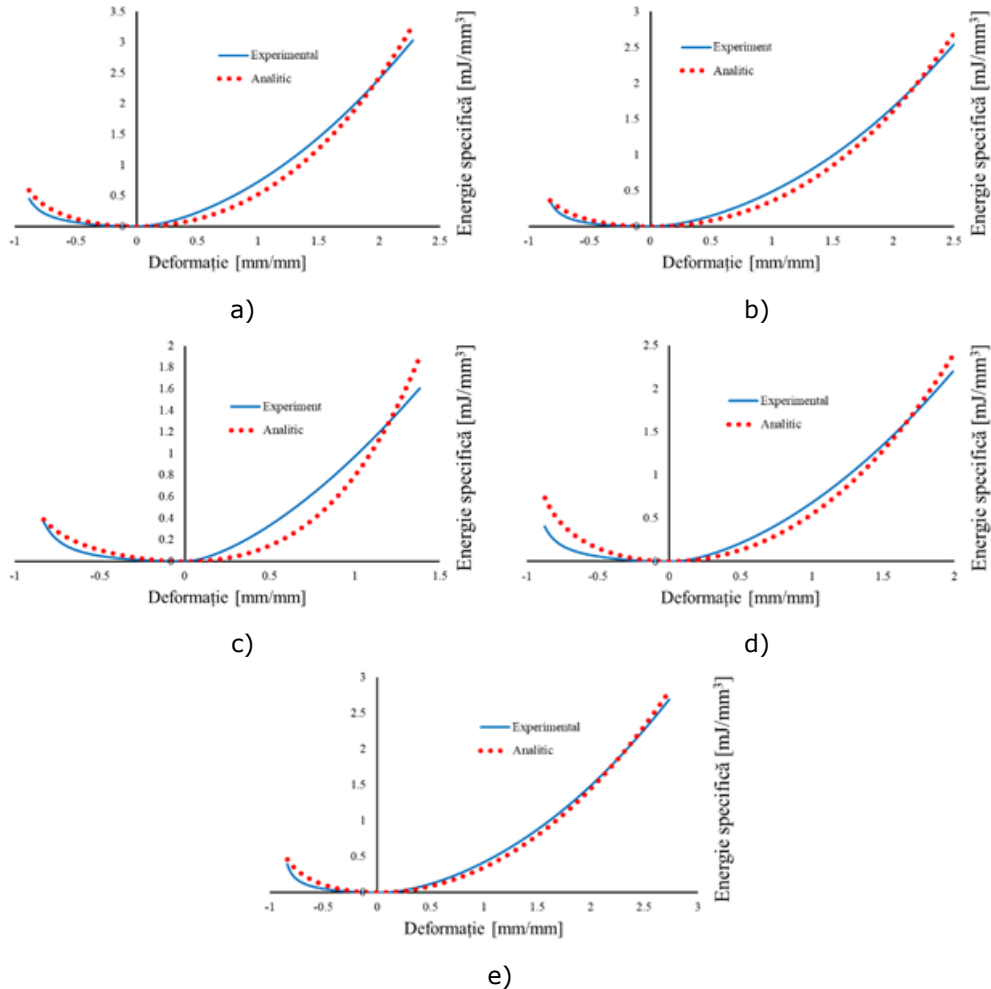


Fig. 3.13. Variația experimentală și analitică a energiei specifice cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)

Expresia analitică a energiei specifice de deformație se poate deriva în raport cu extensia specifică $\hat{\lambda}_1$, determinându-se astfel variația analitică a tensiunii normale pe direcție longitudinală cu deformația axială

$$\begin{cases} \sigma_y = \frac{\partial \psi}{\partial \hat{\lambda}_1} = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left[\hat{\lambda}_1^{\alpha_i-1} - \hat{\lambda}_1^{-\left(\frac{1}{2}\alpha_i+1\right)} \right] \\ \varepsilon_y = \hat{\lambda}_1 - 1 \end{cases} \quad (3.48)$$

Comparații între variațiile experimentale și analitice ale tensiunii cu deformația pentru cele cinci materiale sunt prezentate în Fig. 3.14

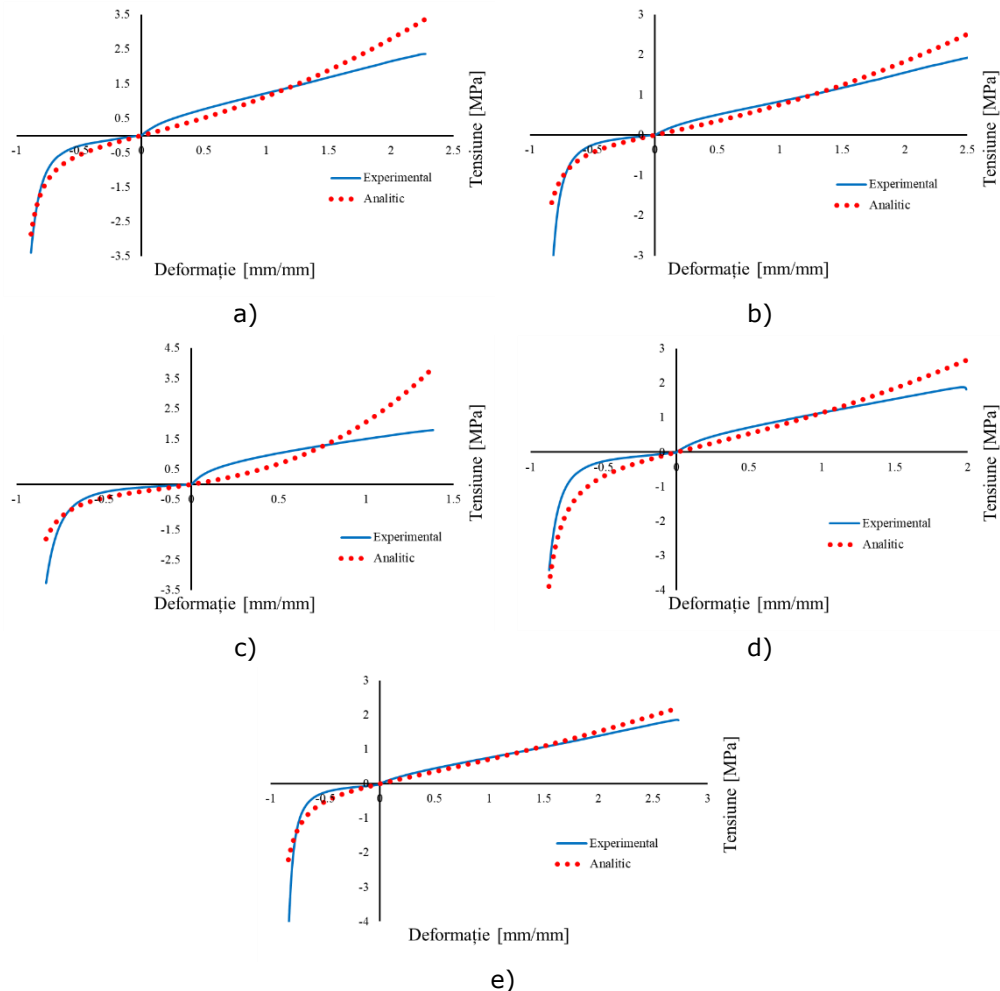


Fig. 3.14. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)

Din graficele prezentate se poate observa că, în majoritatea cazurilor, există o concordanță rezonabilă între datele experimentale și cele analitice, acest lucru fiind mai evident în cazul în comparației între curbele tensiune-deformație. Ținând cont de faptul că în timpul solicitărilor, spumele flexibile utilizate în aplicații sportive sunt predominant supuse la compresiune (solicitările de tracțiune apărând doar în cazul încovoierii anumitor componente, precum tălpile încălțămintei), în scopul obținerii unor predicții mai exacte pentru comportamentul materialelor, modelele de spume flexibile au fost calibrate doar pentru solicitările de compresiune. Astfel, constantele de material pentru funcția Ogden de ordinul 3 obținute în urma noului proces de calibrare sunt prezentate în Tabelul 3.2

3.2 – Calibrarea modelelor de spume flexibile 85

Tabelul 3.2. Constantele modelului de material pentru spume flexibile obținute în urma calibrării materialelor pentru solicitări de compresiune

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	β_1	β_2	β_3
S1	0,308	12,88	0,072	$2,28 \cdot 10^{-5}$	0	1	0,005	0,005	0,005
S2	0,372	35,04	$4,05 \cdot 10^{-4}$	$3,26 \cdot 10^{-4}$	0,102	3,829	0,005	0,005	0,005
S3	0,438	29,19	0,02	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0,065	6,908	0,005	0,005	0,005
S4	0,089	31,17	0,024	$2,26 \cdot 10^{-4}$	0,223	6,713	0,005	0,005	0,005
S5	0,048	59,37	0,017	$2,26 \cdot 10^{-4}$	0,309	10,16	0,005	0,005	0,005

Comparațiile între curbele deformație-energie specifică determinate analitic și cele obținute experimental sunt prezentată în Fig. 3.15 pentru cele cinci materiale.

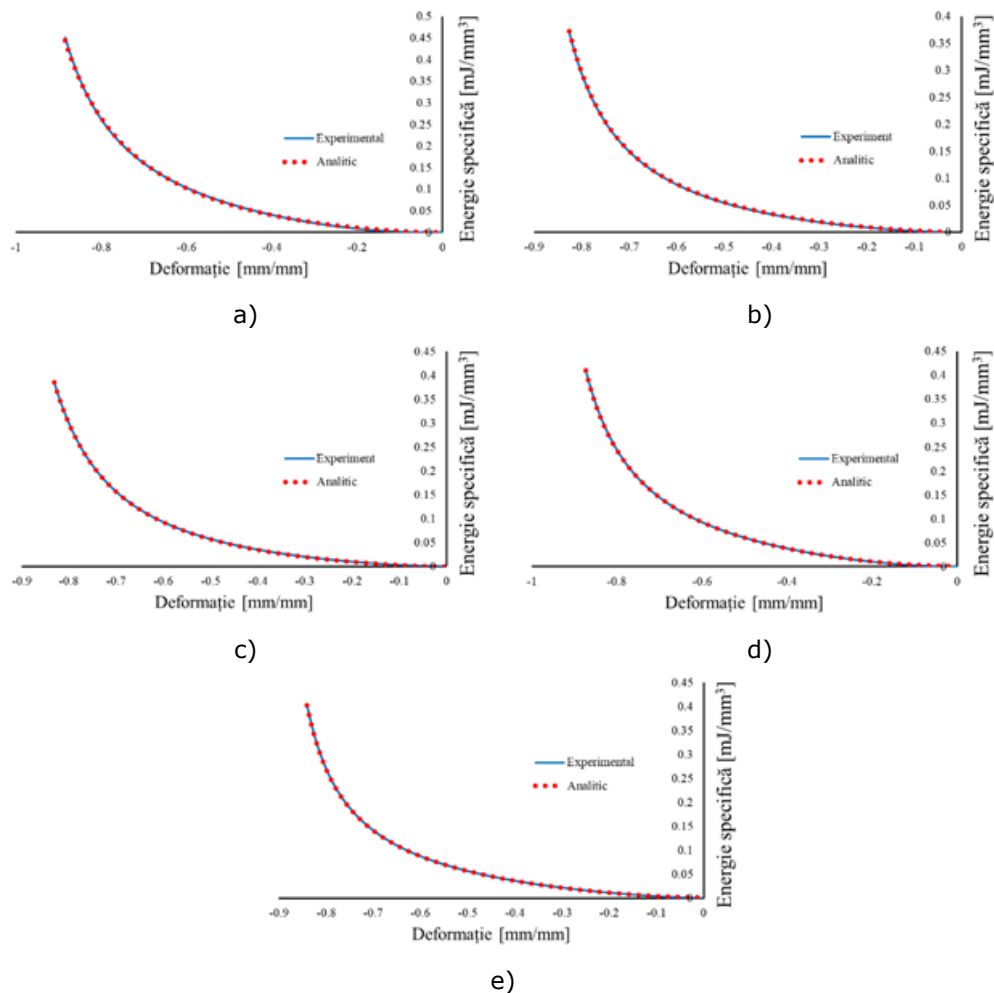


Fig. 3.15. Variația experimentală și analitică a energiei specifice cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)

Comparațiile între variațiile experimentale și analitice ale tensiunii cu deformația pentru cele cinci materiale sunt prezentate în Fig. 3.16

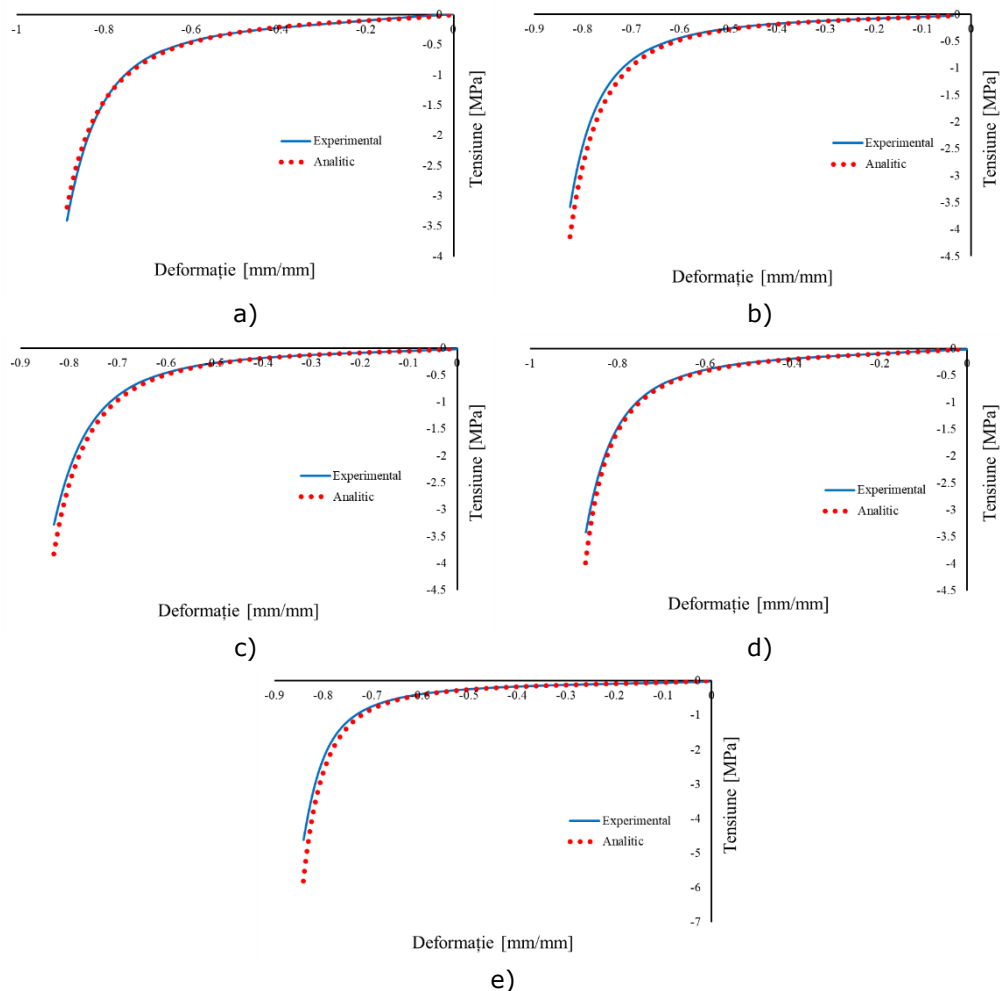


Fig. 3.16. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru materialele S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)

Constantele de material determinate analitic au fost implementate în modele numerice, calibrarea modelelor fiind evaluată prin intermediul analizelor prin metoda elementului finit, efectuate în pachetul software Abaqus.

Modelul numeric a constat dintr-o componentă deformabilă de formă cilindrică (diametru de 20mm și înălțime de 6mm) și două suprafețe rigide analitice (Fig. 3.17).

Cilindrul a fost discretizat prin intermediul a 1200 de elemente hexaedrice liniare, cu integrare redusă și formulare hibridă (C3D8RH).

Între cele trei componente s-au stabilit interacțiuni cu formulări de contact normale și tangențiale (cu coeficient de frecare de 0,1).

În cadrul condițiilor pe contur, suprafața inferioară a fost încastrată iar suprafețele superioare i s-a atribuit o deplasare pe axa Y.

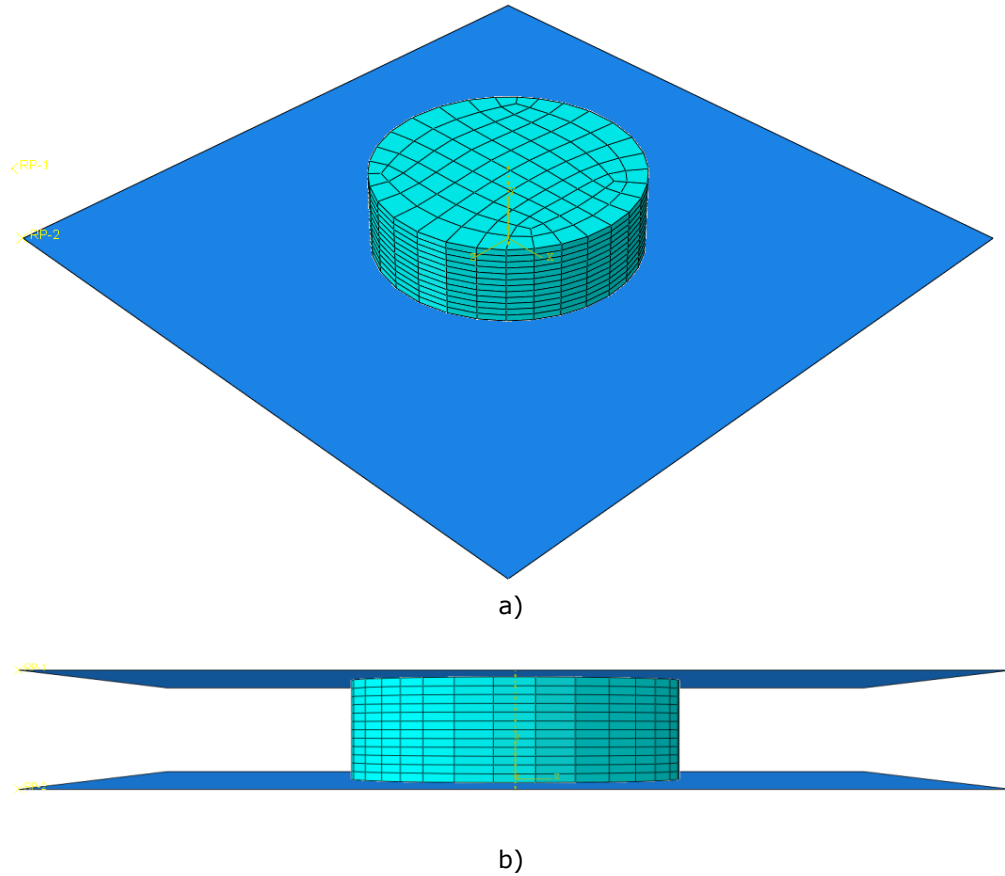


Fig. 3.17. Ansamblul modelului utilizat în analizele numerice: vedere izometrică fără placa superioară (a) și vedere laterală (b)

În Fig. 3.18 este prezentat modelul nedeformat și geometria sa la finalul analizei. Datele de ieșire înregistrate au fost deplasare suprafeței superioare și reacțiunea pe axa Y din suprafața fixă.

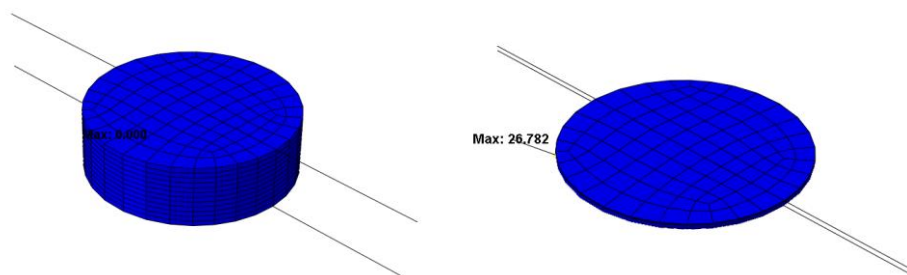


Fig. 3.18. Modelul numeric în configurație inițială și la finalul analizei

Curbele forță-deplasare au fost transformate în tensiune-deformație (ținând cont de dimensiunile cilindului), rezultatele pentru fiecare tip de spumă flexibilă fiind prezentate în Fig. 3.19, alături de valorile experimentale și cele analitice.

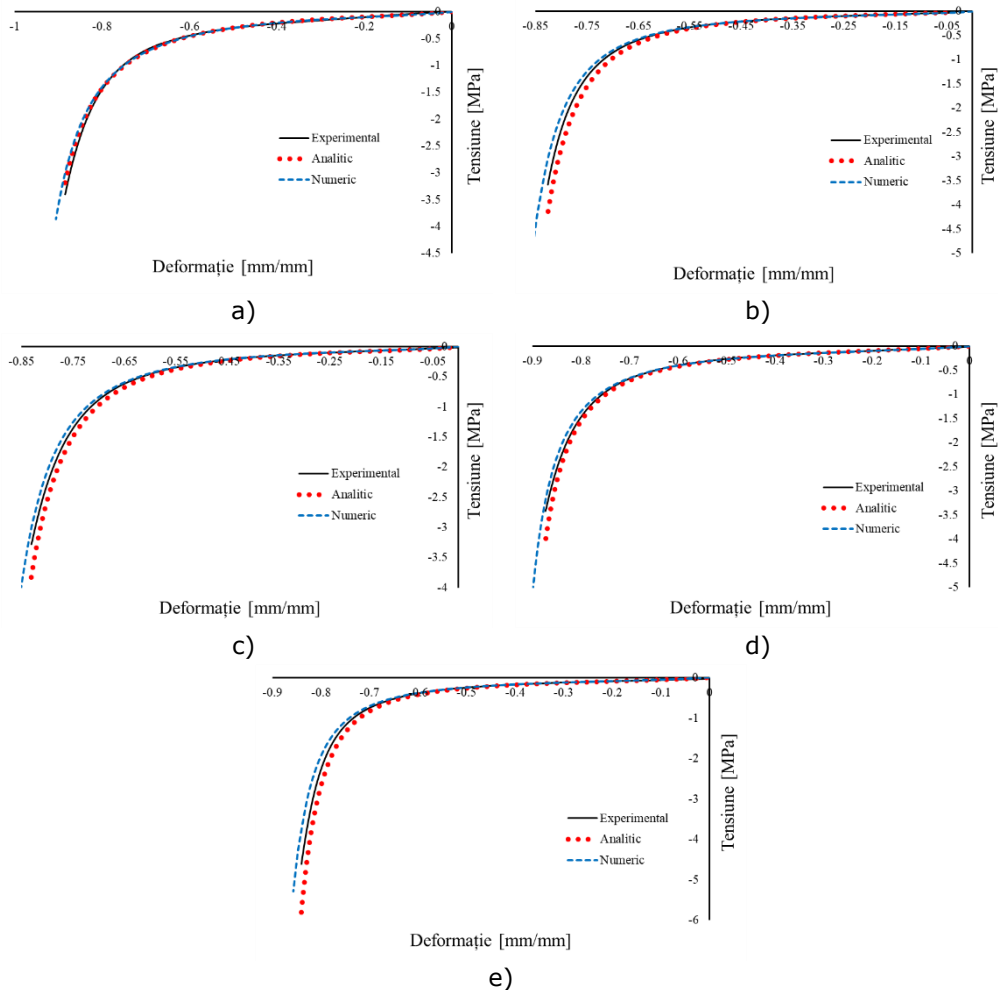


Fig. 3.19. Variația experimentală, analitică și numerică a tensiunii cu deformația pentru materialul S1 (a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) și S5 (e)

Din grafice se poate observa că parametrii modelelor de spumă flexibilă au determinat rezultate în bună concordanță pentru fiecare material investigat, validând astfel calibrarea.

3.2.2. Calibrarea modelului Ogden-Roxburgh

Așa cum s-a prezentat în Capitolul 2, datorită complianței ridicate a spumei EVA, testele ciclice au determinat rezultate valide doar pentru al treilea bloc de cicluri. Astfel, valorile experimentale obținute pentru ultimul ciclu (al 150-lea) au fost utilizate în calibrarea modelului Ogden-Roxburgh (Relația (3.29)).

Calibrarea s-a realizat utilizând metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate, rezultând parametrii din Tabelul 3.3

Tabelul 3.3. Constantele de material obținute în urma calibrării modelului Ogden-Roxburgh

r	b	m
3,2956	0,0001	0,06152

Variația modelului analitic, comparată cu valorile experimentale, este prezentată în Fig. 3.20.

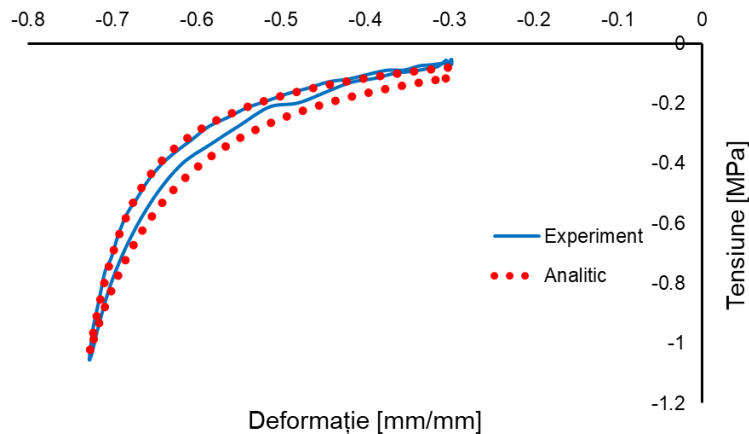


Fig. 3.20. Rezultatele calibrării modelului Ogden-Roxburgh pentru spuma flexibilă

3.2.3. Determinarea curbei de relaxare

Așa cum s-a prezentat în Paragraful 3.1.5, în calibrarea seriilor Prony, este necesară introducerea curbei de relaxare normalizată, care se determină prin divizarea valorilor tensiunii la diferite intervale de timp la tensiunea inițială. Datorită faptului că în testele de relaxare, tensiunea maximă este atinsă după o durată de 34,4 secunde (timp în care materialul este supus efectelor viscoelastice), valoarea tensiunii instantanee virtuale trebuie evaluată.

Acest lucru s-a realizat utilizând polinomul de interpolare Lagrange [50, 51], determinându-se un polinom de gradul 2 pe baza a 3 puncte pre-definite (perechi de valori alese de pe curba tensiune-deformație). Polinomul de interpolare are expresia

$$L_2(t) = \sigma_1 \frac{(t-t_2)(t-t_3)}{(t_1-t_2)(t_1-t_3)} + \sigma_2 \frac{(t-t_1)(t-t_3)}{(t_2-t_1)(t_2-t_3)} + \sigma_3 \frac{(t-t_1)(t-t_2)}{(t_3-t_1)(t_3-t_2)} \quad (3.49)$$

Perechile de valori tensiune-timp selectate din curba experimentală sunt prezentate în Tabelul 3.4

	1	2	3
t	42	51	60
σ	0,173	0,17	0,168

Astfel, a rezultat polinomul

$$\sigma(t) = 5,291 \cdot 10^{-6}t^2 - 8,174 \cdot 10^{-4}t + 0,198 \quad (3.50)$$

Suprapunerea polinomului de interpolare cu valorile experimentale alte curbei tensiune-timp este prezentată în Fig. 3.21.

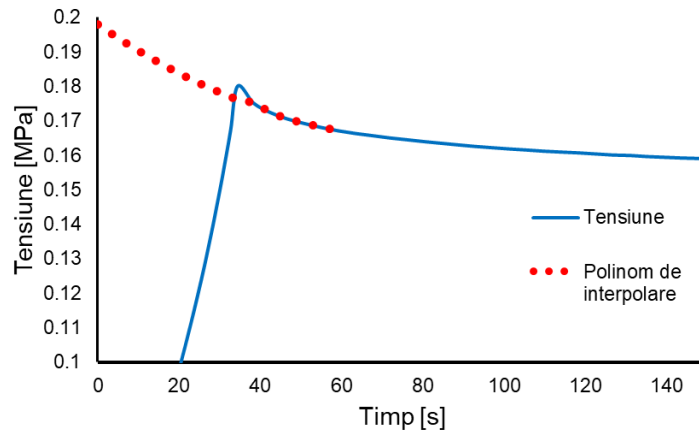


Fig. 3.21. Suprapunerea polinomului de interpolare peste variația tensiunii cu timpul

În definirea datelor de calibrare pentru seria Prony, s-au utilizat valorile determinate de polinomul de interpolare pentru intervalul de timp 0...60 s și valorile experimentale pentru intervalul de timp 60...3600s, cu tensiunea inițială $\sigma(0) = 0,198 \text{ MPa}$.

Seria Prony (Relația (3.42)) a fost calibrată utilizând algoritmul de aproximare în sensul celor mai mici pătrate și a determinat rezultate satisfăcătoare pentru un număr de 3 elemente. Valorile rezultate pentru modulele de relaxare normalizate și timpii de relaxare sunt prezentate în Tabelul 3.5

e_1	τ_1	e_2	τ_2	e_3	τ_3
$7,43 \cdot 10^{-9}$	2,293	0,211	51,793	0,117	1646,72

Comparația dintre valorile determinate de seria Prony și valorile obținute din curba de relaxare este prezentată în Fig. 3.22

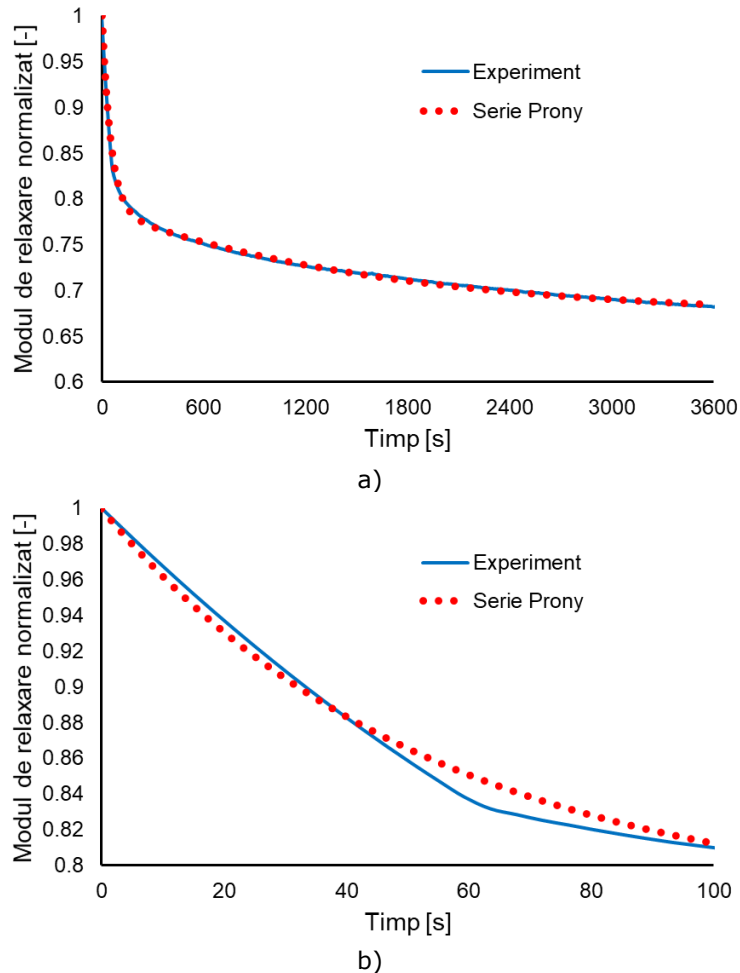


Fig. 3.22. Comparație între variația modului de relaxare normalizat în funcție de timp și seria Prony pentru 3600s (a), respectiv un detaliu pentru 100s (b)

3.2.4. Determinarea caracteristicii instantanee a materialului

Modelele de material, constând în formularea pentru spume flexibile și formularea viscoelastică, au fost validate prin intermediul unor analize numerice pentru solicitări de compresiune. Formularea viscoelastică a determinat valori mai scăzute ale tensiunilor pentru aceleași deformații (Fig. 3.23). În consecință, formularea pentru spume flexibile trebuie modificată pentru a încerca reproducerea comportamentului instantaneu al materialului (caracteristic pentru viteze de deformații foarte mari).

Considerând că formele curbelor tensiune-deformație sunt similare, s-a considerat că, în scopul estimării răspunsului instantaneu, curba tensiune-deformație obținută experimental trebuie augmentată cu un factor $k(\varepsilon)$ corespunzător raportului dintre valorile experimentale $\sigma_{exp}(\varepsilon)$ și valorile numerice obținute utilizând modelul inițial $\sigma_{sim}(\varepsilon)$.

$$k(\varepsilon) = \frac{\sigma_{exp}(\varepsilon)}{\sigma_{sim}(\varepsilon)} \tag{3.51}$$

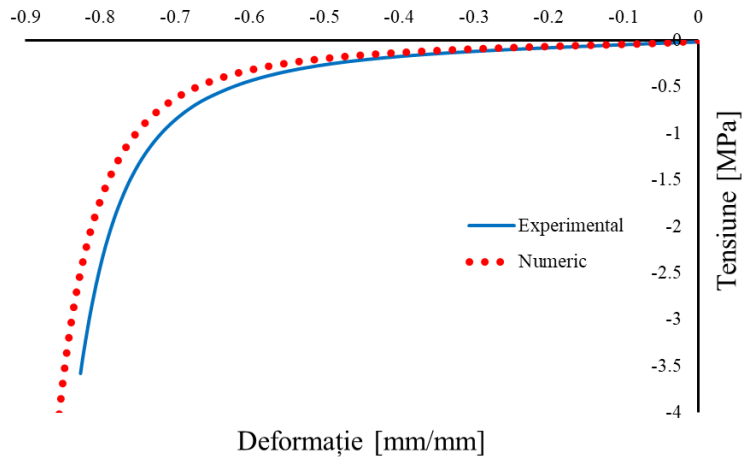


Fig. 3.23. Comparație între variația experimentală a tensiunii cu deformația și rezultatele analizelor numerice utilizând modelul *visco-hiperfoam* inițial

Variația parametrului adimensional k cu deformația ε fost utilizată în calibrarea unei funcții polinomiale de gradul 4, cu un coeficient de nedeterminare $R^2 = 0.9998$ (Fig. 3.24).

$$k(\varepsilon) \cong -2,2495\varepsilon^4 - 4,7687\varepsilon^3 - 4,4461\varepsilon^2 - 1,9672\varepsilon + 0,9933 \tag{3.52}$$

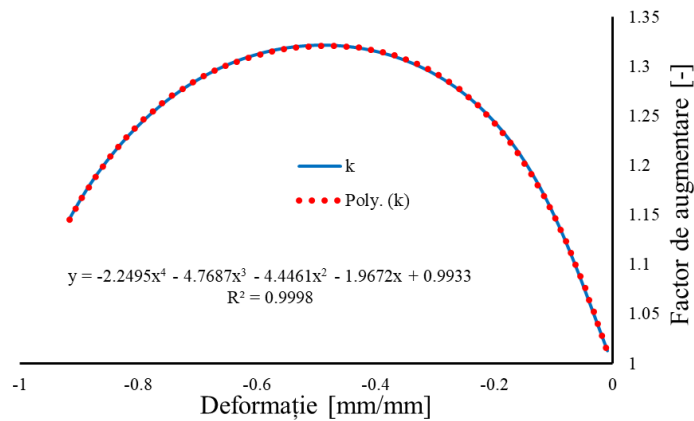


Fig. 3.24. Variația parametrului adimensional k cu deformația și funcția polinomială $k(\varepsilon)$ rezultată

Astfel, valorile tensiunii modificate $\sigma_{mod}(\varepsilon)$ au fost obținute prin înmulțirea valorilor experimentale ale tensiunii $\sigma_{exp}(\varepsilon)$ cu factorul $k(\varepsilon)$

$$\sigma_{mod}(\varepsilon) = k(\varepsilon) \cdot \sigma_{exp}(\varepsilon) \quad (3.53)$$

Comparația dintre datele experimentale inițiale și modelul ajustat cu funcția de augmentare este prezentată în Fig. 3.25.

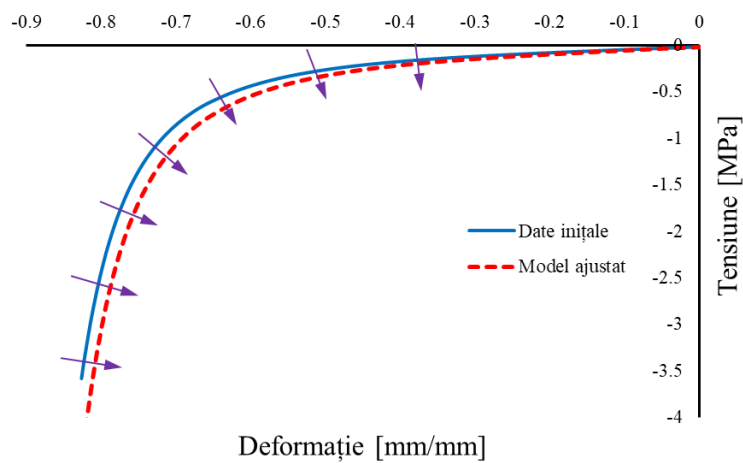


Fig. 3.25. Curbele tensiune-deformație pentru datele experimentale și modelul ajustat

Pentru modelul ajustat, s-a determinat variația energiei specifice de deformație cu deformația, curba rezultată fiind utilizată în calibrarea modelului Ogden de spume flexibile, în mod similar procedurii utilizate în Capitolul 3.2.1 (Fig. 3.26)

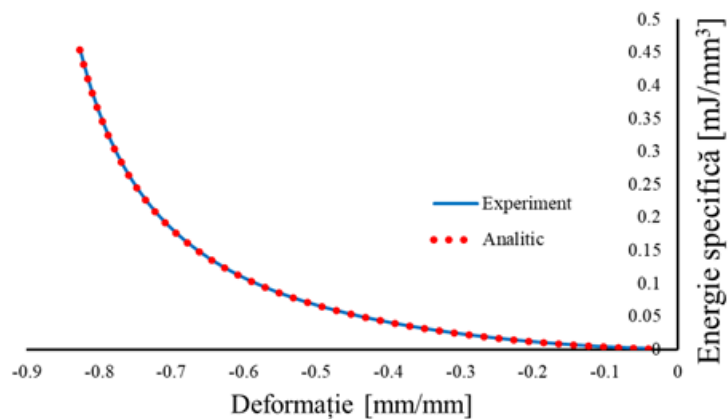


Fig. 3.26. Variația energiei specifice cu deformația pentru modelul ajustat de spumă flexibilă

Constantele de material obținute prin calibrării sunt prezentate în Tabelul 3.6

Tabelul 3.6. Constantele de material pentru modelul ajustat

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	β_1	β_2	β_3
S2	0,372	35,04	$4,05 \cdot 10^{-4}$	$3,26 \cdot 10^{-4}$	0,102	3,829	0,005	0,005	0,005

Constantele de material au fost implementate în modelul numeric descris în Capitolul 3.2.1, rezultatele analizei fiind prezentate în Fig. 3.27.

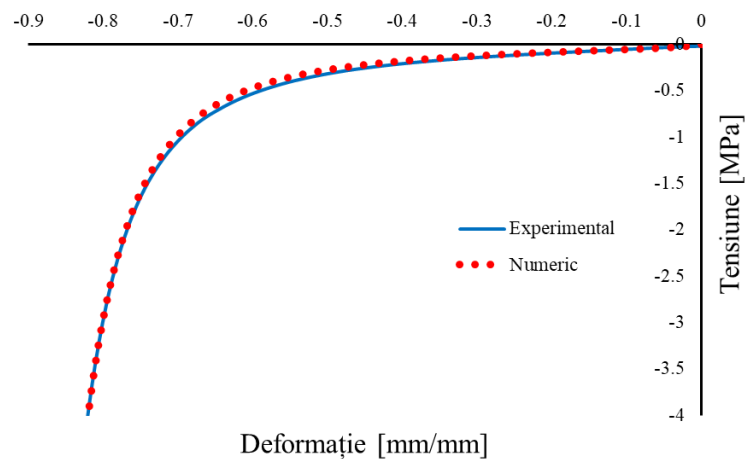


Fig. 3.27. Variația tensiunii cu deformația pentru Agil-U

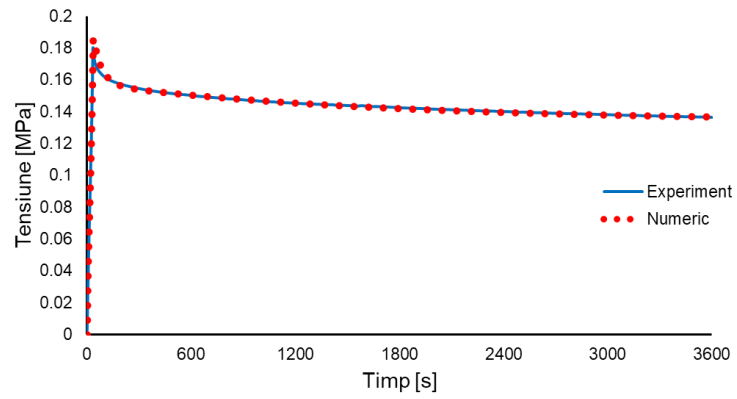
În evaluarea modelului final de material, este necesară determinarea răspunsului la solicitări de lungă durată. În acest scop, s-au efectuat analize prin metoda elementului finit, care să reproducă testele de relaxare.

Modelul numeric utilizat în simulările de relaxare a avut la bază modelul utilizat pentru solicitările de compresiune, cu diferența că deplasarea suprafeței rigide s-a realizat după o amplitudine descrisă tabelar, cu o valoare maximă de 5,2 mm (valori corespunzătoare parametrilor observați în analizele experimentale).

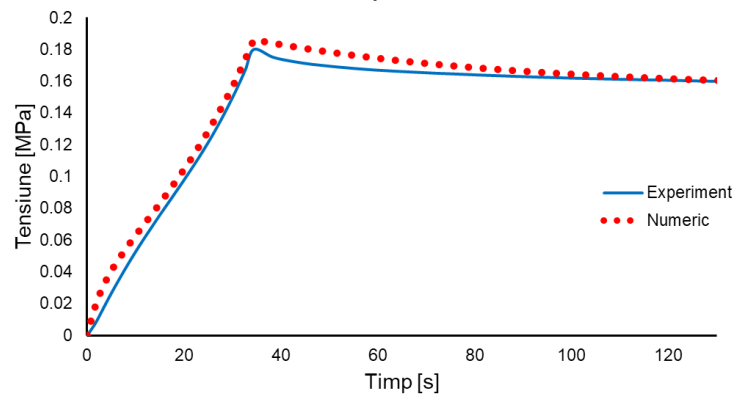
Tabelul 3.7. Amplitudinea deplasării suprafeței rigide pentru simulările de relaxare

Timp [s]	Amplitudine [-]
0	0
34,4	1
3600	1

Rezultatele simulărilor de relaxare sunt prezentate în Fig. 3.28, observându-se o corelație bună între valorile experimentale și cele numerice.



a)



b)

Fig. 3.28. Comparație între variația modului de relaxare normalizat cu timpul și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 100s (b)

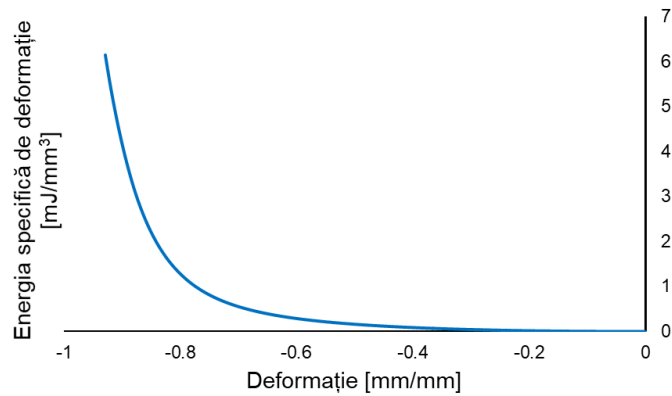
3.3. Calibrarea modelelor pentru elastomerii fabricați prin prototipare rapidă

În mod similar procesului de calibrare pentru spumele flexibile utilizate în fabricarea tălpilor de încălțăminte, calibrarea modelelor de material pentru elastomerii fabricați prin prototipare rapidă are mai multe etape.

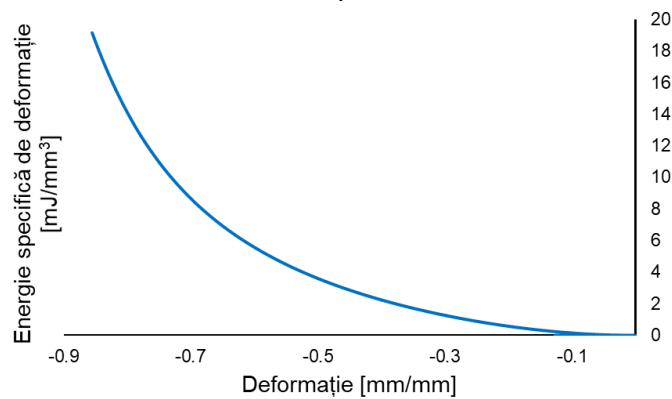
3.3.1. Determinarea preliminară a coeficienților modelului hiperelastic

În mod similar spumelor flexibile, prima etapă constă în evaluarea modelelor hiperelastice și determinarea formulării optime pentru fiecare material. În acest sens, s-a determinat variația energiei specifice cu deformația pentru cele două materiale, utilizând datele experimentale și integrarea numerică după regula trapezului, conform relației (3.44).

Variația energiei specifice cu deformația este prezentată în Fig. 3.29 a) pentru materialul Agil-U și în Fig. 3.29 b) pentru materialul TPU.



a)



b)

Fig. 3.29. Variația energiei specifice cu deformația pentru Agil-U (a) și pentru TPU (b)

Considerând curbele de variație a energiei specifice cu deformația pentru formulările prezentate în Capitolul 3.1.2, în modelarea comportamentului materialului Agil-U s-a utilizat funcția polinomială redusă și funcția Ogden.

Pentru determinarea coeficienților de material au fost utilizate două metode: aproximarea în sensul celor mai mici pătrate [50, 51] și procedura automată de evaluare a constantelor de material implementată în pachetul software Abaqus [39].

În cazul unui material incompresibil, Jacobianul gradientului deformațiilor este egal cu 1

$$J = \det \mathbf{F} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1 \quad (3.54)$$

astfel, funcția polinomială are expresia

$$\psi_{poli} = C_{10}(I_\lambda - 3) + C_{01}(II_\lambda - 3) + C_{20}(I_\lambda - 3)^2 + C_{02}(II_\lambda - 3)^2 + C_{11}(I_\lambda - 3)(II_\lambda - 3) \quad (3.55)$$

În cazul solicitărilor uniaxiale, considerând relația (3.54) și $\lambda_2 = \lambda_3$, invarianții tensorului Cauchy-Green devin

$$I_\lambda = \lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} \quad (3.56)$$

$$II_\lambda = 2\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1^2} \quad (3.57)$$

Astfel, funcția polinomială are expresia

$$\psi_{poli} = C_{10} \left(\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) + C_{01} \left(2\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 3 \right) + C_{20} \left(\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right)^2 + C_{02} \left(2\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 3 \right)^2 + C_{11} \left(\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) \left(2\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 3 \right) \quad (3.58)$$

În consecință, relația analitică a tensiunii uniaxiale este

$$\sigma = \frac{\partial \psi_{poli}}{\partial \lambda_1} = 2 \left[C_{10} + C_{11}(\lambda_1 - 3) + 2C_{20} \left(\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) \right] \left(\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda_1^2} \right) + 2 \left[C_{01} + C_{11} \left(\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right) + 2C_{02} \left(2\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 3 \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\lambda_1^3} \right) \quad (3.59)$$

Pentru funcția Ogden, suma care definește funcția hiperelastică are trei termeni. Considerând condiția de incompresibilitate, se ajunge la forma

$$\psi_{Ogden} = \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\lambda_1^{\alpha_i} + 2\lambda_1^{-\frac{1}{2}\alpha_i} - 3 \right] \quad (3.60)$$

Pentru solicitări uniaxiale, tensiunea are expresia

$$\sigma = \frac{\partial \psi_{Ogden}}{\partial \lambda_1} = \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left[\lambda_1^{\alpha_i-1} - \lambda_1^{-\left(\frac{1}{2}\alpha_i+1\right)} \right] \quad (3.61)$$

3.3.1.1. Agil-U

Pentru materialul Agil-U, rezultatele calibrării funcției polinomiale prin metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate (CMMP) și prin algoritmi implementați în programul Abaqus, alături de suma pătratelor diferențelor dintre valorile experimentale și analitice (SPD), sunt prezentate în Tabelul 3.8.

Tabelul 3.8. Coeficienții funcției polinomiale determinați prin cele două metode

	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	SPD
CMMP	0,512	-0,32	0,108	-0,0035	$1,26 \cdot 10^{-4}$	0,0187
Abaqus	-0,296	0,342	-0,103	$6,37 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-4}$	4,1134

Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și modelele analitice calibrate este prezentată în Fig. 3.30.

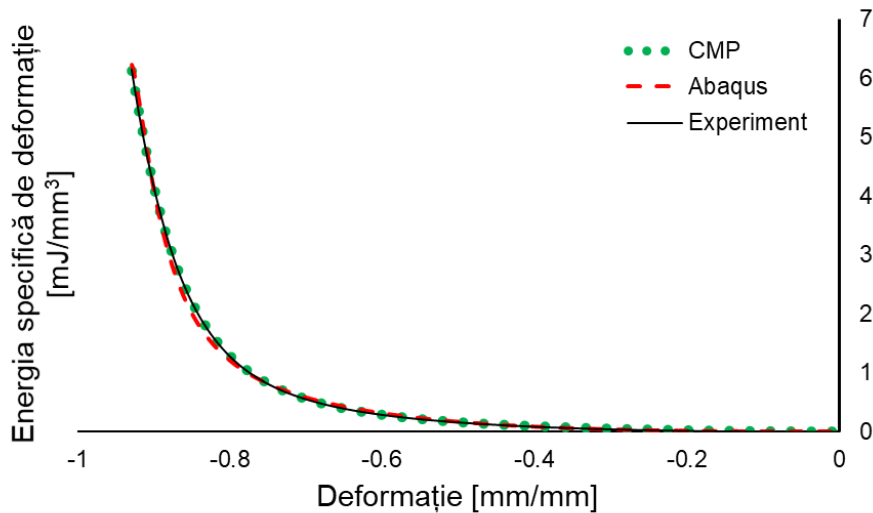


Fig. 3.30. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polimomială calibrată după cele două metode

Pentru funcția Ogden, rezultatele calibrării prin metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate (CMMP) și prin algoritmi implementați în programul Abaqus, alături de suma pătratelor diferențelor dintre valorile experimentale și analitice (SPD) sunt prezentate în Tabelul 3.9.

Tabelul 3.9. Coeficienții funcției Ogden determinați prin cele două metode

	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_1	α_3	SPD
CMMP	-0,739	2,703	-1,911	0,052	-0,299	0,054	2,068
Abaqus	-1,174	0,285	0	3,933	-1,567	1	6,784

Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și modelele analitice calibrate este prezentată în Fig. 3.31.

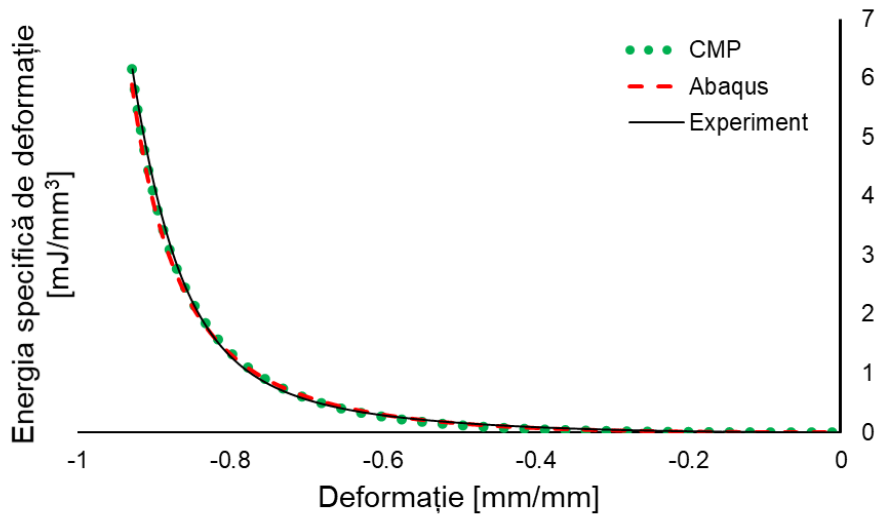


Fig. 3.31. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția Ogden calibrată după cele două metode

Suma pătratelor diferențelor atinge o valoare minimă în cazul funcției polinomiale calibrată prin metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate. Pentru aceste constante de material, comparația dintre variația tensiunii cu deformația specifică determinată experimental și analitic este prezentată în Fig. 3.32.

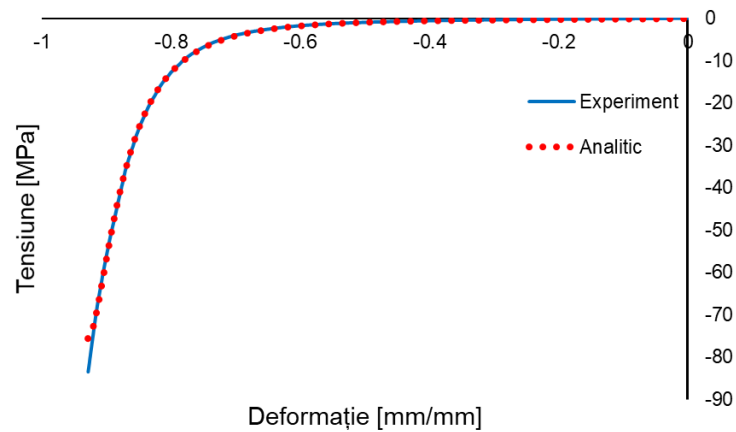


Fig. 3.32. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru Agil-U

3.3.1.2. TPU

Pentru materialul TPU, rezultatele calibrării funcției polinomiale prin metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate (CMMP) și prin algoritmi implementați în programul Abaqus, alături de suma pătratelor diferențelor dintre valorile experimentale și analitice (SPD) sunt prezentate în Tabelul 3.10.

Tabelul 3.10. Coeficienții funcției polinomiale determinați prin cele două metode

	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	SPD
CMMP	12,491	-7,522	2,013	-0,044	$3,59 \cdot 10^{-3}$	0,17
Abaqus	12,972	-7,925	2,169	-0,064	$5,82 \cdot 10^{-3}$	0,117

Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și modelele analitice calibrate, este prezentată în Fig. 3.33.

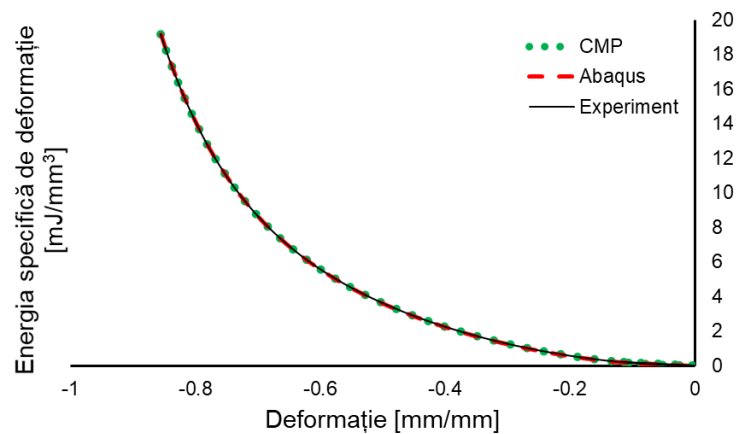


Fig. 3.33. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială calibrată după cele două metode

Pentru funcția Ogden, rezultatele calibrării prin metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate (CMMP) și prin algoritmi implementați în programul Abaqus, alături de suma pătratelor diferențelor dintre valorile experimentale și analitice (SPD), sunt prezentate în Tabelul 3.11.

Tabelul 3.11. Coeficienții funcției Ogden determinați prin cele două metode

	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_1	α_3	SPD
CMMP	-0,739	2,703	-1,911	0,052	-0,299	0,054	2,068
Abaqus	-1,174	0,285	0	3,933	-1,567	1	6,784

Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și modelele analitice calibrate este prezentată în Fig. 3.34.

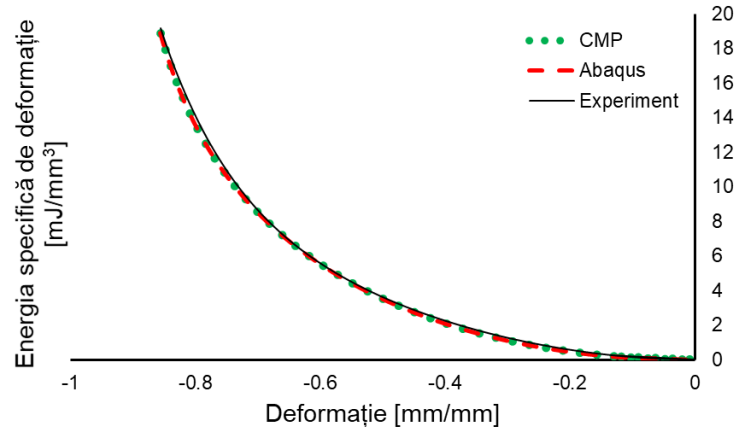


Fig. 3.34. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția Ogden calibrată după cele două metode

Suma pătratelor diferențelor are o valoare minimă în cazul funcției polinomiale calibrată de către aplicația Abaqus. Pentru aceste constante de material, comparația dintre variația tensiunii cu deformația specifică determinată experimental și analitic este prezentată în Fig. 3.35.

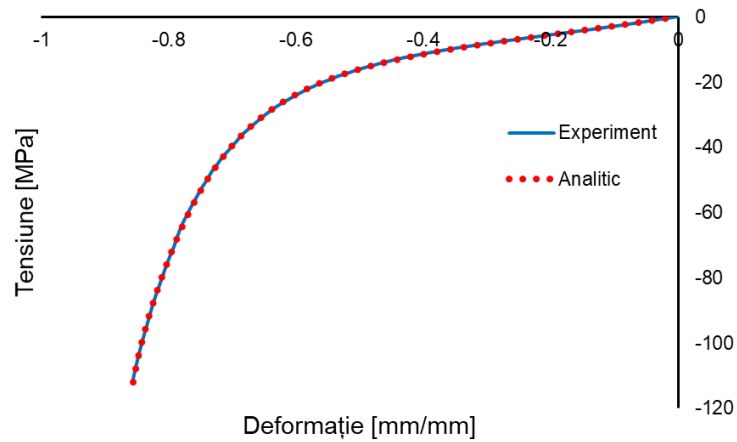


Fig. 3.35. Variația experimentală și analitică a tensiunii cu deformația pentru TPU

3.3.2. Calibrarea modelului Ogden-Roxburgh

În mod similar materialului prelevat din tălpile încălțămintei de alergare, calibrarea modelului Ogden-Roxburgh s-a realizat utilizând curbele tensiune-deformație din ultimele cicluri ale fiecărui bloc de solicitare, parametrii modelului matematic fiind determinați utilizând metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate. În cazul materialelor fabricate prin prototipare rapidă, pentru calibrare s-au utilizat datele experimentale obținute pentru trei niveluri de încărcare. Modelul matematic a fost calibrat astfel încât forma curbei tensiune-deformație de la descărcare să determine o eroare minimă față de datele experimentale pentru fiecare set de teste.

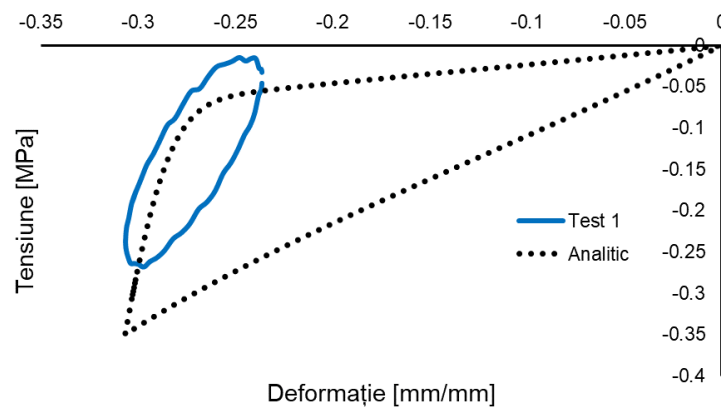
3.3.2.1. Agil-U

Pentru materialul Agil-U parametrii rezultați în urma calibrării sunt prezentați în Tabelul 3.12.

Tabelul 3.12. Constantele de material obținute în urma calibrării modelului Ogden-Roxburgh

r	b	m
1,2721	0,1831	0,0001

Variația modelului analitic, comparată cu valorile experimentale este prezentată în Fig. 3.36



a)

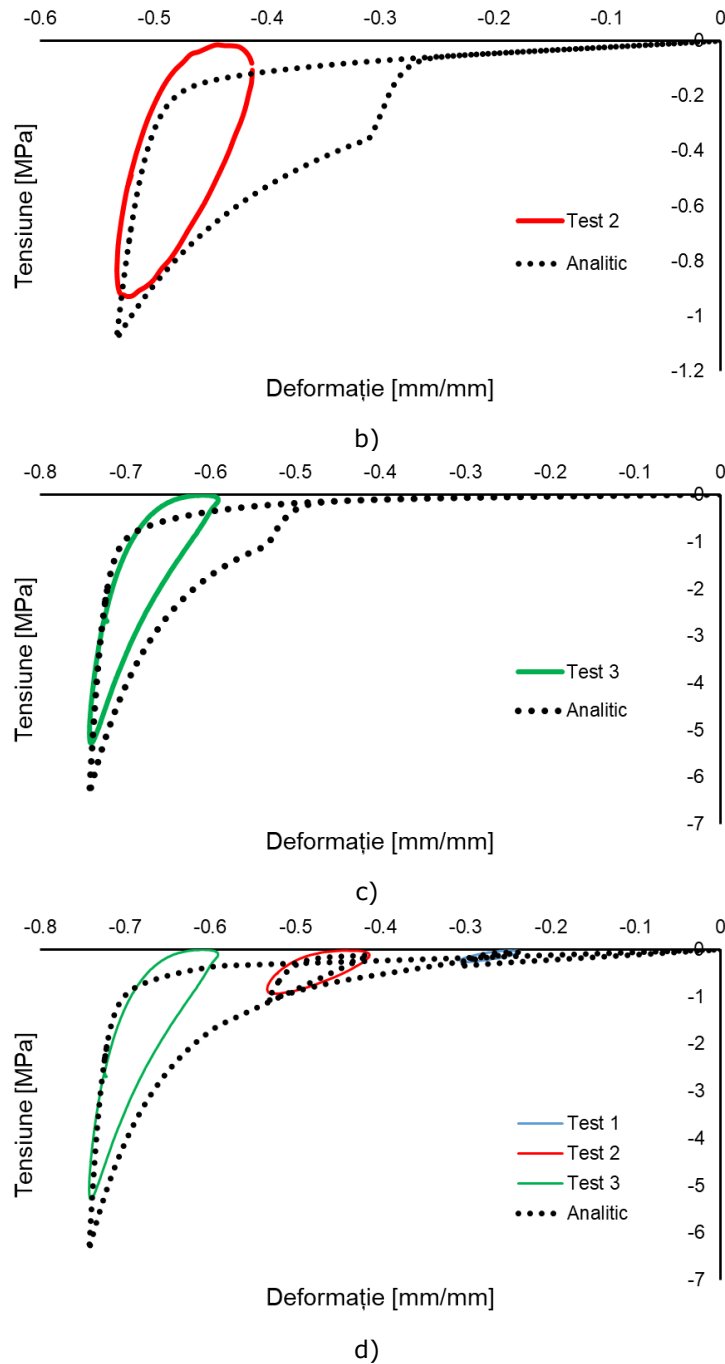


Fig. 3.36. Rezultatele calibrării modelului Ogden-Roxburgh pentru Agil-U: prima amplitudine a solicitării (a), a doua amplitudine a solicitării (b), a treia amplitudine a solicitării (c) respectiv comparația pentru cele trei amplitudini (d)

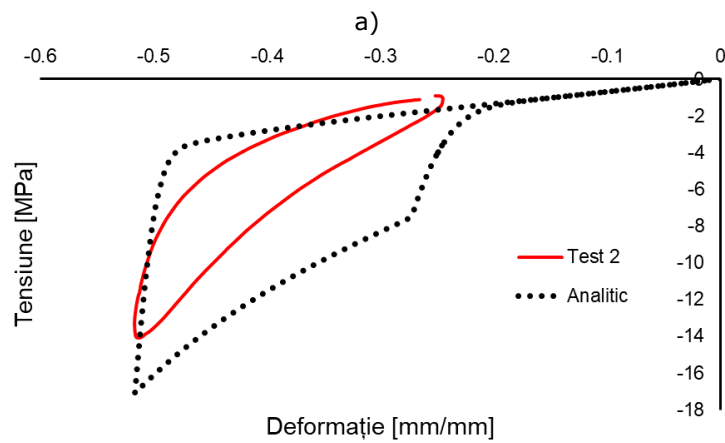
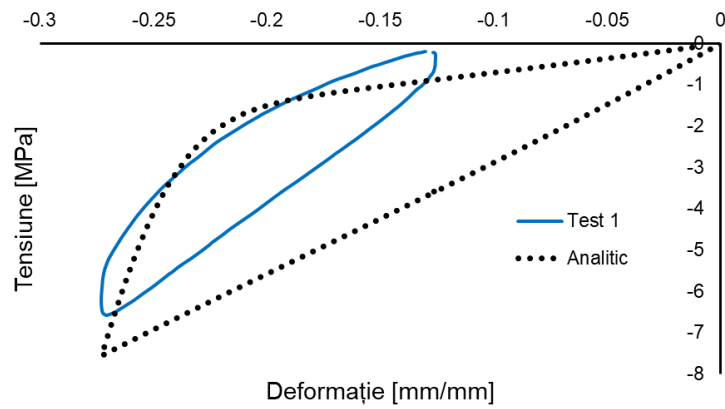
3.3.2.2. TPU

Pentru materialul TPU parametri rezultați în urma calibrării sunt prezentați în Tabelul 3.13.

Tabelul 3.13. Constantele de material obținute în urma calibrării modelului Ogden-Roxburgh

r	b	m
1,323	0,0193	0,2967

Variația modelului analitic, comparată cu valorile experimentale, este prezentată în Fig. 3.37



b)

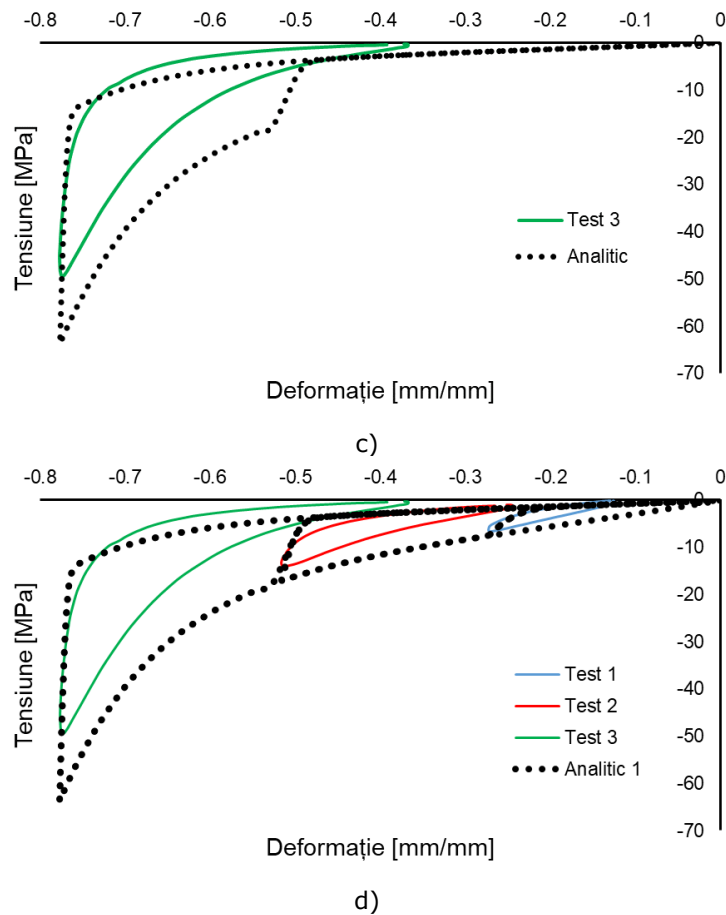


Fig. 3.37. Rezultatele calibrării modelului Ogden-Roxburgh pentru TPU: prima amplitudine a solicitării (a), a doua amplitudine a solicitării (b), a treia amplitudine a solicitării (c) respectiv comparația pentru cele trei amplitudini (d)

3.3.3. Determinarea curbilor de relaxare

În determinarea parametrilor seriilor Prony utilizate în modelarea fenomenului de relaxare pentru elastomerii fabricați prin prototipare rapidă, s-a utilizat aceeași procedură utilizată în cazul spumelor prelevate din tălpile încălțămintei sportive. Pentru a elimina efectele relaxării din timpul încărcării materialelor la tensiunea de menținere, s-au utilizat polinoame de interpolare de ordinul doi, valoarea maximă aproximată fiind utilizată în calcularea valorilor tensiunilor normalizate, utilizate în calibrarea modelului Prony.

3.3.3.1. Agil-U

În cazul materialului Agil-U, tensiunea de menținere s-a atins după 16,95s. Din curba tensiune-timp, pentru generarea polinomului de interpolare, s-au selectat valorile prezentate în Tabelul 3.14.

Tabelul 3.14. Perechile de valori experimentale tensiune-timp

	1	2	3
t	17,53	29,7	37,95
σ	0,247	0,198	0,189

Astfel, polinomul rezultat este

$$\sigma(t) = 1,475 \cdot 10^{-5}t^2 - 1,103 \cdot 10^{-3}t + 0,396 \quad (3.62)$$

Suprapunerea polinomului de interpolare cu valorile experimentale ale curbei tensiune-timp este prezentată în Fig. 3.38.

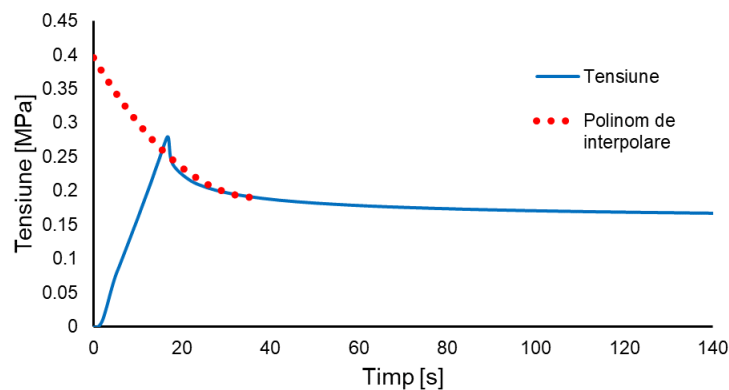


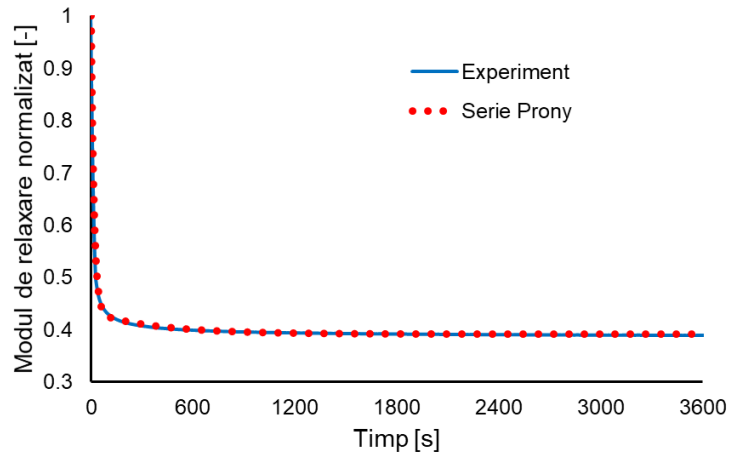
Fig. 3.38. Suprapunerea polinomului de interpolare peste variația tensiunii cu timpul pentru materialul Agil-U

Seria Prony (Relația (3.42)) a fost calibrată utilizând algoritmul de aproximare în sensul celor mai mici pătrate, rezultând un număr de 3 termeni, ale căror parametri sunt prezentați în Tabelul 3.15.

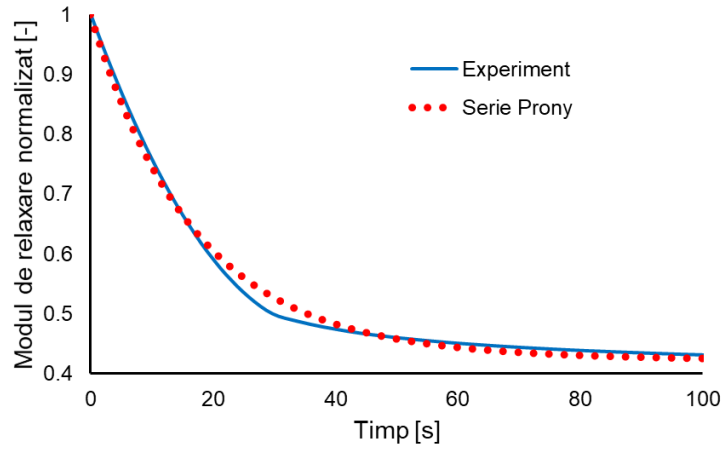
Tabelul 3.15. Constantele de material rezultate la calibrarea seriei Prony

e_1	τ_1	e_2	τ_2	e_3	τ_3
$2,54 \cdot 10^{-5}$	3,003	0,567	16,975	0,0414	389,91

Comparația dintre valorile determinate de seria Prony și valorile obținute din curba de relaxare sunt prezentate în Fig. 3.39.



a)



b)

Fig. 3.39. Comparație între variația cu timpul a modului de relaxare normalizat și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 100s (b) pentru materialul Agil-U

3.3.3.2. TPU

Pentru materialul TPU, tensiunea de menținere s-a atins după 21,38s. Polinomului de interpolare a fost generat utilizând valorile prezentate în Tabelul 3.16

Tabelul 3.16. Perechile de valori experimentale tensiune-timp

	1	2	3
t	19,12	25,77	37,67
σ	6,179	5,845	5,512

Astfel, a rezultat polinomul de gradul al doilea

$$\sigma(t) = 1,195 \cdot 10^{-5}t^2 - 1,038 \cdot 10^{-1}t + 7,728 \quad (3.63)$$

Suprapunerea polinomului de interpolare cu valorile experimentale ale curbei tensiune-timp este prezentată în Fig. 3.40.

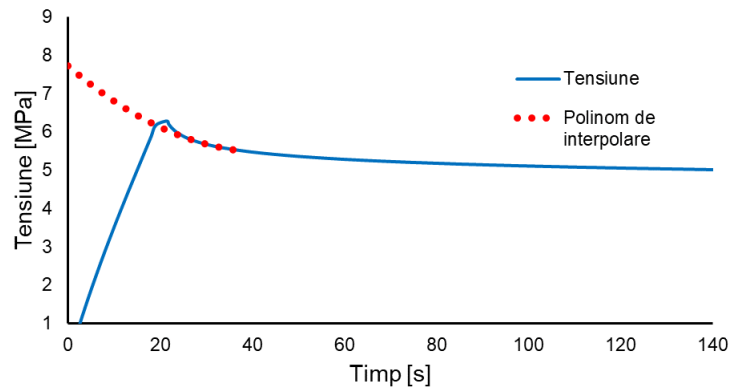


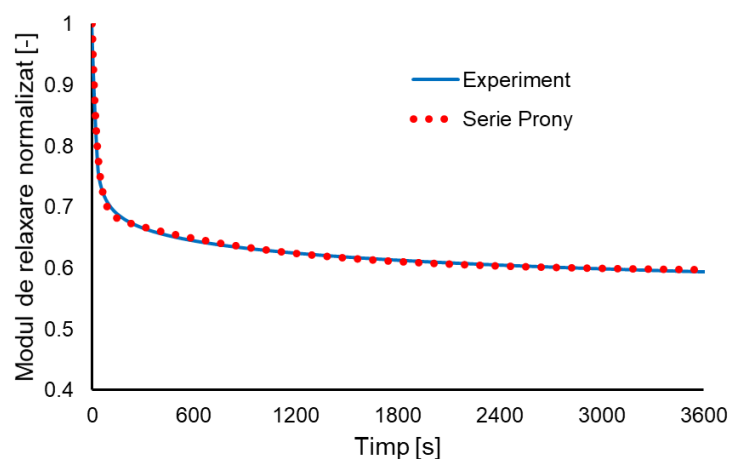
Fig. 3.40. Suprapunerea polinomului de interpolare peste variația tensiunii cu timpul pentru materialul TPU

În mod similar celorlaltor materiale, seria Prony a fost calibrată pentru trei termeni, valorile rezultate pentru modulele de relaxare normalizate și timpii de relaxare fiind prezentate în Tabelul 3.17.

Tabelul 3.17. Constantele de material rezultate în urma calibrării seriei Prony

e_1	τ_1	e_2	τ_2	e_3	τ_3
$2,54 \cdot 10^{-5}$	3,009	0,306	29,701	0,0983	991,085

Comparația dintre valorile determinate de seria Prony și valorile obținute din curba de relaxare sunt prezentate în Fig. 3.41.



a)

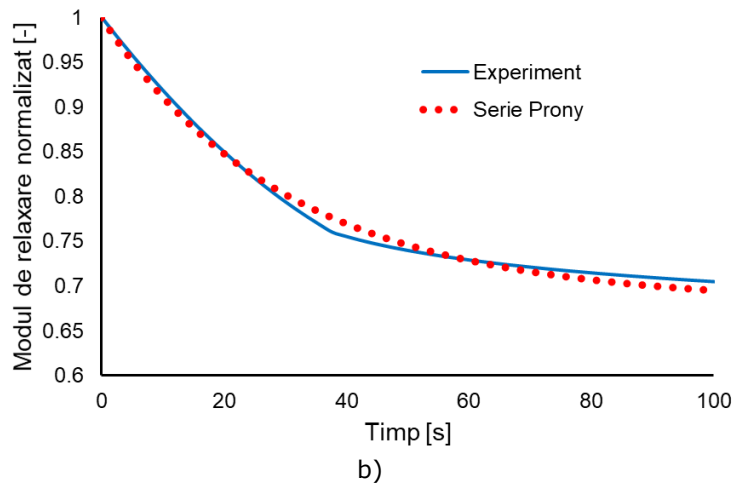


Fig. 3.41. Comparație între variația cu timpul a modului de relaxare normalizat și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 100s (b) pentru materialul TPU

3.3.4. Determinarea caracteristicilor instantanee a materialulelor

Formulările visco-hiperelastice ale materialelor Agil-U și TPU, obținute prin alăturarea modelelor Prony funcțiilor hiperelastice polinomiale au determinat un valori mai reduse ale tensiunilor pentru aceleași deformații, în comparație cu datele experimentale. În mod similar spumelor elastomerice, a fost nevoie de o ajustare a parametrilor funcțiilor hiperelastice, astfel încât acestea să reproducă comportamentul instantaneu al materialelor.

3.3.4.1. Agil-U

În cazul materialului Agil-U, comparația între rezultatul analizelor numerice pentru formularea visco-hiperelastice și datele experimentale pentru încercarea la compresiune pentru o viteză de încărcare de 10 mm/min sunt prezentate în Fig. 3.42.

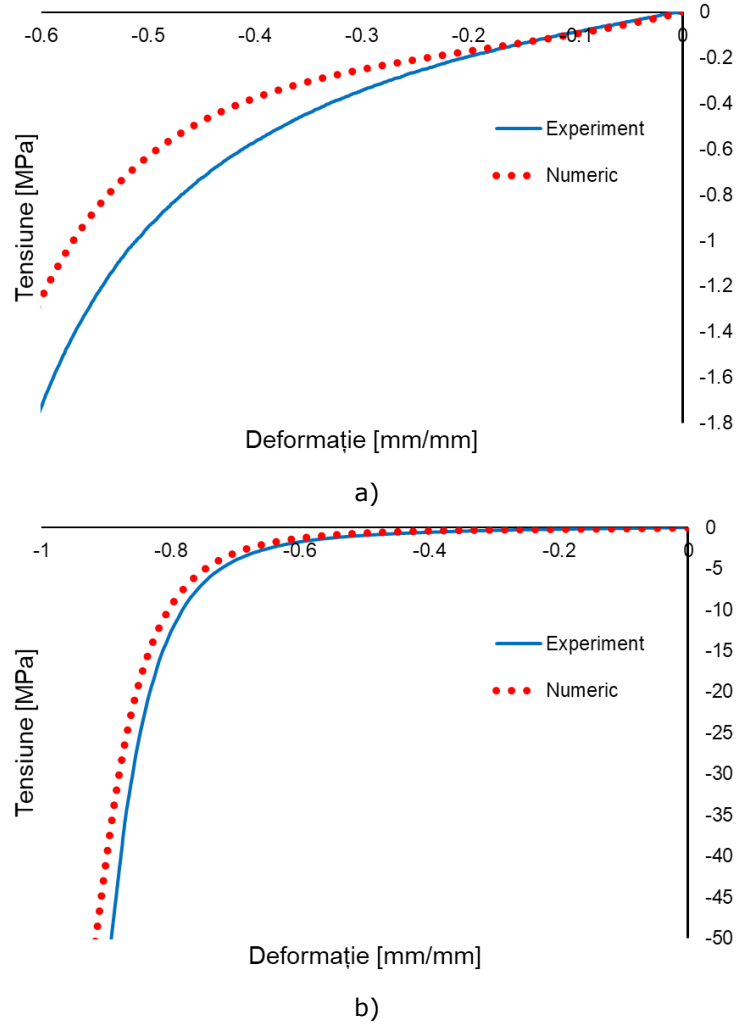


Fig. 3.42. Comparație între variația experimentală a tensiunii cu deformația și rezultatele analizelor numerice utilizând modelul visco-hiperelatic inițial pentru Agil-U: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a), respectiv curbele complete (b)

Pentru acest caz, variația parametrului k cu deformația ε (relația (3.51)) este prezentată în Fig. 3.43. Aproximarea variației a fost realizată prin funcția polinomială

$$k(\varepsilon) \cong 4,7928\varepsilon^4 + 7,49\varepsilon^3 + 1,9974\varepsilon^2 - 1,0356\varepsilon + 1,0061 \quad (3.64)$$

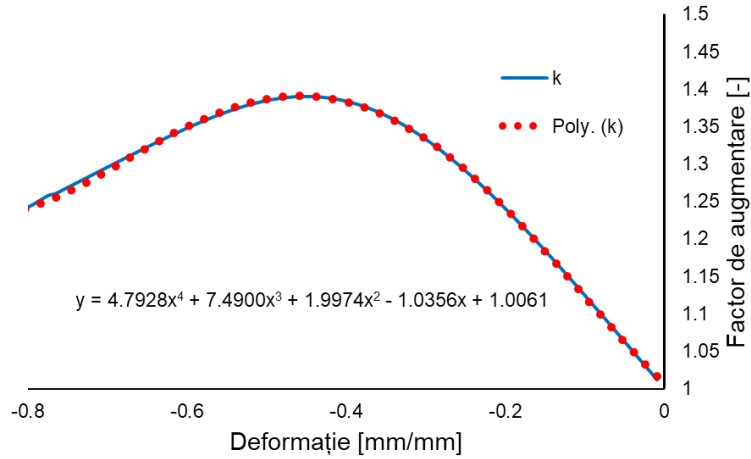


Fig. 3.43. Variația parametrului adimensional k cu deformația și funcția polinomială $k(\varepsilon)$ rezultată

Astfel, comparația dintre curba tensiune-deformație modificată σ_{mod} , $\sigma_{mod}(\varepsilon) = k(\varepsilon) \cdot \sigma_{exp}(\varepsilon)$, și curba inițială este prezentată în

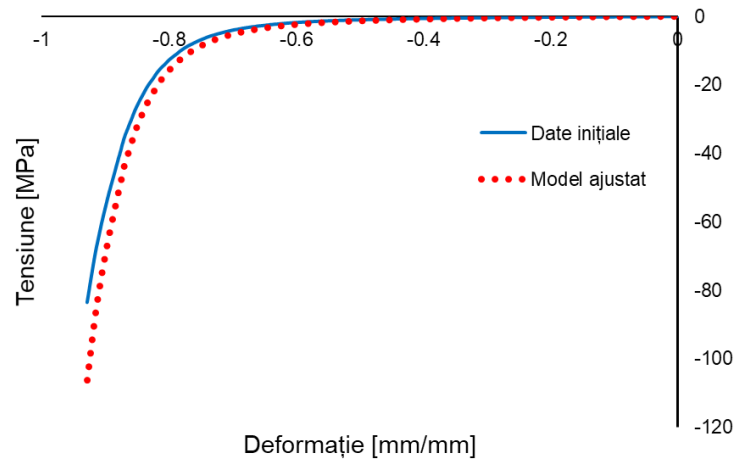


Fig. 3.44. Curbele tensiune-deformație pentru datele experimentale și modelul ajustat

Valorile tensiune-deformație din modelul ajustat au fost utilizate în determinarea prin integrare numerică a variației energiei specifice cu deformația. Aceste rezultate au fost utilizate în calibrarea modelului hiperelastic polinomial de ordinul doi, utilizând metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate precum și procedura automatizată din software-ul Abaqus. Rezultatele calibrării parametrilor, alături de suma pătratelor diferențelor, sunt prezentate în Tabelul 3.18 respectiv Fig. 3.45.

Tabelul 3.18. Coeficienții funcției polinomiale determinați prin cele două metode

	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	SPD
CMP	0,485	-0,265	0,094	-0,0032	$9,61 \cdot 10^{-5}$	0,0355
Abaqus	-0,513	0,554	-0,167	$8,89 \cdot 10^{-3}$	$-6,64 \cdot 10^{-4}$	5,6905

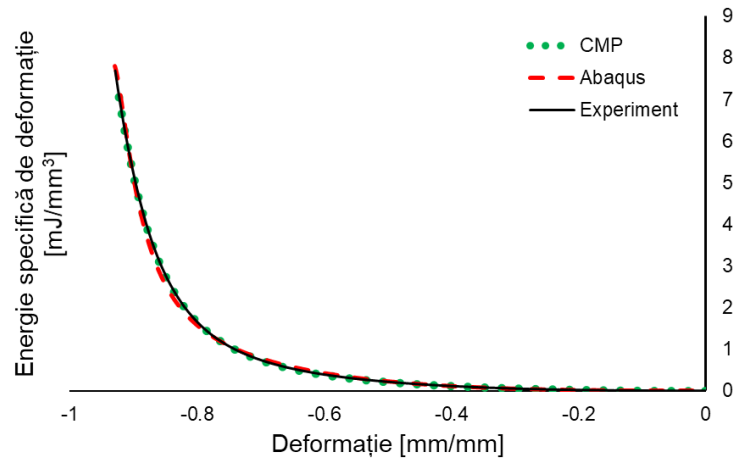
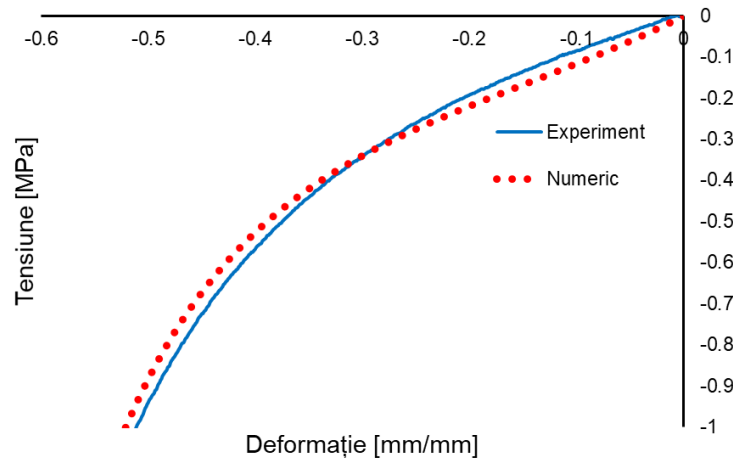
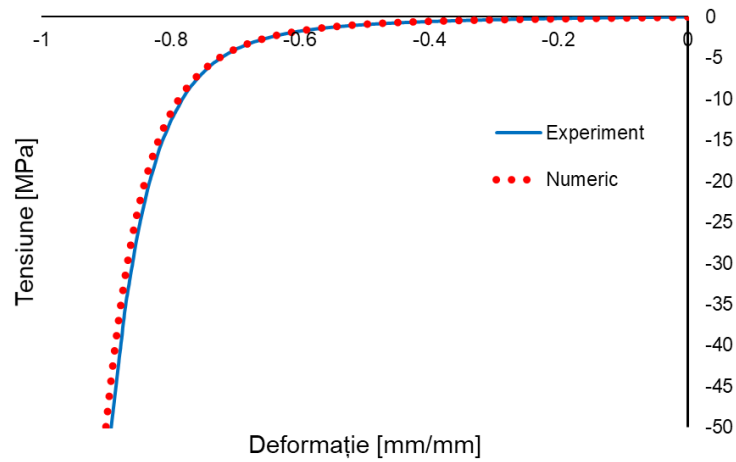


Fig. 3.45. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială calibrată prin cele două metode

Pentru funcția polinomială cu parametri calibrați utilizând metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate, variația tensiunii cu deformația, comparată cu valorile experimentale, este prezentată în Fig. 3.46.



a)



b)

Fig. 3.46. Variația tensiunii cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a), respectiv curbele complete (b)

Similar modelului calibrat pentru spumele elastomerice, evaluarea modelului final s-a realizat prin reproducerea testului de relaxare. Deplasarea suprafeței rigide din modelul numeric a urmat o traiectorie descrisă de o amplitudine exprimată tabelar, cu o valoare maximă de 2,77 mm, corespunzătoare unei deformații de 0,22 mm/mm (Tabelul 3.19).

Tabelul 3.19. Amplitudinea deplasării suprafeței rigide pentru simulările de relaxare

Timp [s]	Amplitudine [-]
0	0
16,95	1
3600	1

Rezultatele simulărilor de relaxare sunt prezentate în Fig. 3.47, observându-se o corelație bună între valorile experimentale și cele numerice.

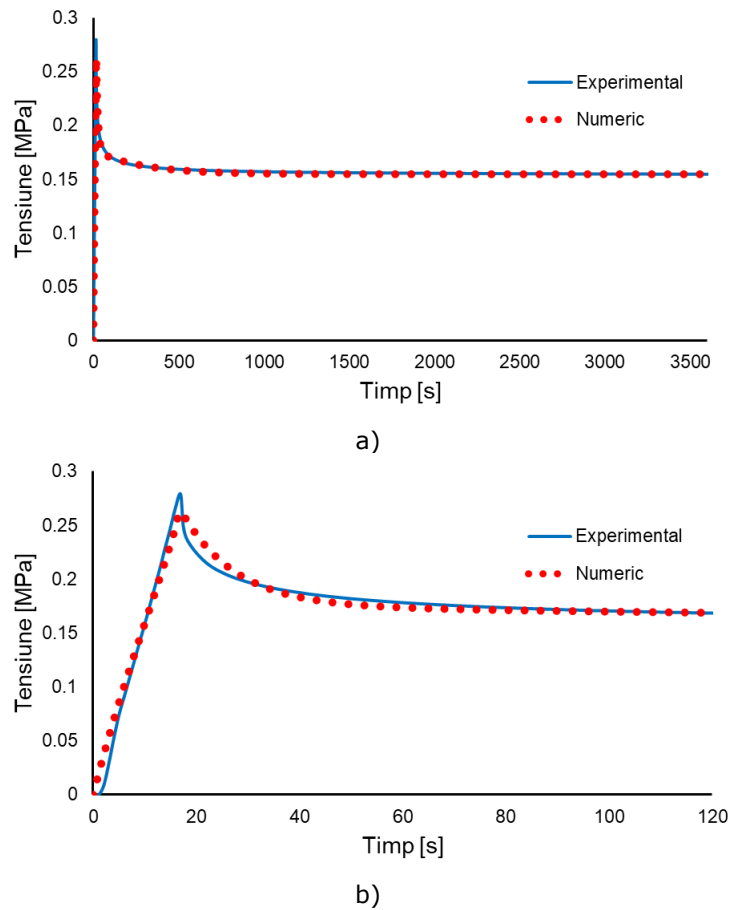


Fig. 3.47. Comparație între variația cu timpul a modului de relaxare normalizat și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 120s (b)

3.3.4.2. TPU

În cazul materialului TPU, comparația între rezultatul analizelor numerice pentru formularea visco-hiperelasică și datele experimentale pentru încercările la compresiune cu viteza de încărcare de 10 mm/min este prezentată în Fig. 3.48.

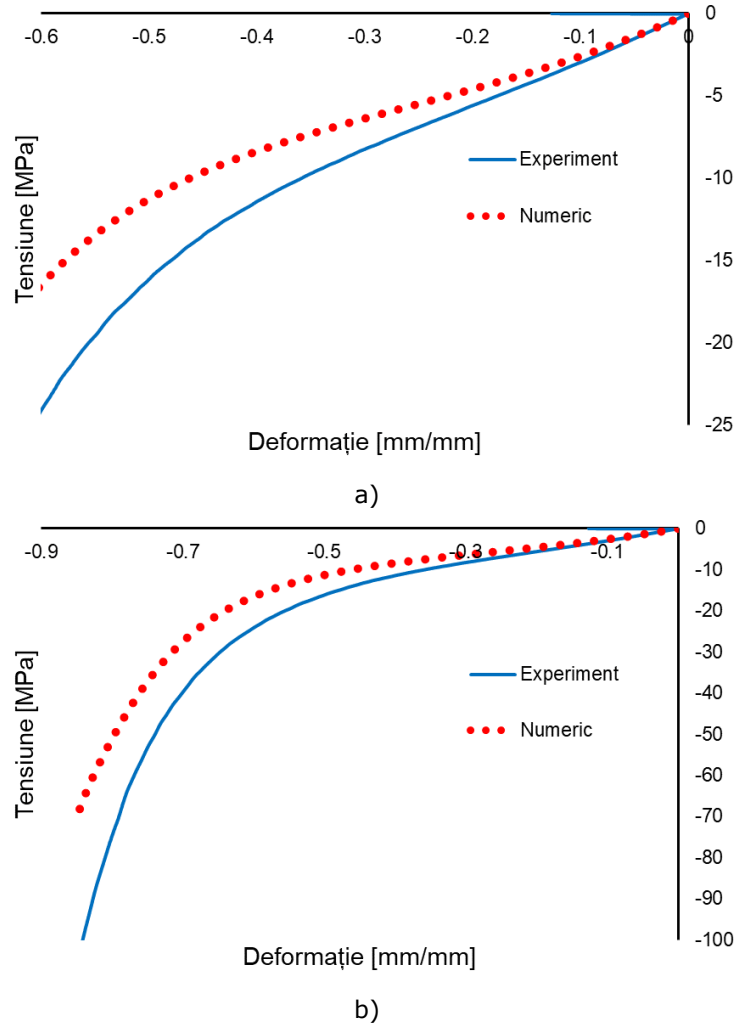


Fig. 3.48. Comparație între variația experimentală a tensiunii cu deformația și rezultatele analizelor numerice utilizând modelul visco-hiperelastic inițial pentru TPU: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0,6 mm/mm (a) respectiv curbele complete (b)

Pentru acest caz, variația parametrului k cu deformația ε , relația (3.51), este prezentată în Fig. 3.49, aproximarea variației fiind realizată prin funcția polinomială (3.65).

$$k(\varepsilon) \cong 4,7896\varepsilon^4 + 7,6049\varepsilon^3 + 2,8602\varepsilon^2 - 0,6824\varepsilon + 1,0218 \quad (3.65)$$

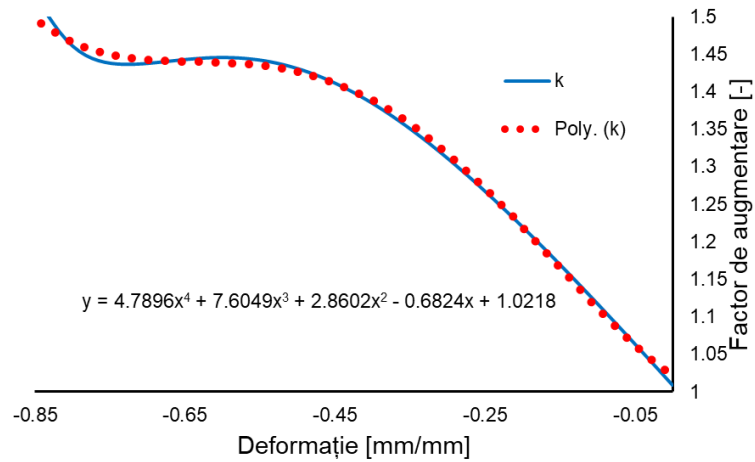


Fig. 3.49. Variația parametrului adimensional k cu deformația și funcția polinomială $k(\varepsilon)$ rezultată

Astfel, comparația dintre curba tensiune-deformație modificată σ_{mod} , $\sigma_{mod}(\varepsilon) = k(\varepsilon) \cdot \sigma_{exp}(\varepsilon)$, și curba inițială este prezentată în Fig. 3.50

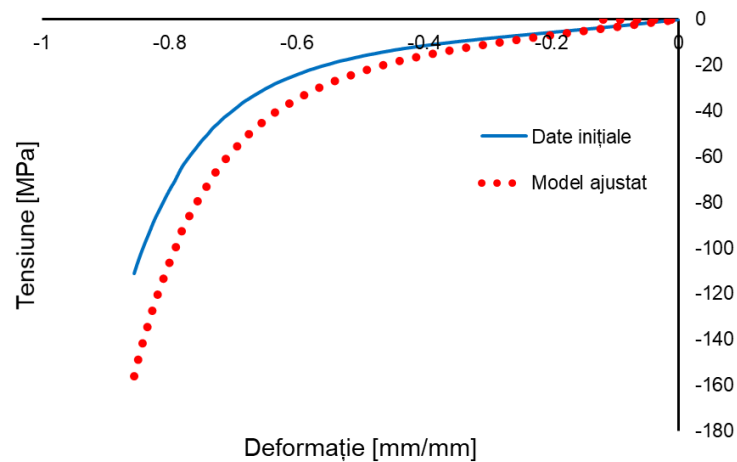


Fig. 3.50. Curbele tensiune-deformație pentru datele experimentale și modelul ajustat

Valorile tensiune-deformație din modelul ajustat au fost utilizate în determinarea prin integrare numerică a variației energiei specifice cu deformația. Rezultate care au fost utilizate în calibrarea modelului hiperelastice polinomial de ordinul doi, utilizând metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate precum și procedura automatizată din software-ul Abaqus. Rezultatele calibrării parametrilor alături de suma pătratelor diferențelor, sunt prezentate în Tabelul 3.20 respectiv Fig. 3.50.

Tabelul 3.20. Coeficienții funcției polinomiale determinați prin cele două metode

	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	SPD
CMP	11,769	-6,195	1,617	-0,0403	$4,01 \cdot 10^{-3}$	0,121
Abaqus	10,127	-4,837	1,117	0,0162	$-2,01 \cdot 10^{-3}$	0,285

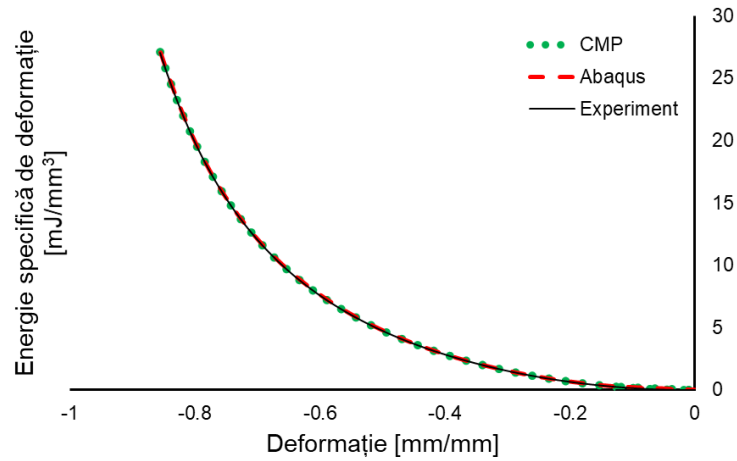
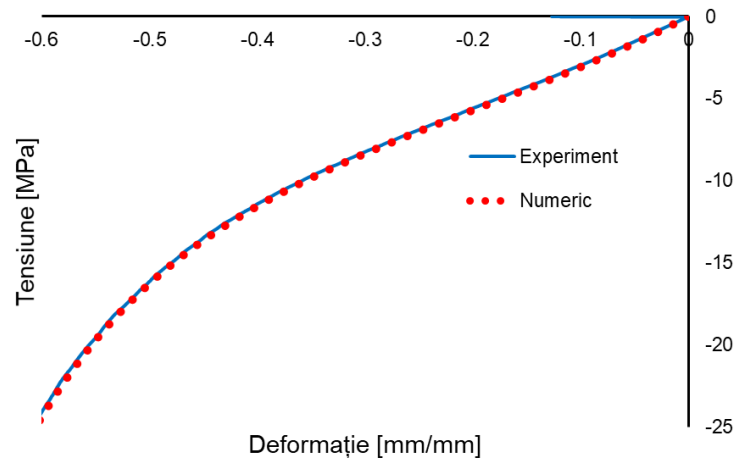
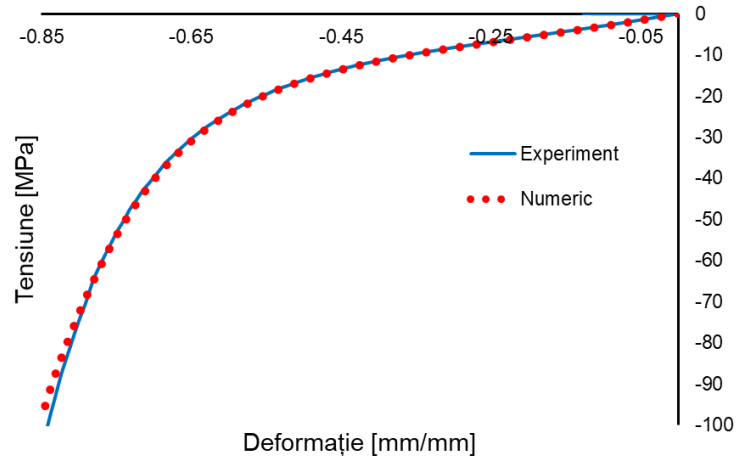


Fig. 3.51. Variația energiei specifice cu deformația pentru datele experimentale și funcția polinomială calibrată după cele două metode
 Pentru funcția polinomială cu parametri calibrați utilizând metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate, variația tensiunii cu deformația, comparată cu valorile experimentale, este prezentată în Fig. 3.51.



a)



b)

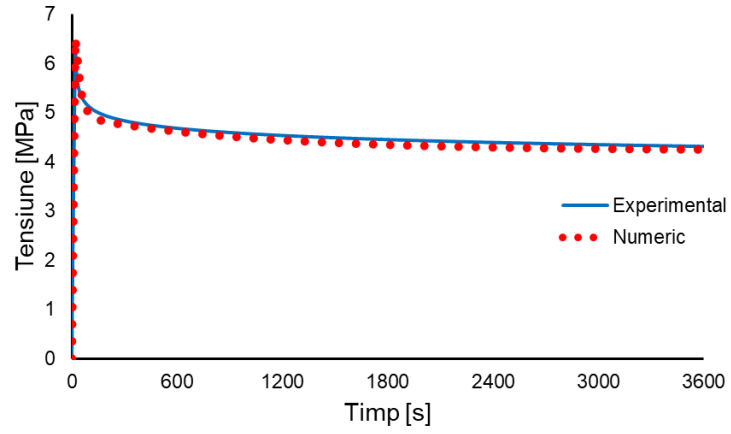
Fig. 3.52. Variația tensiunii cu deformația pentru datele experimentale și funcția polimomială: detaliu pentru variația tensiunii până la o deformație nominală de 0.6 mm/mm (a) respectiv curbele complete (b)

Similar cazurilor anterioare, evaluarea modelului final s-a realizat prin reproducerea testului de relaxare. Deplasarea suprafeței rigide din modelul numeric a urmat o amplitudine descrisă tabelar, cu o valoare maximă de 3,91 mm, corespunzătoare unei deformații de 0,31 mm/mm (Tabelul 3.21).

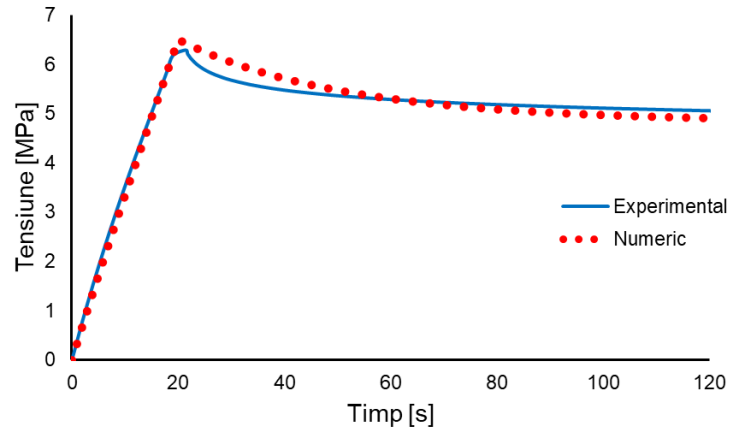
Tabelul 3.21. Amplitudinea deplasării suprafeței rigide pentru simulările de relaxare

Timp [s]	Amplitudine
0	0
21,38	1
3600	1

Rezultatele simulărilor de relaxare sunt prezentate în Fig. 3.53, observându-se o corelație bună între valorile experimentale și cele numerice.



a)



b)

Fig. 3.53. Comparație între variația modului de relaxare normalizat cu timpul și seria Prony pentru 3600s (a) respectiv un detaliu pentru 120s (b)

4. SELECȚIA DE STRUCTURI DE METAMATERIALE DESTINATE APLICAȚIILOR DIN DOMENIUL SPORTULUI

4.1. Generalități privind materialele celulare

Materialele celulare generate tehnologic (clasă din care fac parte și spumele flexibile) prezintă o variație a densității pentru același material solid de bază în funcție de parametrii procesului de fabricație. În mod evident, o spumă cu o densitate mai mare va avea caracteristici mecanice mai bune decât o spumă cu o densitate mai mică, fabricată din același material de bază. În compararea proprietăților mecanice ale materialelor celulare cu diferite densități, de regulă, se utilizează valori normalizate ale proprietăților materialelor, precum densitatea relativă ρ_{rel} , rigiditatea relativă E_{rel} , respectiv rezistența mecanică relativă σ_{rel}^{max} , care se exprimă prin raportarea proprietății materialului celular la proprietatea corespunzătoare a materialului de bază, relațiile (4.1)-(4.3).

$$\rho_{rel} = \frac{\tilde{\rho}}{\rho_{MB}} \quad (4.1)$$

$$E_{rel} = \frac{\tilde{E}}{E_{MB}} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{rel}^{max} = \frac{\tilde{\sigma}^{max}}{\sigma_{MB}^{max}} \quad (4.3)$$

unde $\tilde{\rho}$, \tilde{E} , $\tilde{\sigma}^{max}$ reprezintă densitatea, rigiditatea, respectiv rezistența mecanică a spumei, iar ρ_{MB} , E_{MB} și σ_{MB}^{max} reprezintă densitatea, rigiditatea respectiv rezistența mecanică a materialului de bază.

Ținând cont de tipul structurii celulelor, se pot observa două tipuri de comportament ideal în timpul solicitărilor: deformație dominantă de alungire și deformație dominantă de încovoiere [52]. Structurile celulare care prezintă un comportament determinat de alungire prezintă proprietăți superioare, existând o echivalență între densitatea relativă ρ_{rel} și rigiditatea relativă E_{rel} , respectiv rezistența mecanică relativă σ_{rel}^{max} .

$$E_{rel} \sim \rho_{rel} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{rel}^{max} \sim \rho_{rel} \quad (4.5)$$

În cazul structurilor celulare care prezintă un comportament dominat de încovoiere, proprietățile mecanice sunt mai reduse în comparație cu primul caz, relațiile dintre rigiditatea relativă E_{rel} respectiv rezistența mecanică relativă σ_{rel}^{max} și densitatea relativă ρ_{rel} fiind [12]:

$$E_{rel} \sim \rho_{rel}^2 \quad (4.6)$$

$$\sigma_{rel}^{max} \sim \rho_{rel}^{\frac{3}{2}} \quad (4.7)$$

Aceste variații teoretice au fost în mare parte confirmate de încercări experimentale efectuate pe diverse clase de materiale (Fig. 4.1). Materialele celulare tehnologice prezintă un comportament la solicitări dominat de încovoiere, variația rigidității relative cu densitatea relativă fiind apropiată de curba ideală. În cazul rezistenței relative, valorile experimentale sunt mai scăzute prin comparație cu

comportamentul ideal la încovoiere, datorită structurii neregulate a celulelor, care prezintă pereți de grosimi variabile, existând astfel o cedare mai rapidă a zonelor de dimensiuni reduse (Fig. 1.2).

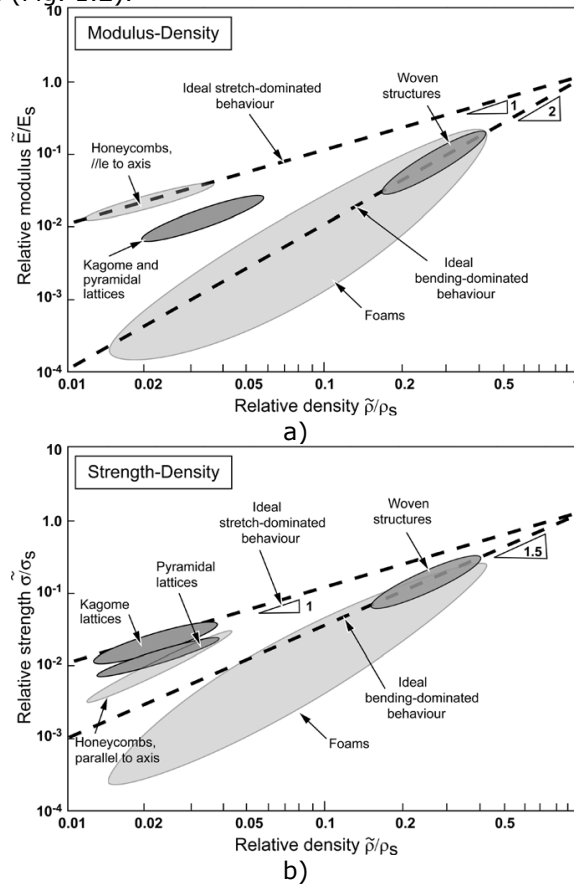


Fig. 4.1. Variația rigidității relative (a) și a rezistenței relative (b) cu densitatea relativă pentru diferite clase de materiale [52]

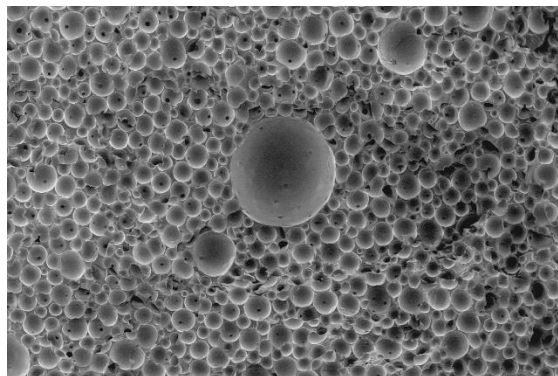


Fig. 4.2. Imagine SEM a structurii celulare a unei spume poliuretanică [53]

În cazul rigidității relative, valorile maxime se observă la structurile de tip fagure încărcate pe o direcție paralelă cu direcția de extrudare a celulelor. Acest fapt se datorează structurii regulate, cu pereți de grosime constantă (Fig. 4.3). Cu toate acestea, rezistența mecanică la compresiune a acestor tipuri de structuri este mai scăzută decât cea ideală (pentru o anumită densitate relativă), din cauză că pereții celulelor cedează, de regulă, prin flambaj, neatingându-se rezistența mecanică a materialului de bază în timpul solicitării.



Fig. 4.3. Structură metalică de tip fagure

În imaginile din Fig. 4.1 se poate observa o clasă de materiale care prezintă proprietăți situate între cele două tipuri de comportament ideal, și anume structurile de tip Kagome.

Structurile Kagome fac parte dintr-o clasă specială de materiale, numite metamateriale, care, prin definiție, reprezintă structuri periodice (teselate) cu geometrii bine definite, care au proprietăți superioare spumelor de densități similare [54, 55, 56].

De-a lungul anilor, s-au dezvoltat diverse structuri de metamateriale, având la bază, pe de o parte, structuri întâlnite în natură sau structuri antropogene [57, 58, 59]. Din prima categorie fac parte structurile cu celule cubice bazate pe rețelele cristaline, precum structura cubică cu fețe centrate, structura cubică cu volum centrat sau structura cristalină a diamantului [60]. Pe de altă parte, din cea de-a doua categorie, cele mai des întâlnite sunt structurile de tip Kagome, Kelvin (octaedru trunchiat) sau structura de tip grindă octet [54, 60].

În scopul dezvoltării de structuri celulare pentru aplicații în domeniul echipamentelor sportive s-au selectat patru tipuri de structuri pentru a fi investigate în detaliu: structura bazată pe sistemul cristalin cubic diamantat, structuri de grinzi octet, structuri de tip Kagome și structuri de tip Kelvin.

În prima etapă au fost dezvoltate modele geometrice pentru cele patru structuri, incorporând raze de racordare între grinzi, în scopul reducerii fenomenului de concentrare a tensiunii [56]. Dimensiunile geometriilor (diametrul grinzilor, lungimea grinzilor și raza de racord) au fost parametrizate, permițându-se obținerea de densități relative diferite prin simpla modificare a unor valori.

Densitățile relative ρ_{rel} s-au determinat din volumul relativ al structurii V_{rel} , obținut cu ajutorul volumului structurii \tilde{V} (estimat de către software-ul CAD) și volumul circumscris V_{cir} .

$$V_{rel} = \frac{\tilde{V}}{V_{cir}} \quad (4.8)$$

$$\rho_{rel} = \frac{\tilde{\rho}}{\rho_{MB}} = \frac{m_{str}}{V_{cir}} \cdot \frac{V_{cir}}{m_{V_{cir}}} = \frac{\tilde{V} \cdot \rho_{MB}}{V_{cir} \cdot \rho_{MB}} = \frac{\tilde{V}}{V_{cir}} = V_{rel} \quad (4.9)$$

unde m_{str} reprezintă masa structurii iar $m_{V_{cir}}$ masa volumului circumscris.

În a doua etapă, s-a determinat variația densității relative a structurilor cu parametrii geometrici. Neglijând efectele de scară, variația densității relative s-a exprimat în funcție de un singur parametru adimensional și anume, raportul diametrului grinzilor d la lungimea acestora l . Influența razelor de racord asupra densității relative a fost eliminată prin considerarea razei maxime care determină geometrii valide. Astfel, s-a determinat și variația razei maxime raportate la lungimea grinzii r_{max}/l cu raportul d/l pentru fiecare structură.

Variațiile densităților relative cu parametru d/l au fost exprimate prin intermediul unor funcții polinomiale ($\rho_{rel} = f(d/l)$), raportul dintre diametrul și lungimea grinzilor fiind obținut pentru anumite valori ale densității relative, și anume $\rho_{rel} = 0,04; 0,06; 0,08 \dots 0,2$, rezultând câte nouă structuri pentru fiecare geometrie. În scopul determinării variației razei de racord maxime și a densității relative cu parametru d/l , lungimea grinzii l s-a păstrat constantă, diametrului d fiindu-i atribuite diferite valori.

Structurile obținute au fost manipulate astfel încât să li se poată aplica condiții pe contur periodice, determinând astfel elemente de volum reprezentative alcătuite dintr-un număr mare de celule.

Structurile periodice au fost supuse unor analize numerice în pachetul software Abaqus/CAE pentru solicitări de compresiune, în scopul determinării variației rigidității relative E_{rel} și a rezistenței relative σ_{rel}^{max} cu densitatea relativă ρ_{rel} .

În analizele numerice s-a utilizat un model de material pentru un compus de ABS utilizat în aplicații de prototipare rapidă. Acesta a constat într-o formulare liniar-elastică izotropă cu modulul de elasticitate $E = 1505\text{MPa}$ și plasticitate caracterizată de ecuație multi-liniară izotropă (Fig. 4.4) [56].

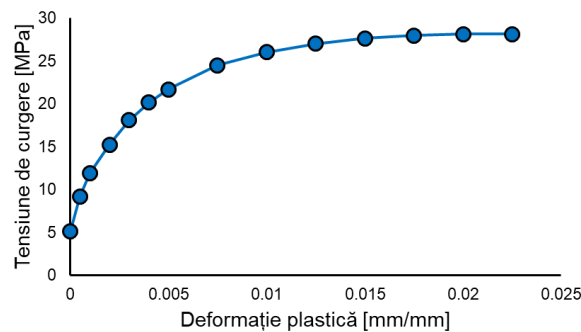


Fig. 4.4. Curba de ecruisare utilizată în modelul de plasticitate pentru ABS

Discretizările s-au efectuat cu elemente tetraedrice de ordinul 2 (C3D10), fiecare model utilizând diferite dimensiuni ale elementelor, astfel încât să se asigure un minim de 3 elemente pe secțiunea grinzilor. Așa cum s-a precizat anterior, pe fețele laterale ale volumelor reprezentative au fost impuse condiții pe contur

periodice, pe fața superioară s-a atribuit o deplasare, iar pe fața inferioară condiții pe contur de simetrie. Analizele au fost soluționate utilizând solver-ul implicit Abaqus/Standard, în regim static.

Ca date de ieșire, s-au înregistrat deplasările u ale nodurilor din suprafața superioară și reacțiunile R ale nodurilor elementelor situate pe suprafața inferioară. Deformațiile ε și tensiunile nominale σ ale structurilor au fost calculate utilizând relațiile

$$\varepsilon = \frac{u}{h} \quad (4.10)$$

$$\sigma = \frac{R}{A_h} = \frac{R}{b \cdot t} \quad (4.11)$$

unde h este înălțimea volumului reprezentativ iar A_h este aria suprafeței normale la h , având lățimea b și lungimea t .

4.2. Structuri bazate pe sistemul cubic diamant

4.2.1. Modelul geometric

Structura cristalină a diamantului este compusă din 18 atomi, 8 delimitând un cub, 6 aflându-se pe fețele cubului, în mod similar structurii cubice cu fețe centrate, ceilalți 4 aflându-se în interiorul cubului (Fig. 4.5 a). Celula de bază a structurii diamant constă în generarea unor grinzi în locul legăturilor atomice și eliminarea atomilor (Fig. 4.5 b). Datorită formei regulate a celulei de bază, elementul de volum reprezentativ este alcătuit din opt astfel de celule, extremitățile fiind secționate printr-un plan median longitudinal (Fig. 4.5 c).

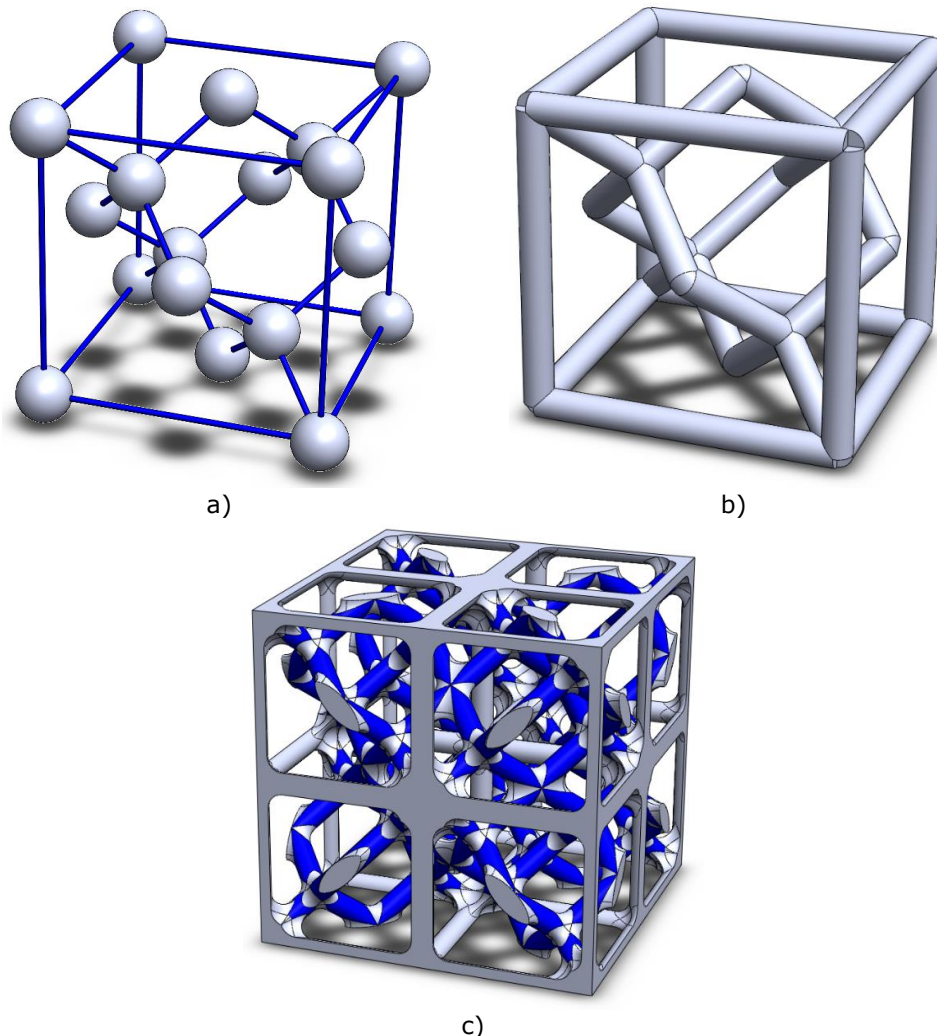


Fig. 4.5. Structura cristalină a diamantului (a), structura celulei cubice de tip diamant (b) și elementul de volum reprezentativ (c)

Așa cum s-a menționat anterior, în scopul reducerii concentrării de tensiuni în zona îmbinărilor grinzilor au fost introduse racorduri. Determinarea valorii maxime a acestora s-a realizat prin introducerea de valori diferite în mai multe iterații pentru un singur raport d/l , înregistrându-se valoarea maximă pentru care racordurile au fost generate de către software.

Pentru această structură, s-a observat că, pentru valori ale raportului d/l mai mici de 0,16, s-a înregistrat o creștere a razei de racord cu raportul d/l după o funcție polinomială de gradul 3 (relația (4.12)), iar pentru valori ale raportului d/l mai mari decât 0,16, s-a înregistrat o scădere a razei după o funcție polinomială de gradul 2 (relația (4.13)). Această variație este prezentată în Fig. 4.6.

$$\left(\frac{r_{max}}{l}\right)^{(I)} = -1,389\left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0,283\left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,69\frac{d}{l} + 0,00021, \quad \frac{d}{l} < 0,16 \quad (4.12)$$

$$\left(\frac{r_{max}}{l}\right)^{(II)} = -0,357\left(\frac{d}{l}\right)^2 - 0,3869\frac{d}{l} + 0,18, \quad \frac{d}{l} > 0,16 \quad (4.13)$$

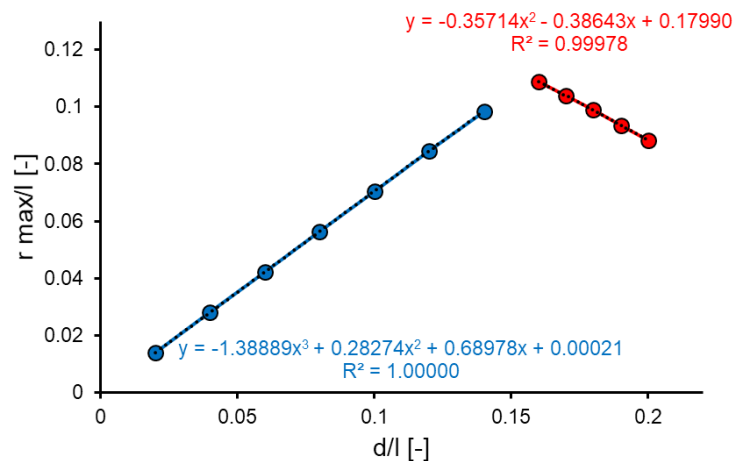


Fig. 4.6. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura diamant

Astfel, utilizând valoarea maximă a razei de racord pentru fiecare structură, s-a determinat variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l . Similar celor două variații ale raportului r_{max}/l , variația ρ_{rel} cu raportul d/l prezintă și ea la rândul ei două regiuni (Fig. 4.7), ambele fiind exprimate prin intermediul unor funcții polinomiale de gradul 3, relațiile (4.14) respectiv (4.15).

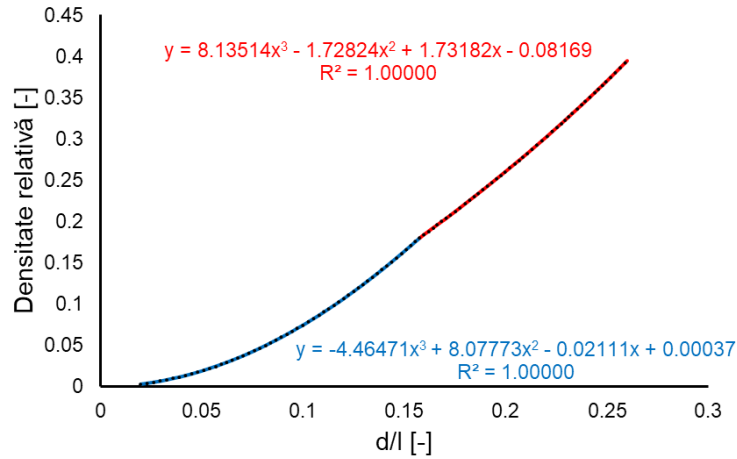


Fig. 4.7. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura diamant

$$\rho_{rel}^{(I)} = -4,465 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 8,078 \left(\frac{d}{l}\right)^2 - 0,02 \frac{d}{l} + 0,00037, \quad \frac{d}{l} \leq 0,16 \quad (4.14)$$

$$\rho_{rel}^{(II)} = 8,135 \left(\frac{d}{l}\right)^3 - 1,728 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 1,732 \frac{d}{l} - 0,082, \quad \frac{d}{l} \geq 0,16 \quad (4.15)$$

4.2.2. Analize numerice

Parametrii geometrici ai celor nouă structuri supuse analizelor numerice sunt prezentați în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Parametrii geometrici ai structurilor cubice diamant

ρ_{rel}	d/l
0,04	0,0729
0,06	0,0896
0,08	0,1037
0,10	0,11625
0,12	0,12768
0,14	0,13823
0,16	0,1481
0,18	0,15763
0,20	0,16853

Discretizarea fiecărei structuri a constat într-un număr de aproximativ 100.000 de elemente tetraedrice de ordinul doi (C3D10), două exemple, pentru densitățile relative de 0,08 și 0,2 fiind prezentate în Fig. 4.8.

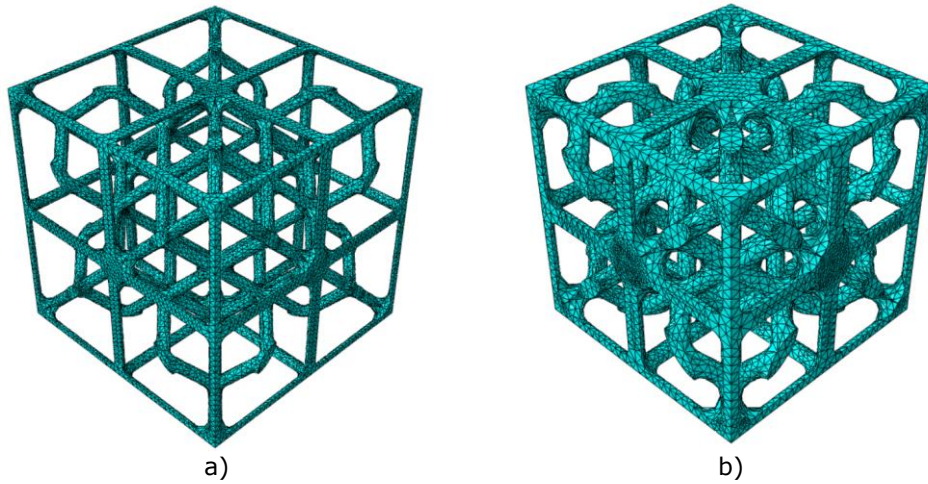


Fig. 4.8. Exemple de discretizări pentru structura cubică diamant

Deformata unui element de volum reprezentativ (pentru densitatea relativă de 0.08) este prezentată în Fig. 4.9, alături de distribuția tensiunilor echivalente von Mises. Din imagine, se poate observa că o parte din grinzi au fost supuse compresiunii și au cedat prin flambaj și o parte au fost supuse încovoierii.

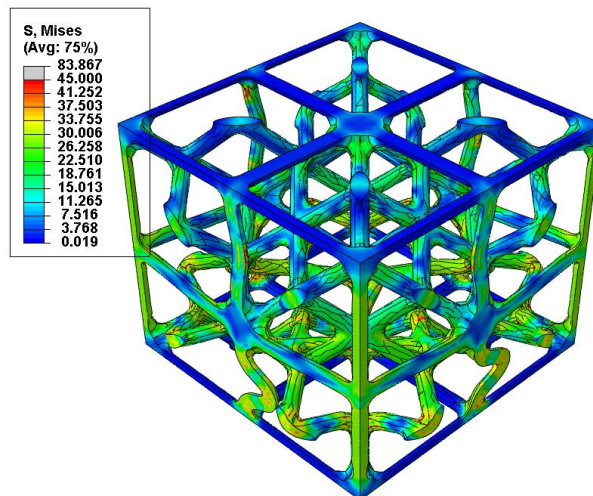


Fig. 4.9. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente

Datele de ieșire ale analizelor numerice au fost eșantionate în 100 de valori, curbele tensiune-deformație rezultate fiind prezentate în Fig. 4.10.

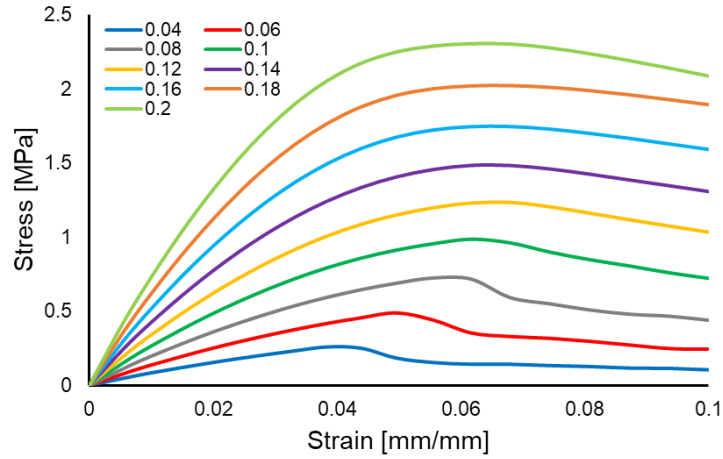


Fig. 4.10. Curbele tensiune-deformație pentru structurile cubice diamant

Pe baza rezultatelor analizelor numerice, s-au determinat rigiditățile relative E_{rel} și rezistențele mecanice relative σ_{rel}^{max} pentru fiecare densitate relativă. Valorile rigidităților relative pentru densitățile relative corespunzătoare, prezentate în Fig. 4.11, se situează între comportamentul ideal la alungire și cel la încovoiere. Această variație se poate aproxima printr-o funcție putere, prezentată în ecuația (4.16).

$$E_{rel} = 0,532 \cdot \rho_{rel}^{1,389} \quad (4.16)$$

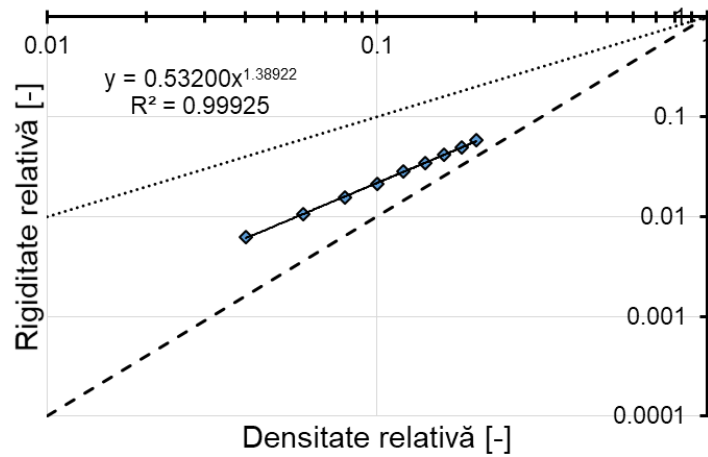


Fig. 4.11. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile cubice diamant

Valorile obținute pentru rezistența mecanică relativă corespunzătoare densităților relative este prezentată în Fig. 4.12 și sunt foarte apropiate de comportamentul ideal la încovoiere.

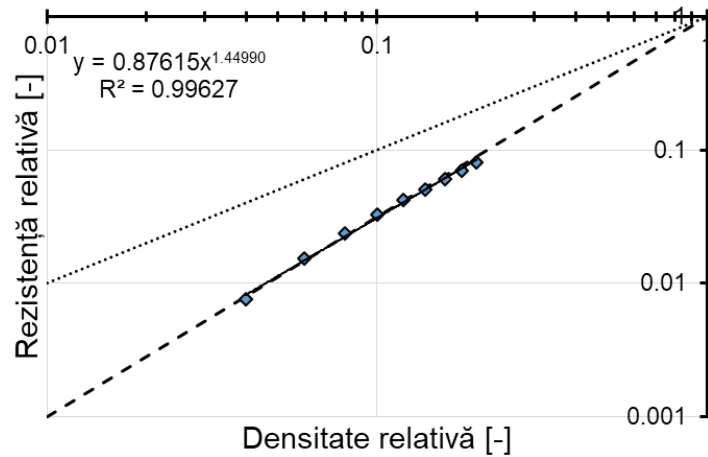


Fig. 4.12. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile cubice diamant

Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă se poate aproxima printr-o funcție putere, prezentată în ecuația (4.17).

$$\sigma_{rel}^{max} = 0,876 \cdot \rho_{rel}^{1,45} \quad (4.17)$$

4.3. Structuri de grinzi octet

4.3.1. Modelul geometric

Structura de grinzi de tip octet a fost dezvoltată și analizată pentru a aduce îmbunătățiri în aplicațiile care necesită materiale ultra-ușoare, care au capacități crescute de absorbție de energie mecanică. Structura unei celule de tip octet (Fig. 4.13 a) este realizată cu ajutorul a 14 conexiuni nodale ce realizează o configurație cubică cu fețe centrate. În fiecare celulă cu formă cubică se regăsesc câte trei grinzi ce intersectează colțurile și opt elemente care se intersectează în punctele centrale ale suprafețelor laterale. Elementul de volum reprezentativ este realizat prin conglomerarea a opt celule (2x2x2) de acest tip, extremitățile fiind secționate în planul median longitudinal (Fig. 4.13 b).

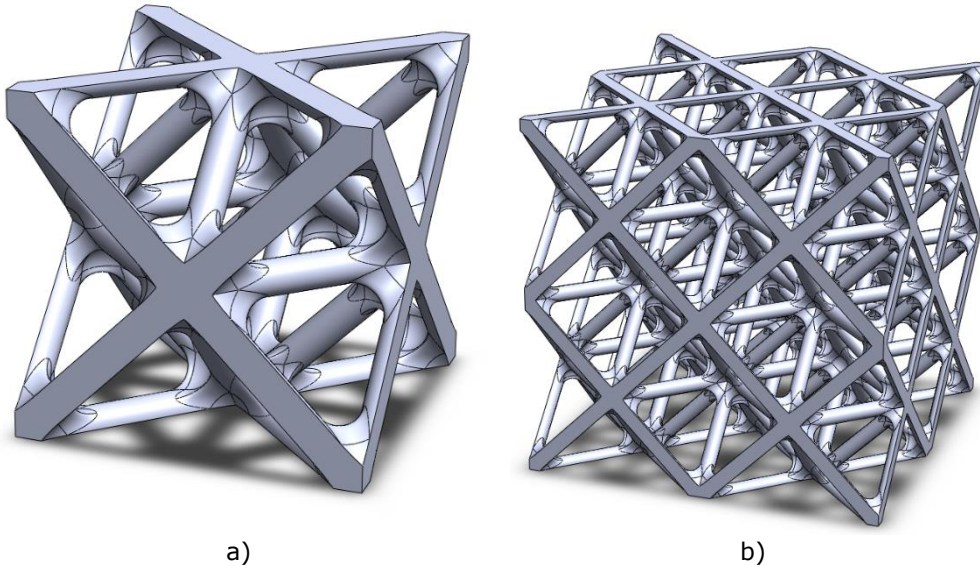


Fig. 4.13. Structura celulei cubice de grinzi de tip octet (a) și elementul de volum reprezentativ (b)

Cu scopul de a ameliora concentrarea tensiunilor în zonele de îmbinare a grinzilor, sunt utilizate raze de racordare. Pentru a determina valorile maxime utilizabile în cazul acestei aplicații, un singur raport d/l a fost analizat în cadrul programului de analiză, realizând mai multe iterații cu valori diferite și alegând raza maximă pentru care racordurile au fost generate în cadrul programului.

În cazul structurii de față, s-a constatat faptul că valoarea razei de racord crește liniar cu raportul d/l , conform relației (4.18). Această variație poate fi observată în Fig. 4.14.

$$\frac{r_{max}}{l} = 0,84 \frac{d}{l} \quad (4.18)$$

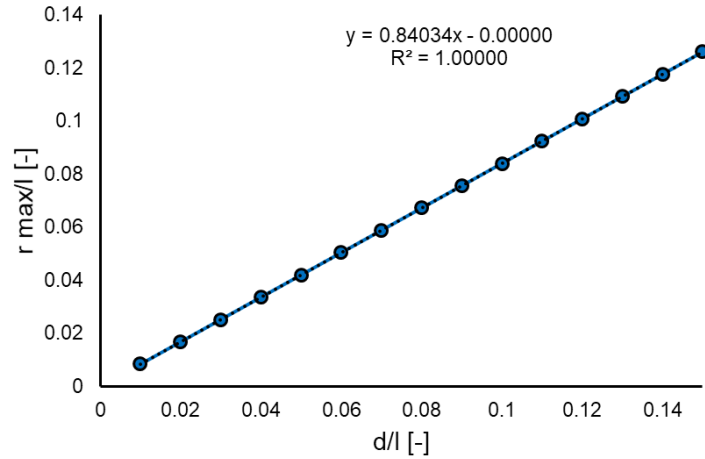


Fig. 4.14. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura de grinzi octet

Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l s-a determinat utilizând valoarea maximă a razei de racord corespunzător fiecărei structuri, după cum se observă în Fig. 4.15. Variația densității relative și lungimea grinzilor cu raportul d/l se poate exprima cu ajutorul funcției polinomiale de gradul 3 prezentate prin relației (4.19).

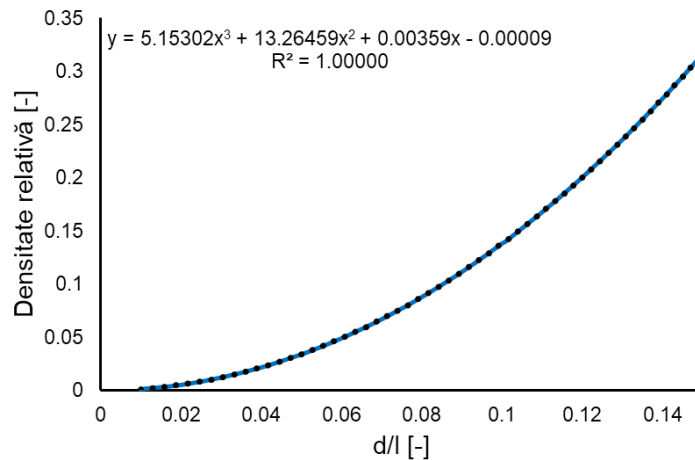


Fig. 4.15. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura de grinzi octet

$$\rho_{rel} = 5,153 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 13,265 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,0036 \frac{d}{l} + 9 \cdot 10^{-5} \quad (4.19)$$

4.3.2. Analize numerice

Parametrii geometrici utilizați în analizele numerice sunt prezentați în Tabelul 4.2, în coloana din stânga fiind prezentate valorile densității relative, iar coloana din dreapta se regăsește raportul dintre diametrul și lungimea grinzilor.

Tabelul 4.2. Parametrii geometrici ai structurilor grinzi octet

ρ_{rel}	d/l
0,04	0,05427
0,06	0,06635
0,08	0,07645
0,10	0,08533
0,12	0,09333
0,14	0,10086
0,16	0,10749
0,18	0,11391
0,20	0,11991

Discretizarea fiecărei structuri a constat într-un număr de aproximativ 400.000 – 600.000 de elemente tetraedrice de ordinul doi (C3D10), două exemple, pentru densitățile relative de 0,08 și 0,2 fiind prezentate în Fig. 4.16.

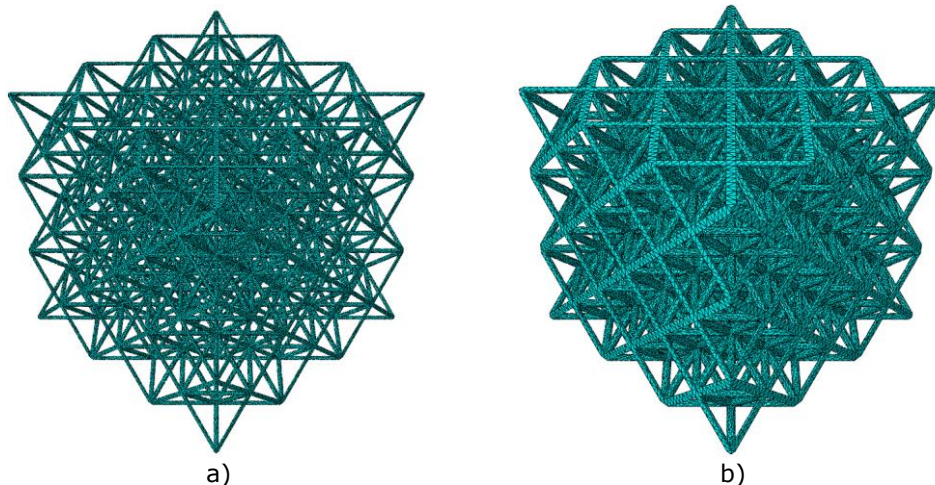


Fig. 4.16. Exemple de discretizări pentru structura de grinzi octet

În Fig. 4.17 este reprezentată deformată unui element de volum reprezentativ (având densitatea relativă de 0,2). În această imagine se poate observa și distribuția tensiunilor echivalente von Mises. Modul de cedare al grinzilor este determinat atât de flambaj, cât și de încovoierea grinzilor, la solicitarea de compresiune.

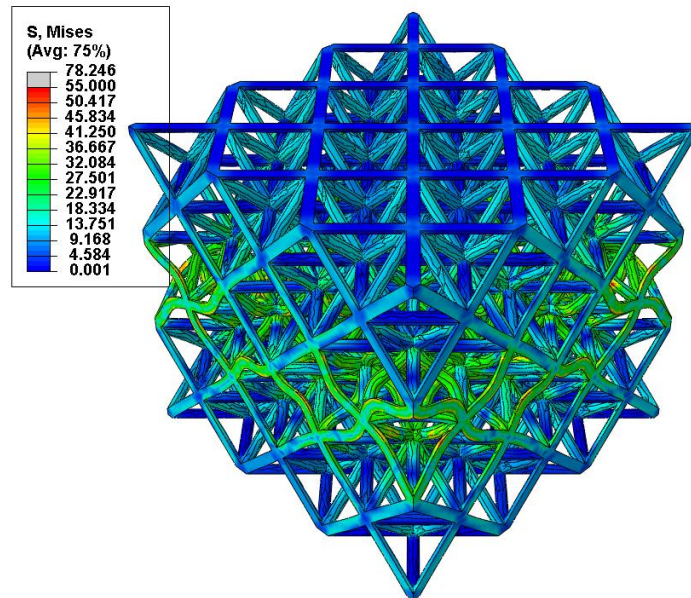


Fig. 4.17. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente pentru structura de grinzi de tip octet

Rezultatele analizelor numerice au fost prelucrate și eșantionate în 100 de valori, în Fig. 4.18 fiind ilustrate curbele tensiune-deformație.

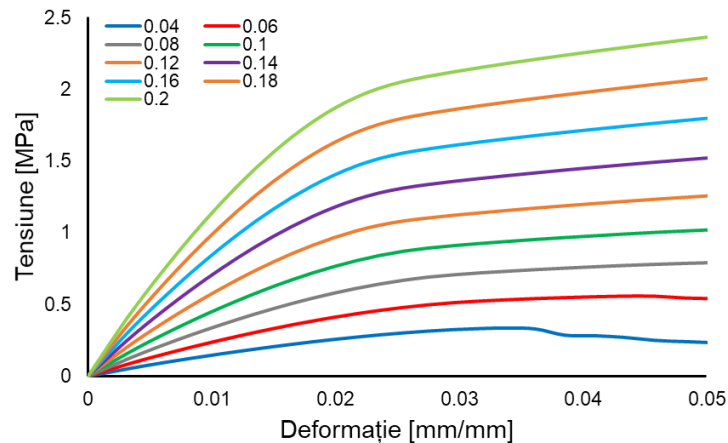


Fig. 4.18. Curbele tensiune-deformație pentru structurile de grinzi octet

Pentru fiecare densitate relativă, pe baza rezultatelor analizelor numerice, s-a determinat rigiditatea relativă E_{rel} și rezistența mecanică relativă σ_{rel}^{max} . În Fig. 4.19 este prezentată variația rigidității relative cu densitatea relativă corespunzătoare, valorile fiind situate între limitele caracteristice comportamentelor ideale la alungire și încovoiere.

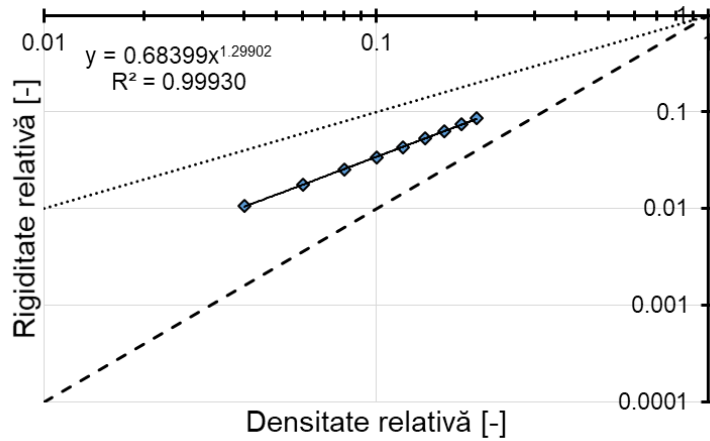


Fig. 4.19. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile de grinzi octet

Variația rigidității relative cu densitatea relativă corespunzătoare se poate exprima printr-o funcție putere, prezentată în ecuația (4.20).

$$E_{rel} = 0,684 \cdot \rho_{rel}^{1,299} \quad (4.20)$$

În Fig. 4.20 este reprezentată variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă corespunzătoare. Valorile obținute sunt apropiate de linia inferioară, determinând un comportament apropiat de cel ideal la încovoiere.

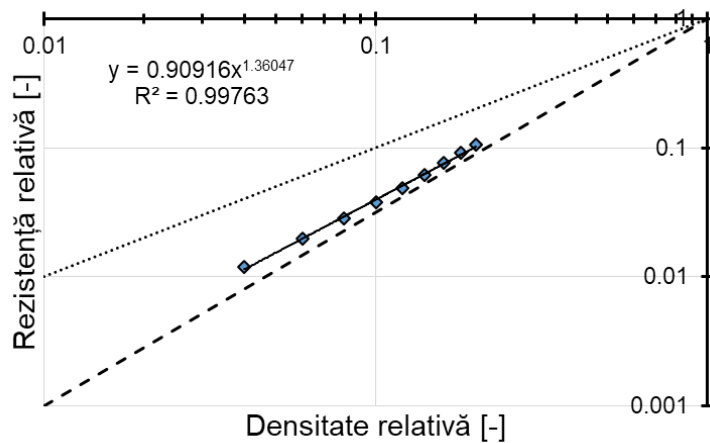


Fig. 4.20. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile de grinzi de tip octet

În relația (4.21) este prezentată funcția putere cu care se poate aproxima variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă.

$$\sigma_{rel}^{max} = 0,909 \cdot \rho_{rel}^{1,36} \quad (4.21)$$

4.4. Structuri Kagome

4.4.1. Modelul geometric

Structurile de tip Kagome sunt obținute pe baza modelelor nipone de împletire a coșurilor de bambus. În realizarea acestor structuri s-a realizat un model în componența căruia intră unități celulare formate din 7 conexiuni nodale, unite prin intermediul unor elemente de tipul grinzilor, după cum se poate observa în Fig. 4.21 a. Structurile de volum reprezentativ necesare investigațiilor s-au realizat prin suprapunerea și alăturarea unui număr de $3 \times 4 \times 2$ astfel de celule, fiind încadrate într-un volum prismatic (Fig. 4.21b).

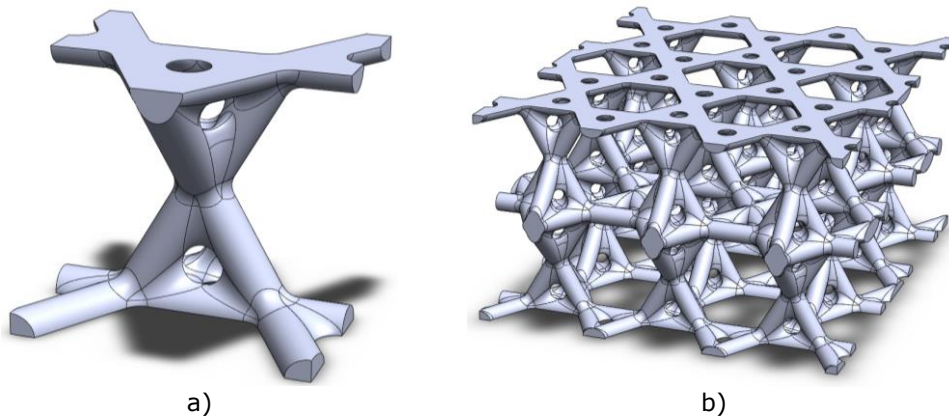
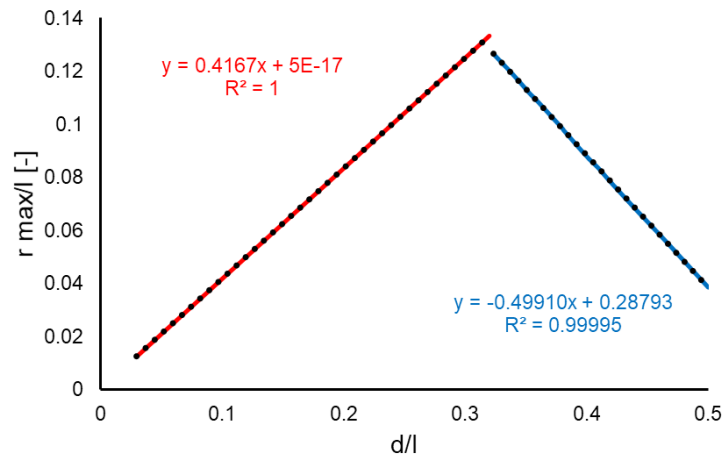


Fig. 4.21. Structura celulei de tip Kagome (a) și elementul de volum reprezentativ (b)

Similar celorlalte modele, razele de racord sunt prezente pentru a evita concentratorii de tensiune în zonele de îmbinare. Valoarea maximă a razelor de racord s-a determinat prin introducerea valorilor diferite în mai multe iterații, pentru un singur raport d/l , și înregistrarea razei maxime generate de program.

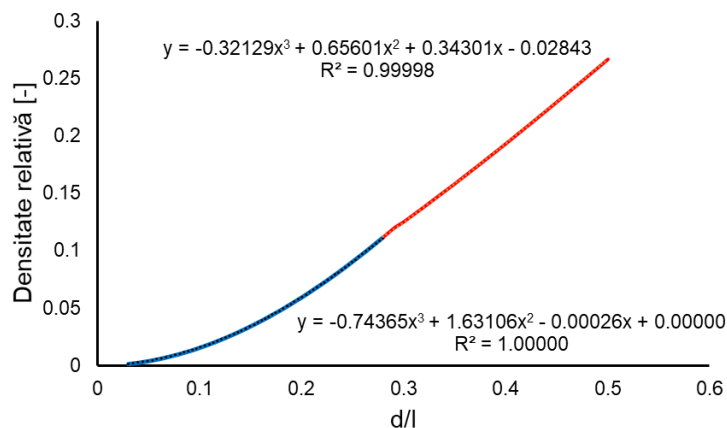
Pentru structura realizată pe baza elementelor celulare de tip Kagome s-a observat că valoarea de 0,28 delimitează două metode de generare a racordurilor. Pentru valori mai mici decât 0,28 s-a înregistrat o creștere liniară a razei de racord cu valoarea raportului d/l , relația (4.22), pe când pentru valori mai mari decât 0,28, se observă o scădere a razei de racord cu raportul d/l , relația (4.23). Aceste variații sunt prezentate în Fig. 4.22.

Fig. 4.22. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura Kagome

$$\left(\frac{r_{max}}{l}\right)^{(I)} = 0,417 \frac{d}{l}, \quad \frac{d}{l} \leq 0,28 \quad (4.22)$$

$$\left(\frac{r_{max}}{l}\right)^{(II)} = -0,499 \frac{d}{l} + 0,288, \quad \frac{d}{l} \geq 0,28 \quad (4.23)$$

După ce s-a obținut variația razei de racord (implicit valoarea maximă pentru fiecare structură), atenția studiului s-a concentrat spre determinarea variației densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l . Datorită celor două moduri de variație ale raportului r_{max}/l , densitatea relativă prezintă două regiuni (reprezentate în Fig. 4.23), ambele fiind exprimate cu ajutorul funcțiilor polinomiale de gradul al treilea, relațiile (4.24) și (4.25).

Fig. 4.23. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura Kagome

$$\rho_{rel}^{(I)} = -0,744 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 1,631 \left(\frac{d}{l}\right)^2 - 0,0026 \frac{d}{l}, \quad \frac{d}{l} \leq 0,28 \quad (4.24)$$

$$\rho_{rel}^{(II)} = -0,321 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0,656 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,343 \frac{d}{l} + 0,0284, \quad \frac{d}{l} \geq 0,28 \quad (4.25)$$

4.4.2. Analize numerice

În cadrul analizei numerice au fost verificate nouă structuri, ai căror parametri geometrici sunt prezentați în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Parametrii geometrici ai structurilor Kagome

ρ_{rel}	d/l
0,04	0,1629
0,06	0,2014
0,08	0,2345
0,10	0,2641
0,12	0,2915
0,14	0,3231
0,16	0,3528
0,18	0,3815
0,20	0,4096

Pentru a efectua discretizarea fiecărei structuri s-a utilizat un număr de aproximativ 250.000 – 300.000 de elemente tetraedrice de ordinul doi (C3D10), două exemple, pentru densitățile relative de 0,06 și 0,18 fiind prezentate în Fig. 4.24

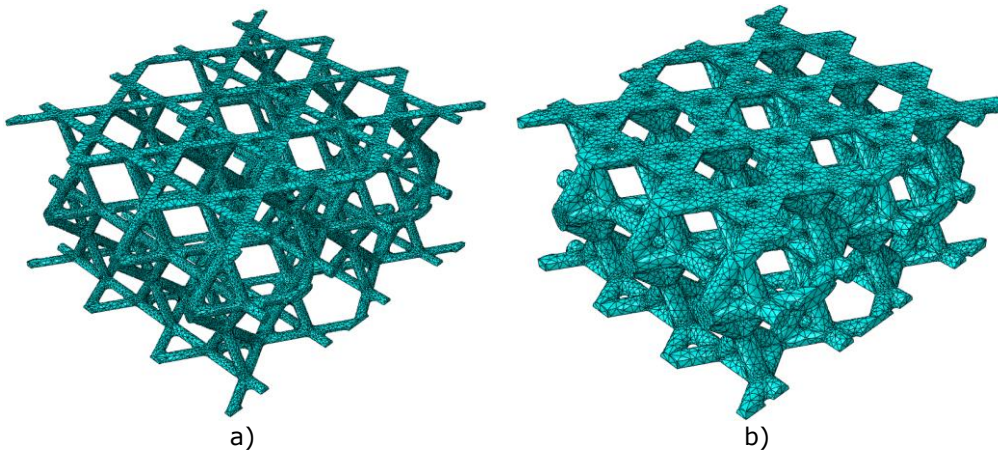


Fig. 4.24. Exemple de discretizări pentru structura Kagome

În Fig. 4.25 este ilustrat elementul de volum reprezentativ (pentru o densitate relativă de 0,16), alături de distribuția tensiunilor echivalente von Mises, pentru solicitarea de compresiune.

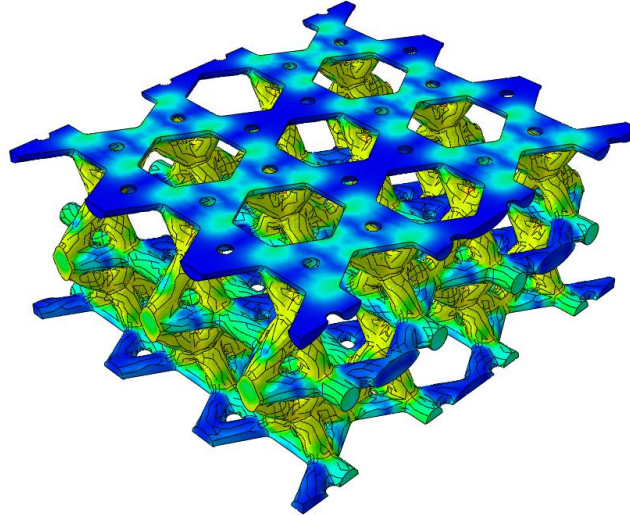


Fig. 4.25. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente

Curbele tensiune-deformație determinate în urma analizelor numerice sunt prezentate în Fig. 4.26. Aceste curbe au fost obținute prin analizarea valorilor rezultate și eșantionarea acestora în 100 de valori.

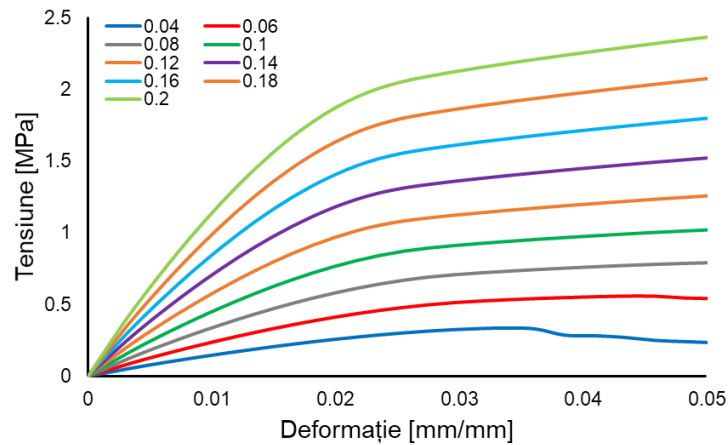


Fig. 4.26. Curbele tensiune-deformație pentru structurile de tip Kagome

Rigiditățile relative E_{rel} și rezistențele mecanice relative σ_{rel}^{max} pentru fiecare densitate relativă sunt punctele de interes determinate cu ajutorul analizelor numerice. Rigiditățile relative, în funcție de densitățile relative corespunzătoare, prezentate în Fig. 4.27, au valori situate între comportamentul ideal la alungire și cel la încovoiere. Variația aceasta se poate aproxima printr-o funcție putere, prezentată prin ecuația (4.26).

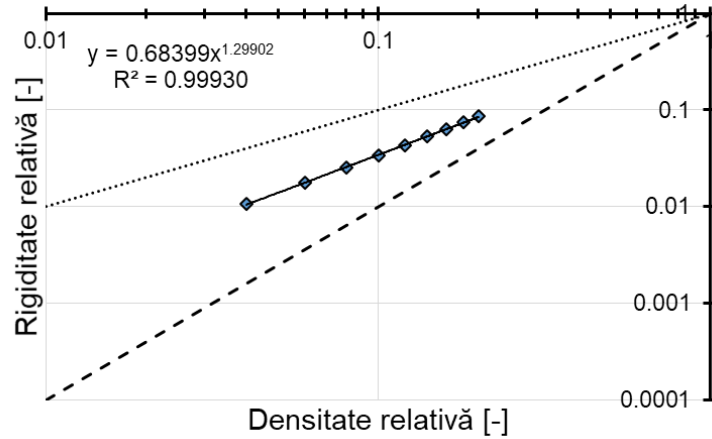


Fig. 4.27. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile de tip Kagome

$$E_{rel} = 0,684 \cdot \rho_{rel}^{1,299} \quad (4.26)$$

Rezistența mecanică relativă corespunzătoare densităților relative prezintă valori foarte apropiate de comportamentul ideal la încovoiere (Fig. 4.28).

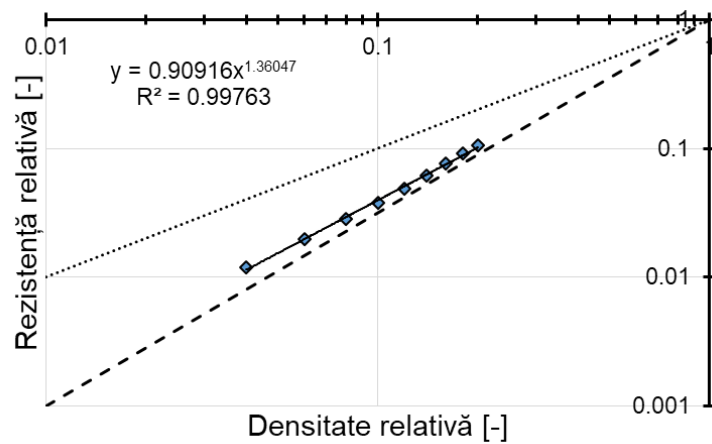


Fig. 4.28. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile de tip Kagome

Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă, pentru structurile de tip Kagome, se poate aproxima printr-o funcție putere, exprimată prin ecuația (4.27).

$$\sigma_{rel}^{max} = 0,909 \cdot \rho_{rel}^{1,36} \quad (4.27)$$

4.5. Structuri Kelvin

4.5.1. Modelul geometric

Structura de tip Kelvin este circumscrisă volumului unui tetradodecaedru, având paisprezece unități poliedrice care realizează fețele structurii, patru fiind sub formă de romb, două sub formă de pătrat și opt sub forma unor hexagoane, Fig. 4.29 a [61, 62]. În modelele analizate s-au utilizat elemente prismatice decupate din teselarea a 8 celule (Fig. 4.29 b), iar alăturarea unui număr de $2 \times 2 \times 2$ celule conduce la obținerea elementului de volum reprezentativ (Fig. 4.29 c), extremitățile fiind secționate pentru a încadra structura într-un volum circumscris de formă prismatică.

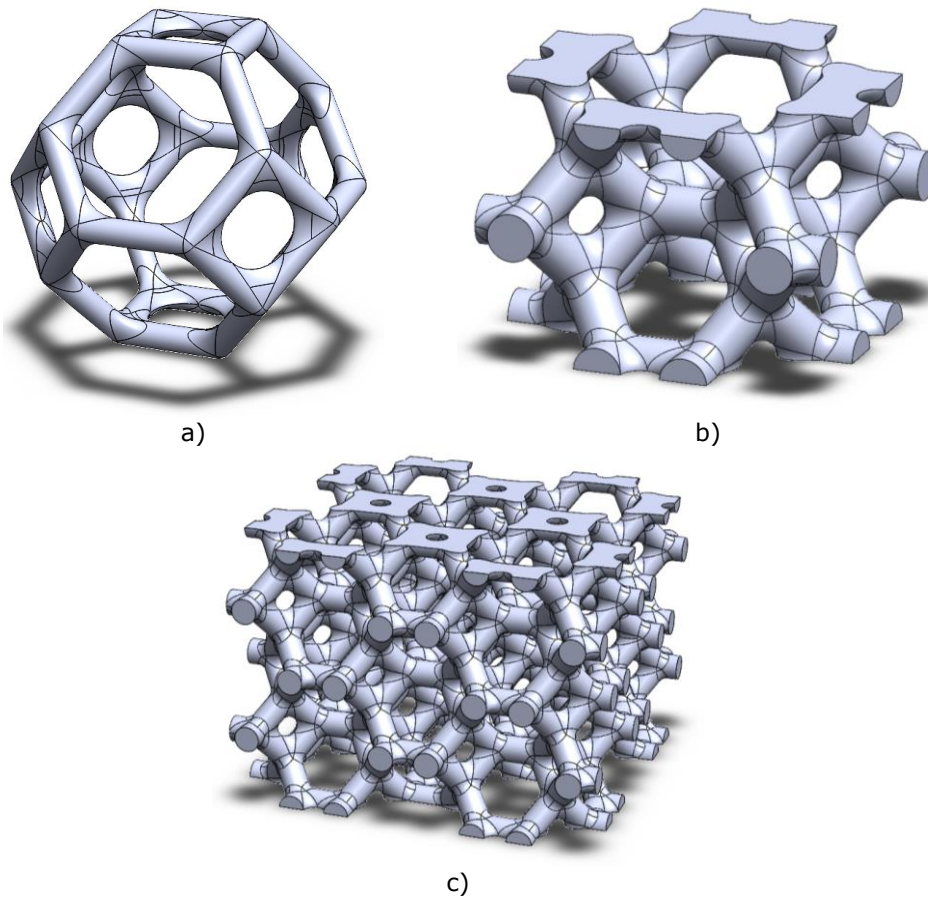


Fig. 4.29. Structura de tip Kelvin (a, b) și elementul de volum reprezentativ (c)

Similar modului de lucru admis în cazul structurilor anterioare, pentru a reduce concentrarea de tensiune în zona îmbinărilor sunt necesare raze de racord. Pentru a determina valorile maxime ale acestora s-au efectuat mai multe iterații,

pentru a obține un singur raport d/l , înregistrându-se ultima rază pentru care racordurile au putut fi generate de către program.

În cazul structurii Kelvin, s-a constatat că pentru valori ale raportului d/l mai mari de 0,2, apare o scădere a razei de racord cu raportul d/l , după o funcție liniară aproximată prin relația (4.29). Pentru valori mai mici de 0,2, apare o creștere a razei de racord cu raportul d/l , după o funcție liniară (relația (4.28)). Această variație este prezentată în Fig. 4.30.

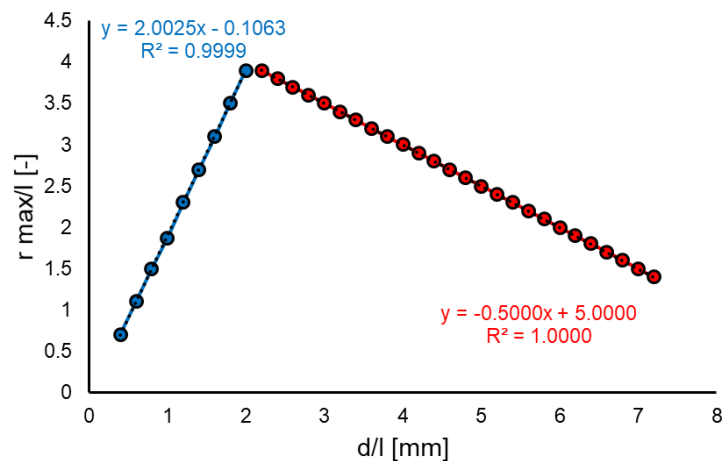
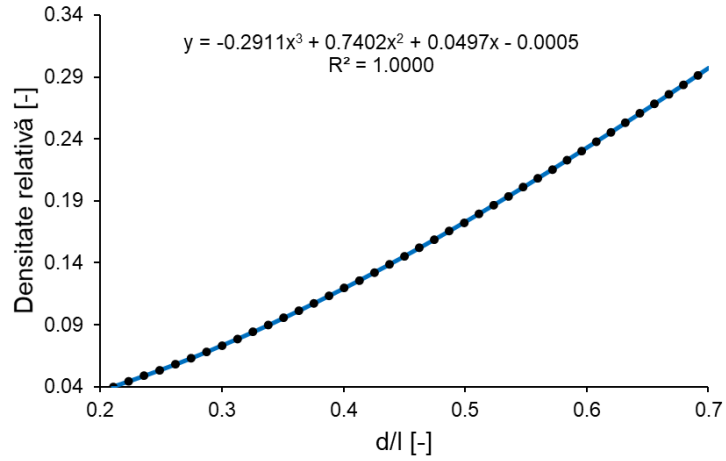


Fig. 4.30. Variația raportului r_{max}/l cu raportul d/l pentru structura Kelvin

$$\left(\frac{r_{max}}{l}\right)^{(I)} = 2,0025 \frac{d}{l} - 0,063, \quad \frac{d}{l} < 0,2 \quad (4.28)$$

$$\left(\frac{r_{max}}{l}\right)^{(II)} = -0,5 \frac{d}{l} + 5, \quad \frac{d}{l} > 0,2 \quad (4.29)$$

Utilizând valoarea maximă a razei de racord pentru fiecare structură, variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l a fost determinată și este ilustrată în Fig. 4.31. Această variație se poate exprima prin intermediul funcției de gradul 3, relația (4.30).

Fig. 4.31. Variația densității relative ρ_{rel} cu raportul d/l pentru structura Kelvin

$$\rho = -0,291 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0,74 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,0497 \frac{d}{l} - 0,00055 \quad (4.30)$$

4.5.2. Analize numerice

În Tabelul 4.4 sunt prezentate valorile densității relative cu raportul d/l pentru structurile Kelvin supuse analizelor numerice.

Tabelul 4.4. Parametrii geometrici ai structurilor Kelvin

ρ_{rel}	d/l
0,04	0,2105
0,06	0,2671
0,08	0,3163
0,10	0,3607
0,12	0,4017
0,14	0,4403
0,16	0,477
0,18	0,5122
0,20	0,5462

Pentru efectuarea discretizării structurilor Kelvin s-a utilizat un număr de aproximativ 300,000 elemente tetraedrice de ordinul doi (C3D10), două exemple, pentru densitățile relative de 0,04 și 0,16 fiind prezentate în Fig. 4.32.

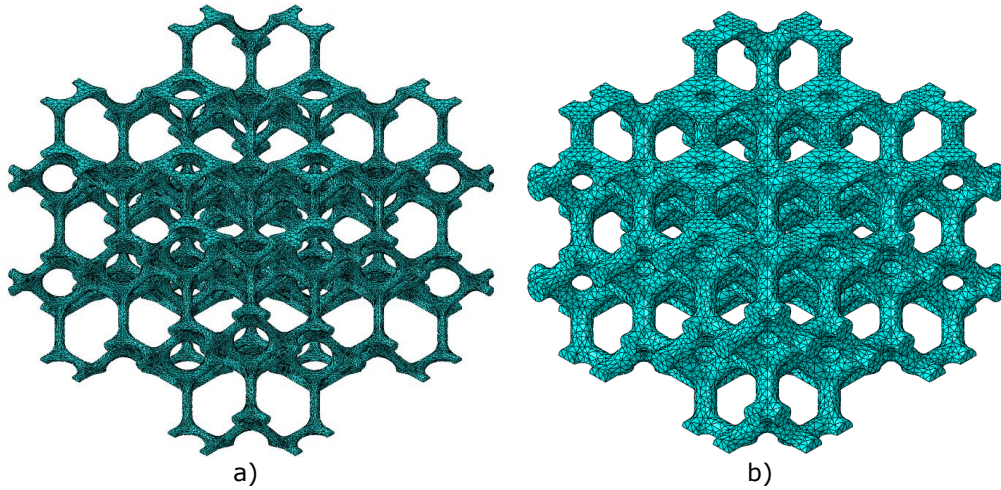


Fig. 4.32. Exemple de discretizări pentru structura Kelvin

Fig. 4.33 prezintă deformata unui element de volum reprezentativ, pentru densitatea relativă de 0,12. Se poate observa și distribuția tensiunilor echivalente von Mises, alături de modul de cedare al grinzilor la solicitarea de compresie. Se constată că unele elemente au cedat la flambaj, altele sub acțiunea solicitării de încovoiere.

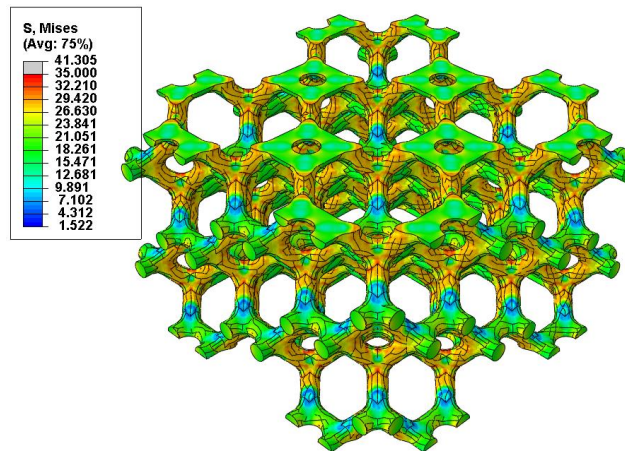


Fig. 4.33. Elementul de volum reprezentativ deformat cu distribuția tensiunilor echivalente

În Fig. 4.34 sunt reprezentate curbele tensiune-deformație, acestea fiind trasate pe baza analizelor numerice, eșantionate în 100 de valori.

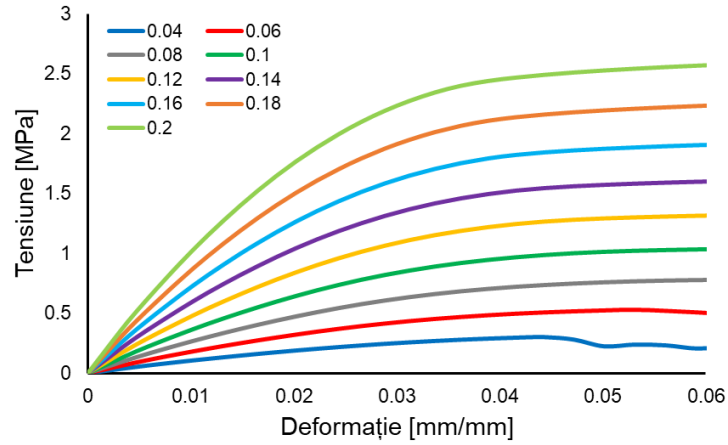


Fig. 4.34. Curbele tensiune-deformație pentru structurile Kelvin

Rigiditățile relative E_{rel} și rezistențele mecanice relative σ_{rel}^{max} pentru fiecare densitate relativă s-au determinat pe baza rezultatelor analizelor numerice. Valorile rigidităților relative pentru densitățile relative corespunzătoare sunt prezentate în Fig. 4.35 și se situează între comportamentul ideal la alungire și cel la încovoiere. Această variație se poate aproxima printr-o funcție putere, exprimată prin ecuația (4.31).

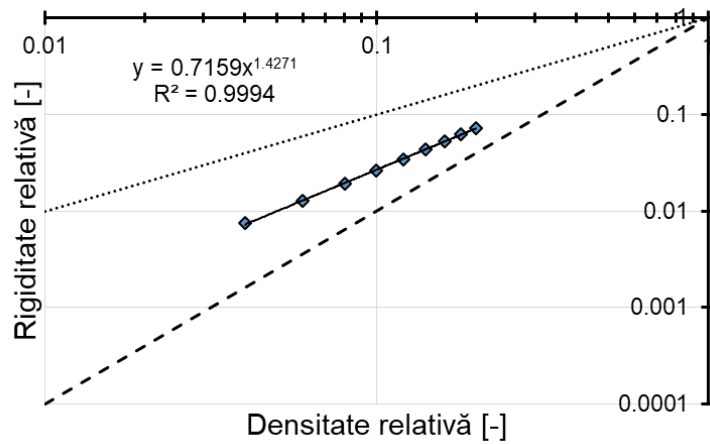


Fig. 4.35. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile Kelvin

$$E_{rel} = 0,7159 \cdot \rho_{rel}^{1,427} \quad (4.31)$$

În Fig. 4.36 sunt prezentate valorile obținute pentru rezistența mecanică relativă corespunzătoare densităților relative și sunt foarte apropiate de valorile ideale la încovoiere. Această variație se poate aproxima printr-o funcție putere, prezentată în ecuația (4.32).

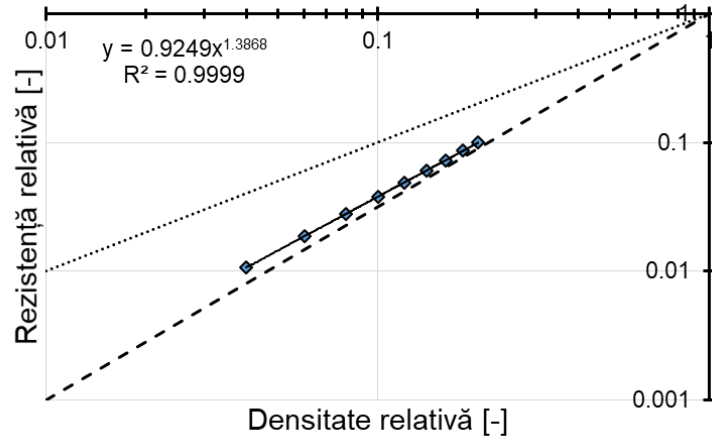


Fig. 4.36. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile Kelvin

$$\sigma_{rel}^{max} = 0,9249 \cdot \rho_{rel}^{1,387} \quad (4.32)$$

4.6. Concluzii

În Fig. 4.37 este prezentată o comparație între variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru cele patru tipuri de structuri investigate. Structura de tip Kagome prezintă cele mai ridicate valori ale rigidității relative pe întreg intervalul de densități relative investigate. În opoziție, structura de tip diamant prezintă cele mai scăzute valori, în timp ce structura de grinzi octet și structura Kelvin prezintă valori relativ apropiate la densități relative mai ridicate, structura Kelvin având performanțe mai bune la densități relative mai mici. Astfel, deși structura Kelvin este solicitată predominant la încovoiere, prezintă proprietăți superioare structurilor de tip grinzi octet, care sunt solicitate predominant la alungire.

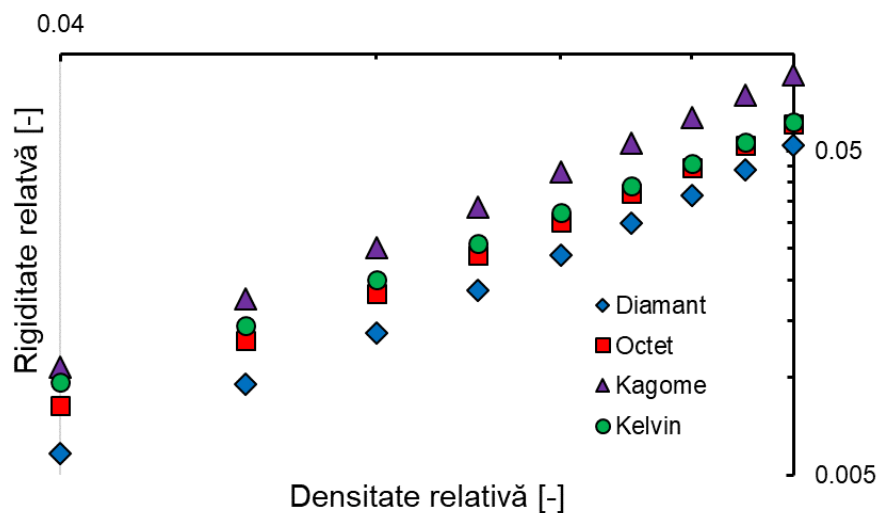


Fig. 4.37. Variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structurile investigate

Fenomenul observat nu se conformează modelului teoretic, care prezice faptul că o structură solicitată predominant la alungire va avea o rigiditate superioară unei structuri solicitată predominant la încovoiere (pentru aceeași densitate relativă).

Din analizele structurilor prezentate anterior, se poate observa că, pe lângă solicitarea predominantă în timpul încărcărilor la care este supusă structura (încovoiere sau alungire), un factor important îl reprezintă și raportul dintre diametrul grinzilor care alcătuiesc structura și lungimea lor (Fig. 4.38). Astfel, structura de tip Kelvin prezintă cele mai mari valori ale raportului d/l dintre structurile investigate, datorită volumului relativ mare al celulei de bază (grinzile formează unghiuri obtuze între ele). La polul opus se plasează structura de tip grinzi octet, care este cea mai compactă și prezintă cel mai mic raport d/l la aceeași densitate relativă. Structura de tip diamant are în componență atât grinzi solicitate la încovoiere cât și la alungire. Prezența grinzilor solicitate la încovoiere, coroborată cu valorile mici ale raportului d/l , determină cele mai scăzute valori ale rigidității relative pentru o anumită densitate relativă, dintre structurile investigate. Structura de tip Kagome prezintă grinzi solicitate la alungire, precum și valori relativ mari ale raportului d/l la aceeași densitate relativă, determinând astfel cele mai mari valori ale rigidităților relative.

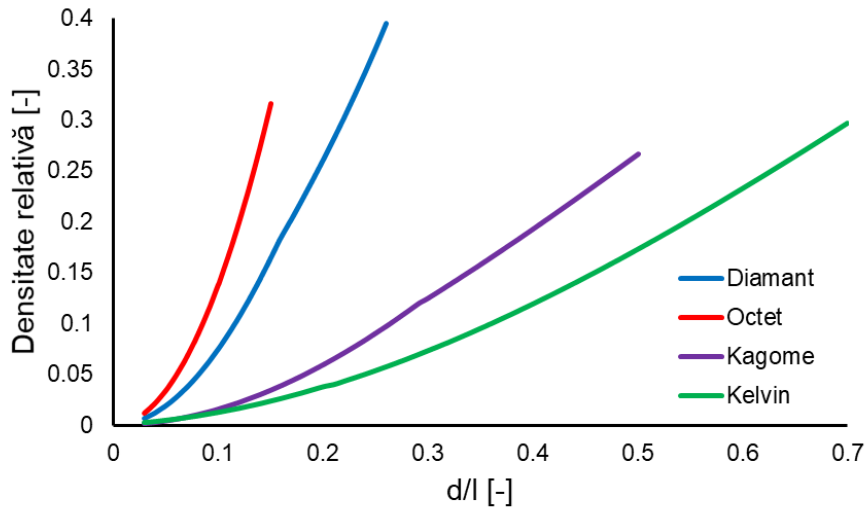


Fig. 4.38. Variația densității relative cu raportul d/l pentru structurile investigate

Comparația dintre variația rezistenței relative cu densitatea relativă pentru structurile investigate este prezentată în Fig. 4.39. Și în acest caz, structura de tip Kagome prezintă cele mai bune proprietăți, urmată îndeaproape de structura de tip Kelvin. Structura de tip octet prezintă o abatere de la liniaritatea dreptei (în axe dublu logaritmice), determinând rigidități mai mici relativ la celelalte structuri, la densități relative mari.

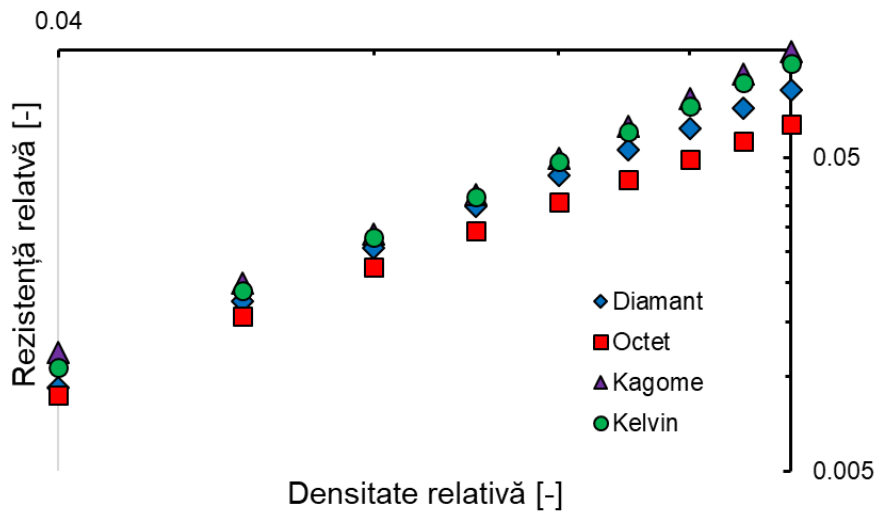


Fig. 4.39. Variația rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă pentru structurile investigate

Diferențele dintre rigiditățile relative și rezistențele relative pentru cele patru structuri investigate sunt evidențiate în Fig. 4.40, unde sunt prezentate curbele tensiune-deformație pentru o densitate relativă de 0,12.

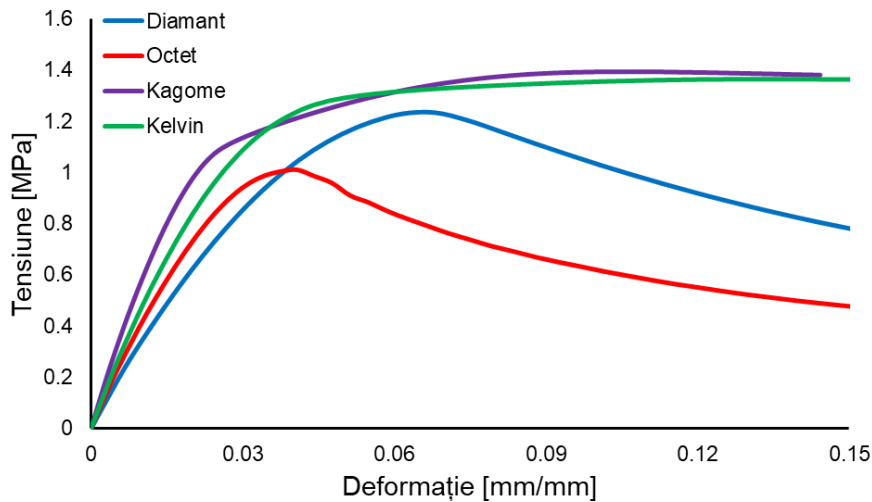


Fig. 4.40. Curbele tensiune-deformație ale celor patru structuri, pentru densitatea relativă de 0,12

Din aceste grafice se poate observa că, pe lângă faptul că structurile de tip Kagome și Kelvin posedă proprietăți mecanice superioare, acestea prezintă și capacități de absorbție a energiei mai ridicate. După atingerea rezistenței mecanice, curbele tensiune-deformație ale structurilor de tip Kagome și Kelvin prezintă o regiune de palier, cauzată de deformația plastică a grinzilor. Acest fapt este evidențiat în Fig. 4.25 respectiv Fig. 4.33, unde se observă o distribuție relativ uniformă a tensiunilor. Datorită faptului că structurile de tip diamant și grinzi octet au elemente solificate predominant la alungire, coroborat cu raportul scăzut al diametrului grinzilor la lungimea lor, la deformații mari grinzile cedează la flambaj, determinând o scădere a caracteristicii tensiune-deformație după acel punct. Acest fapt este evidențiat în Fig. 4.9 și în Fig. 4.18, unde se pot observa regiuni mai intens solificate, cauzate de flambajul plastic al grinzilor.

În consecință, în implementarea materialelor celulare în echipamentele sportive, se vor utiliza structurile de tip Kagome și Kelvin.

5. IMPLEMENTAREA NOILOR MATERIALE CELULARE ÎN ECHIPAMENTE SPORTIVE

5.1. Modelul de referință

5.1.1. Modelul geometric

În scopul evaluării performanțelor noilor modele geometrice de tălpi de încălțăminte sportivă, a fost nevoie de efectuarea unei analize de referință pe o talpă având proprietăți similare cu cele ale spumelor investigate în Capitolul 2.

Pentru ca în analizele tălpii de încălțăminte sportivă să se utilizeze o geometrie cât mai realistă, s-a accesat un model de pe platforma GrabCAD [63], prezentat în Fig. 5.1 (a). Acest ansamblu este constituit din mai multe componente, de interes fiind partea mediană a tălpii, Fig. 5.1 (b).



Fig. 5.1. Modelul CAD pentru încălțăminte sportivă (a) și modelul CAD al părții mediane a tălpii (b)

5.1.2. Analiza numerică a modelului de referință

Modelele geometrice utilizate în analiza numerică sunt reprezentate dintr-un indector, un suport și talpa mediană. Indectorul constă dintr-o suprafață rigidă, formată de o prismă de dimensiuni 45 (mm) x 60 (mm) x 60 (mm), având raze de racordare de 10 mm pe laturi, pentru a evita fenomenul de concentrare a tensiunilor în regiunile de contact cu talpa, Fig. 5.2 și Fig. 5.3 (a). Rolul indectorului este de a simula efectul unui călcâi uman în timpul mersului [64].

Suportul constă dintr-o suprafață rigidă, având la bază un cilindru cu diametrul 100 mm și înălțimea de 10 mm, Fig. 5.2 și Fig. 5.3 (b). Suportul are rolul de a simula contactul cu solul din timpul mersului.

Modelul geometric al tălpii, prezentat în Fig. 5.1 (b), a fost importat în programul de analiză numerică. Ansamblul utilizat, prezentat în Fig. 5.2, a presupus poziționarea reciprocă a celor trei modele, astfel încât indectorul să intre în contact doar cu suprafața plană a tălpii iar suportul să acopere toată lățimea tălpii.

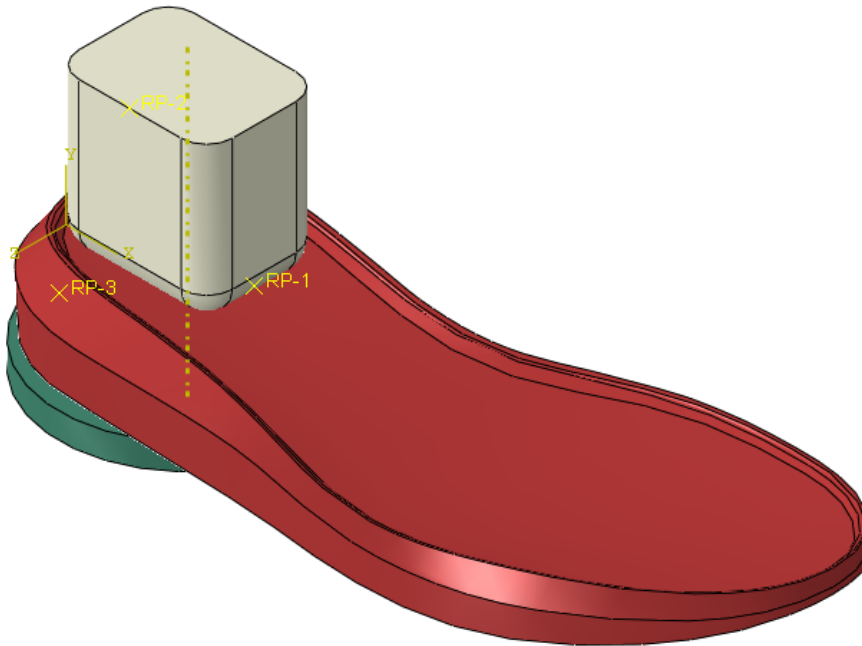


Fig. 5.2. Ansamblul utilizat în analiză

Modelul de material utilizat pentru talpă a fost prezentat în detaliu în Capitolul 3.2., și a constat dintr-o formulare matematică pentru spumele flexibile (*Hyperfoam*), un model de relaxare și un model pentru efectul Mullins.

Discretizarea indectorului, ilustrată în Fig. 5.3 (a), s-a efectuat cu 16100 elemente finite, iar cea a suportului s-a realizat cu 22310 elemente finite rigide dreptunghiulare de tip R3D4, cu o mărime medie de 1 mm, Fig. 5.3 (b). Ambele geometrii au utilizat o tehnică liberă de discretizare, folosind metoda axei mediane pentru partiționarea automată a fețele modelelor.

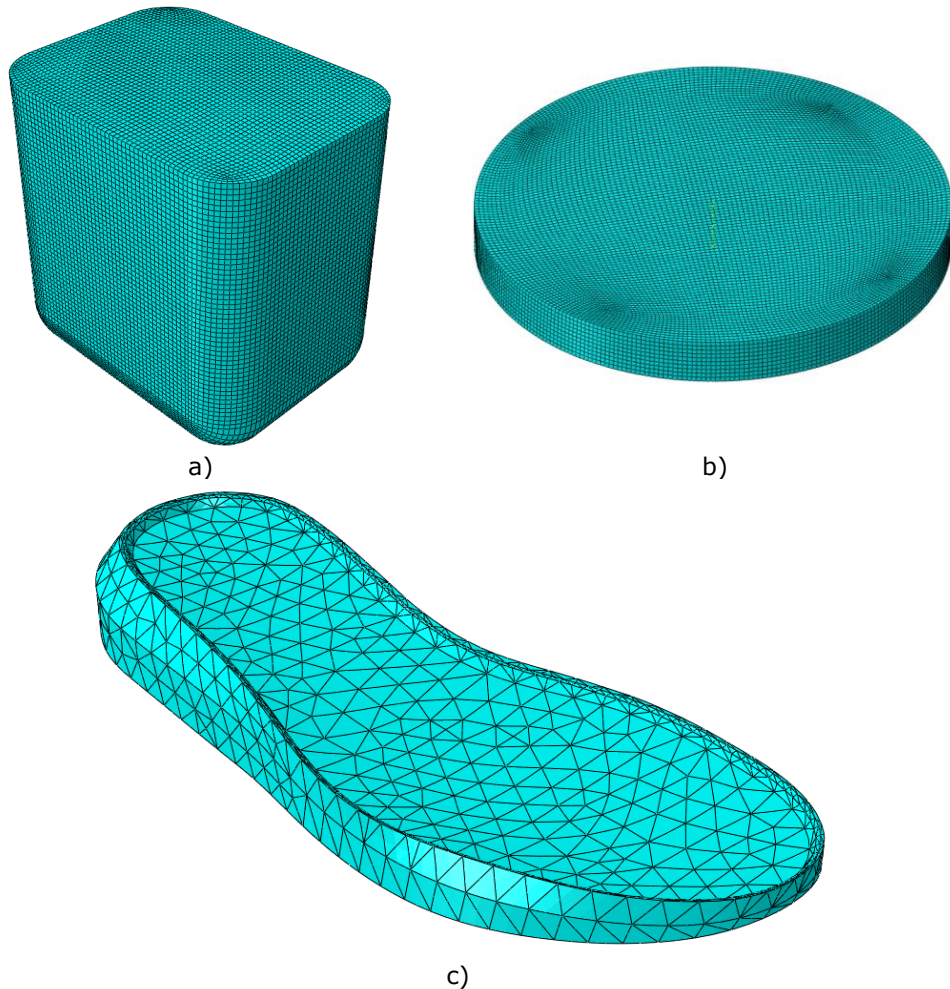


Fig. 5.3. Discretizarea indentorului (a), a suportului (b) și a tălpii mediane (c)

Modelul geometric al tălpii mediane a fost discretizat prin tehnica liberă, cu o mărime medie a elementelor finite de 10 (mm), rezultând 6278 elemente tetraedrice C3D10 de ordinul doi, Fig. 5.3 (c).

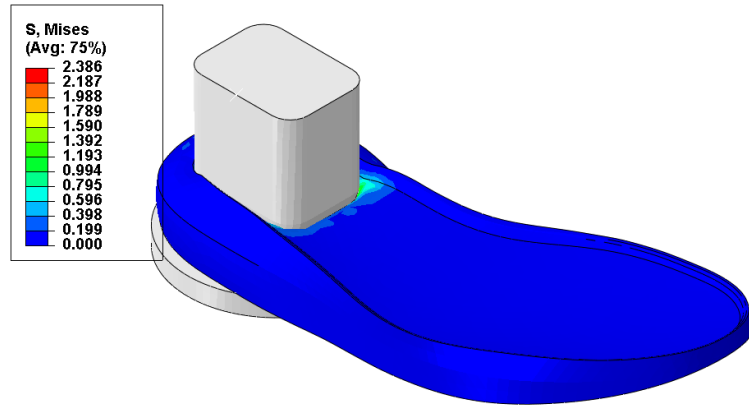
Pentru contactul dintre componentele ansamblului s-au utilizat o formulare normală de tip "contact tare" și o formulare tangențială, cu un coeficient de frecare de 0,2.

Condițiile pe contur s-au impus prin încastrarea indentorului și atribuirea unei deplasări pe axa y pentru placa rigidă după o amplitudine de tip triunghi, pentru a simula o solicitare de încărcare-descărcare. Condiția de inversare a sensului de deplasare a suportului a fost atingerea unei valori a reacțiunii de 1000 N.

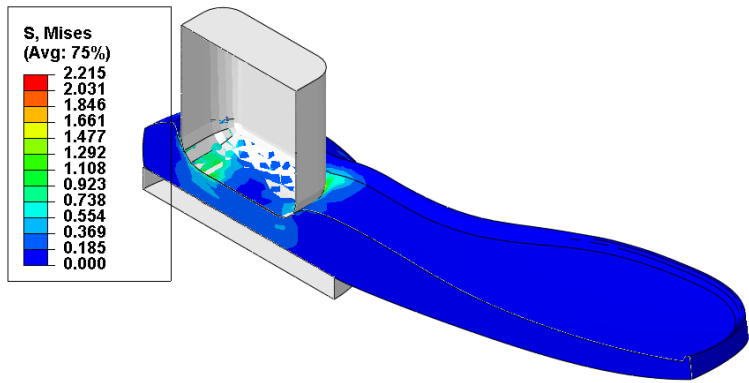
Analiza modelului a fost efectuată cu solver-ul Abaqus/Explicit, timpul virtual de analiză egal cu 20 (s), replicând astfel un test cvasi-static.

În figurile următoare sunt prezentate capturi cu talpa mediană deformată după 10 s, în momentul atingerii reacțiunii de 1000 N. În Fig. 5.4 este prezentată distribuția tensiunilor echivalente Von Mises în vedere izometrică, în Fig. 5.5 în vedere

laterală, iar în Fig. 5.6 în vedere din spate. Pentru toate vederile sunt ilustrate și secțiunile semnificative prin talpă.

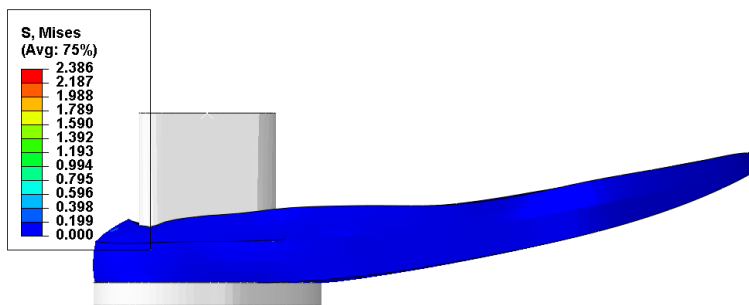


a)



b)

Fig. 5.4. Distribuția tensiunilor în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)



a)

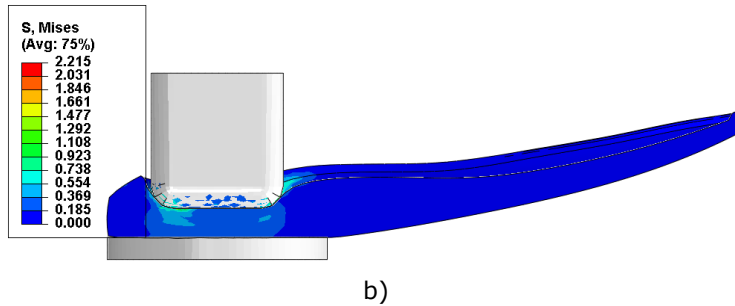


Fig. 5.5. Distribuția tensiunilor în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)

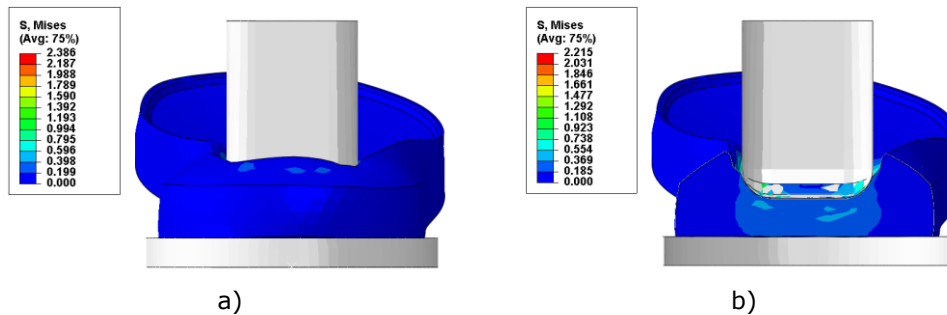


Fig. 5.6. Distribuția tensiunilor în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)

În Fig. 5.7 este prezentat graficul forță-deplasare determinat prin analiza numerică. Se poate observa caracterul neliniar și bucla de histerzis cauzată de efectele viscoelastice, pe de o parte, și de modelarea efectului Mullins, pe de altă parte. La o reacțiune egală cu 1000 N s-a înregistrat o deplasare de $14,6\text{ mm}$. Rezultatele sunt în concordanță cu cele raportate în literatura de specialitate [65].

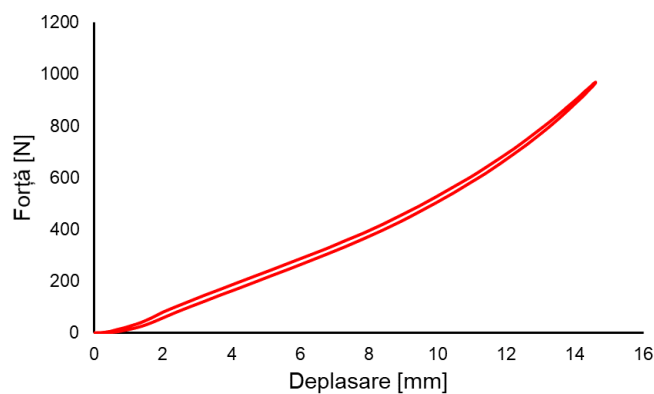


Fig. 5.7. Graficul forță-deplasare rezultat din analiza de referință

5.2. Talpa de încălțăminte generată pe structură Kelvin

5.2.1. Modelul geometric inițial

Densitatea materialului EVA utilizat în fabricarea tălpii convenționale este $\rho_{EVA} = 0,1895 \text{ g/cm}^3$, iar densitatea materialului TPU este $\rho_{TPU} = 0,9852 \text{ g/cm}^3$. Astfel, pentru ca tălpile concepute pe baza structurile de metamateriale fabricate din TPU să aibă aceeași masă ca talpa fabricată din EVA, acestea ar trebui să aibă densitatea relativă

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{EVA}}{\rho_{TPU}} = \frac{0,1895}{0,9852} = 0,1924 [-] \quad (5.1)$$

Pentru a determina valoarea raportului d/l corespunzătoare densității relative de 0,1924 pentru structura Kelvin, relația de variație a densității relative cu raportul d/l al structurii de tip Kelvin, relația (4.30), a fost soluționată utilizând metoda de liniarizare Newton-Raphson

$$-0,291 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0,74 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,0497 \frac{d}{l} - 0,00055 = 0,1924$$

$$\frac{d}{l} = 0,5332 \quad (5.2)$$

Analiza numerică efectuată pe modelul de referință a evidențiat faptul că zona de pingea a tălpii nu este solicitată și, în consecință, nu influențează rezultatele. Astfel, cu scopul de a reduce timpul de analiză, talpa formată din structuri de metamateriale a fost redusă la regiunea călcâiului. S-a generat o structură teselată alcătuită din $11 \times 3 \times 5$ celule (Fig. 5.8). Pentru a scala această structură la dimensiunile tălpilei reale, s-a ales o lungime a grinzilor $l = 5,1 \text{ mm}$, rezultând un diametru $d = 2,719 \text{ mm}$ și o rază de racordare $r = 1,14 \text{ mm}$.

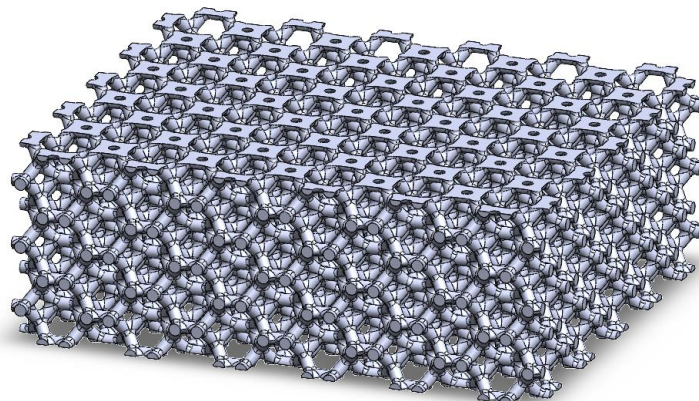
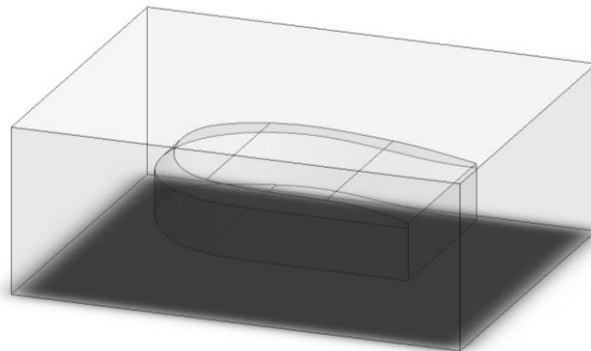
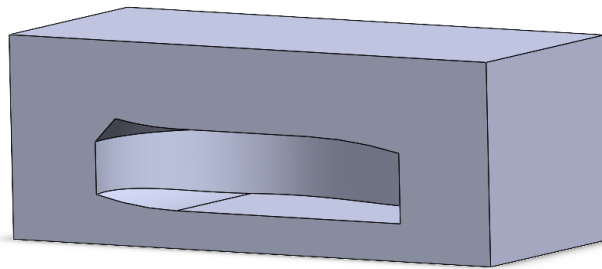


Fig. 5.8. Structura de tip Kelvin cu densitatea relativă de 0,1924

Pentru a obține o geometrie similară cu cea a modelului de referință, s-a generat o componentă reprezentând negativul zonei de călcâi (Fig. 5.9). Acest lucru s-a realizat prin decuparea modelului tălpii în scopul reducerii sale la zona de călcâi, generarea unei prisme care să înglobeze modelul și efectuarea unei operații booleene de eliminare a regiunii din prismă care intră în contact cu modelul călcâiului.



a)



b)

Fig. 5.9. Modelul geometric reprezentând negativul călcâiului

Modelul negativului a fost importat în modelul structurii Kelvin și a fost poziționat astfel încât suprafața plană inferioară a negativului să intre în contact cu suprafața inferioară a structurii (Fig. 5.10).

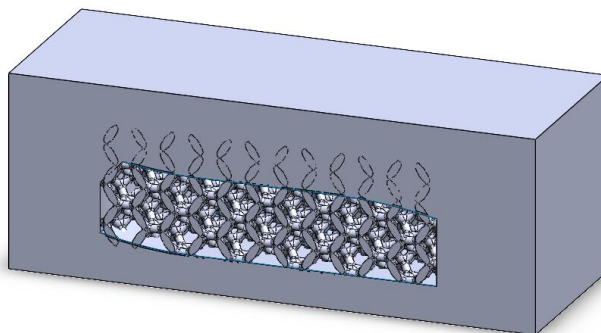


Fig. 5.10. Poziționarea relativă a negativului și a structurii Kelvin

Modelul tălpii a fost obținut prin realizarea unei operații booleene de eliminare a regiunilor din structură care intră în contact cu modelul negativului (Fig. 5.11).

Pentru ca, în timpul analizei, indenterul să aplice o distribuție uniformă a forței pe întreaga structură și pentru a evita o posibilă deplasare printre grinzile structurilor celulare, au fost definite două suprafețe, corespunzătoare regiunii superioare și inferioare a negativului (Fig. 5.10), care au fost ulterior transformate în solide prin atribuirea unei grosimi de $0,5\text{ mm}$ (Fig. 5.11).

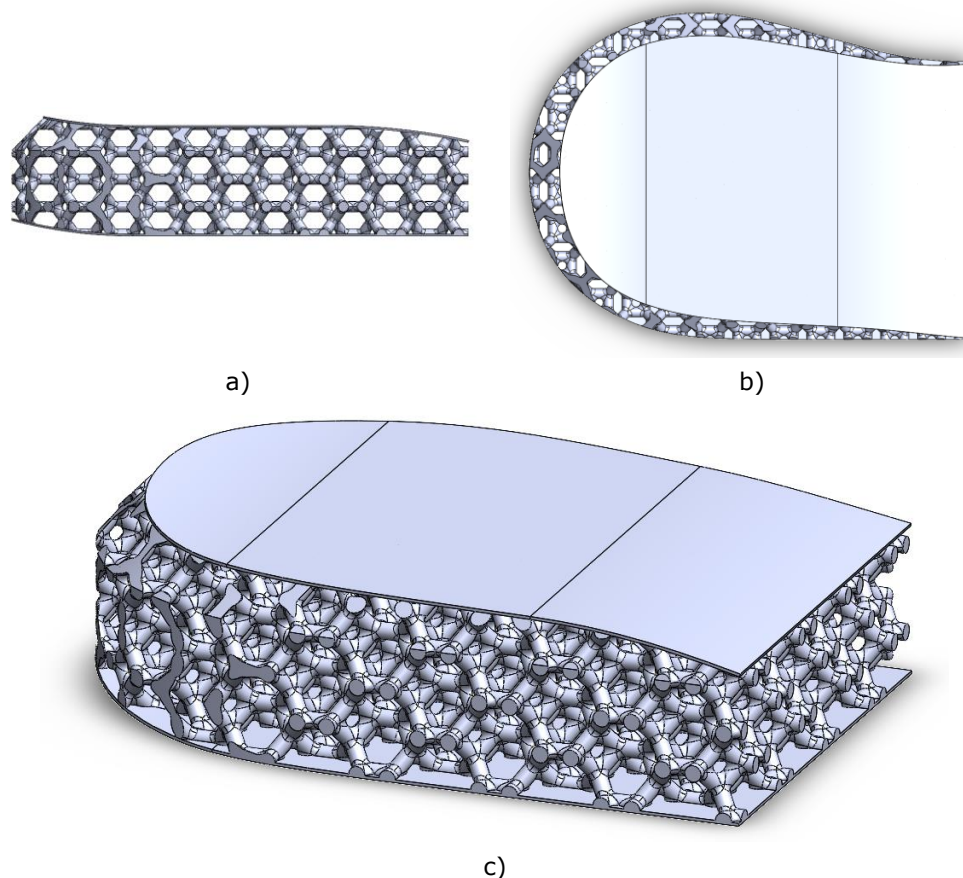


Fig. 5.11. Modelul tălpii proiectate din structuri Kelvin în vedere laterală (a), vedere de sus (b) și vedere izometrică (c)

5.2.2. Analiza numerică a modelului inițial

Analizele numerice efectuate pe modelele de tălpi generate din structuri de metamateriale au fost similare cu analiza efectuată pe talpa de referință (aceleași interacțiuni, condiții pe contur, discretizări ale componentelor rigide etc.), singurele diferențe fiind înlocuirea modelului tălpii și atribuirea unor proprietăți de material caracteristice elastomerului TPU, model descris în detaliu în Capitolul 3.3.

Discretizarea modelului tăpii bazat pe structura Kelvin a fost realizată prin tehnica liberă, utilizând elemente tetraedrice C3D10 de ordinul 2 cu mărimea medie de 3 mm. A rezultat un număr de 825200 elemente finite, rețeaua fiind ilustrată în Fig. 5.12.

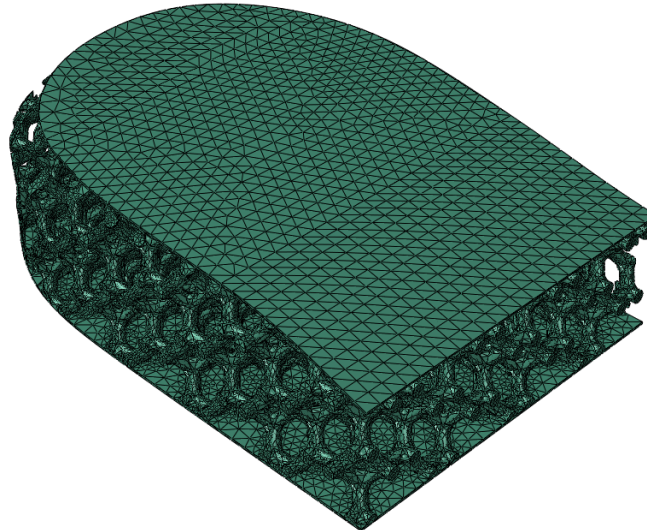
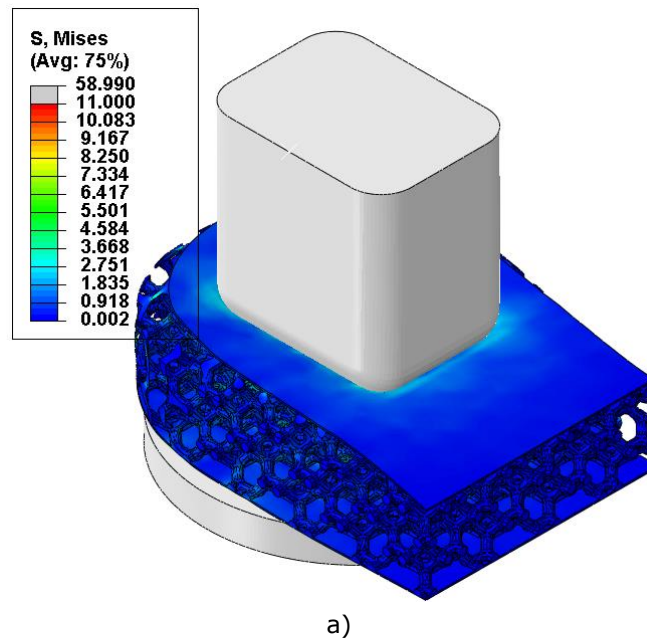
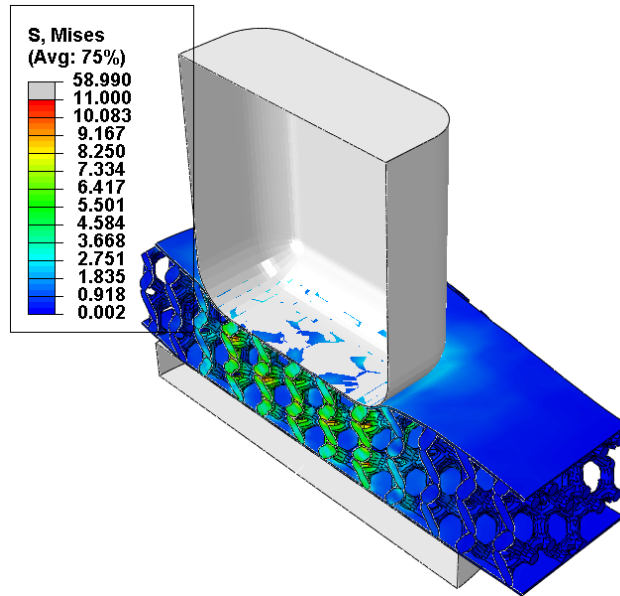


Fig. 5.12. Discretizarea modelului bazat pe structura Kelvin

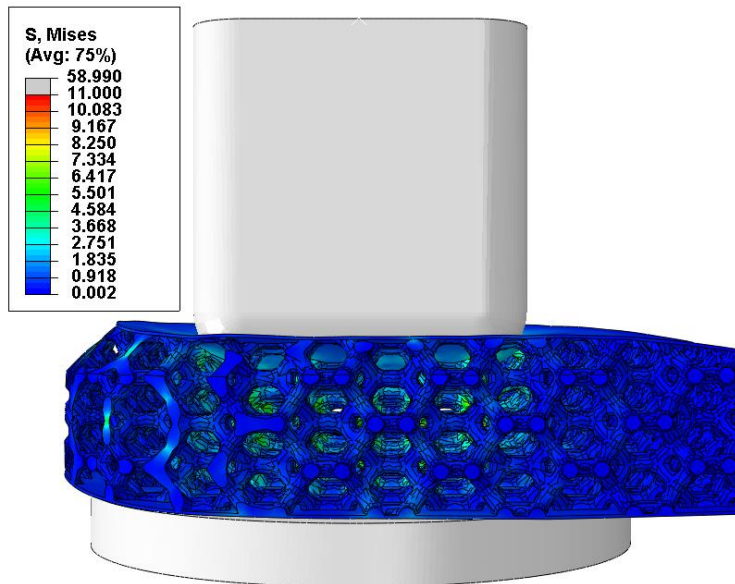
Deformata structurii Kelvin ca urmare a unei solicitări de compresiune cu forța de 1000 N este prezentată în vedere izometrică în Fig. 5.13, în vedere laterală în Fig. 5.14 și în vedere din spate în Fig. 5.15.



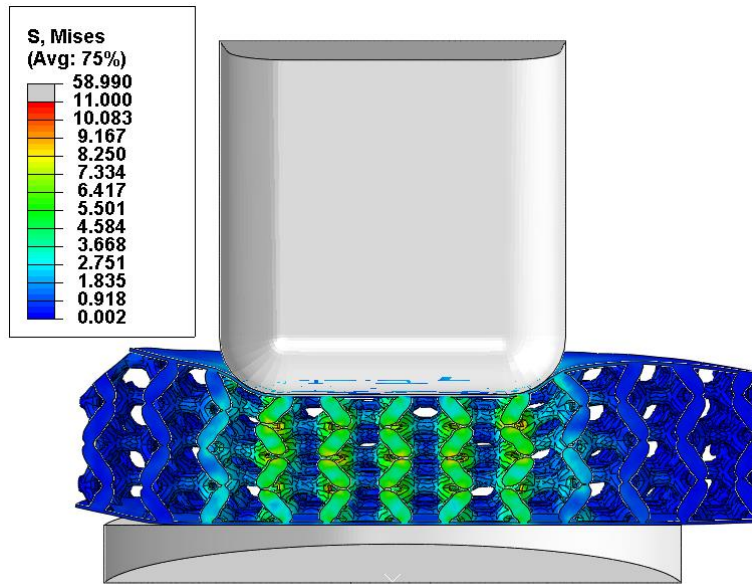


b)

Fig. 5.13. Distribuția tensiunilor în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)

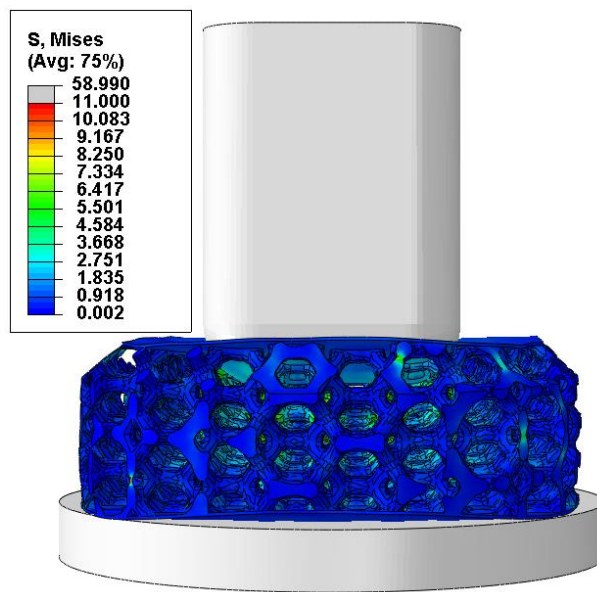


a)



b)

Fig. 5.14. Distribuția tensiunilor în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)



a)

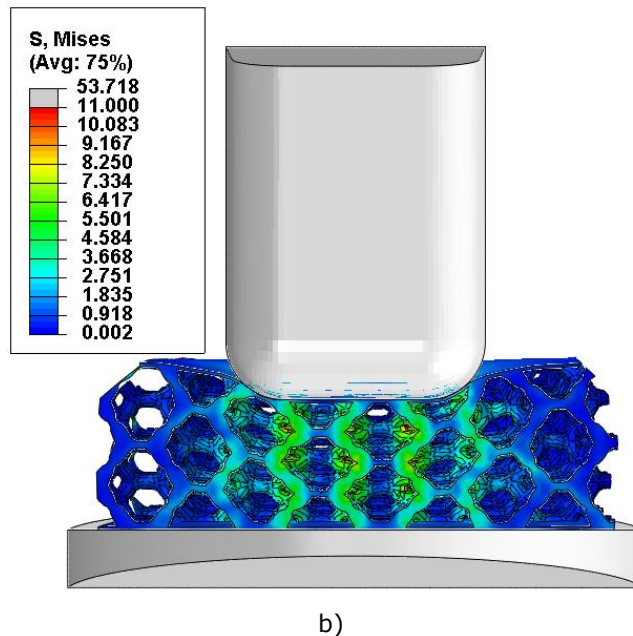


Fig. 5.15. Distribuția tensiunilor în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)

Din analiza deformatelor tălpii se observă că celulele din zona indenterului se deformează relativ uniform, fiind supuse în principal la încovoiere. Efectul de concentrare a tensiunii din zona de îmbinare a grinzilor determină o tensiune maximă de aproximativ 11 MPa , corespunzătoare unei deformații de aproximativ 80%. La solicitarea grinzilor tensiunea se situează în intervalul $2,5..5\text{ MPa}$. Totodată, se observă, în anumite regiuni, faptul că grinzile au intrat în contact reciproc, determinând la strivire tensiuni de aproximativ 8 MPa .

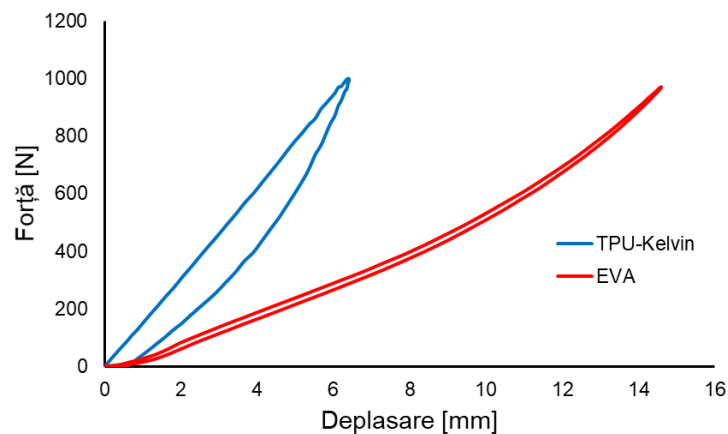


Fig. 5.16. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul bazat pe structura de tip Kelvin

Comparația dintre curbele forță-deplasare pentru modelul de referință (EVA), respectiv modelul bazat pe structura Kelvin, este prezentată în Fig. 5.16. Se observă că structura Kelvin a determinat o rigiditate ridicată, atingându-se reacțiunea de 1000 N la o deplasare a suportului de $6,4\text{ mm}$. Totodată, bucla de histerezis este mult mai pronunțată, revenirea completă a tălpii, momentul în care reacțiunea devine nulă la întoarcerea reazemului spre poziția inițială, realizându-se la o deplasare de $0,8\text{ mm}$.

5.2.3. Modelul actualizat

Cu scopul obținerii unor rezultate similare modelului de referință (o deplasare a indentorului de aproximativ $14,6\text{ mm}$ pentru o forță de 1000 N), s-a impus o diminuare a proprietăților elastice ale tălpii bazate pe structura Kelvin, fapt realizabil prin reducerea densității relative.

Datorită caracteristicii neliniare a curbei forță-deplasare, elasticitatea structurilor a fost evaluată prin determinarea pantei curbei forță-deplasare pentru două valori discrete ale deplasării, în speță 1 mm , respectiv 2 mm . Astfel panta dreptelor determinate de aceste două puncte este

$$m = \frac{F_2 - F_1}{d_2 - d_1}$$

$$\begin{aligned} m_{EVA} &= 57,068\text{ N/mm} \\ m_{TPU\ Kelvin} &= 151,996\text{ N/mm} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Astfel, se poate estima că modelul inițial al tălpii bazată pe structura Kelvin este mai rigid cu un factor $k = 3,063$.

$$k = \frac{m_{TPU\ Kelvin}}{m_{EVA}} \quad (5.4)$$

Diminuând valoarea forței obținute în urma analizei numerice pentru modelul bazat pe structura Kelvin cu factorul k , se observă că, pentru prima parte a deformației, comportamentul celor două modele este similar (Fig. 5.17).

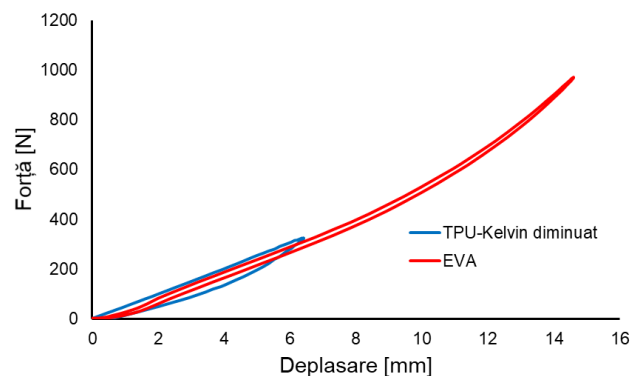


Fig. 5.17. Comparatie între rezultatele analizelor numerice pentru modelul de referință (spumă EVA) și modelul bazat pe structura Kelvin, diminuat cu factorul k

Considerând relația (4.31), pentru o densitate relativă de 0,1924, adică cea corespunzătoare modelului inițial, a rezultat o rigiditate relativă de 0,068. Diminuând această valoare cu factorul k , pentru a obține rezultate similare cu modelul de referință, rezultă că valoarea rigidității relative ar trebui să fie 0,0222. Astfel, cu scopul determinării raportului d/l corespunzător valorii rigidității relative stabilite, în prima fază s-a determinat densitatea relativă din ecuația (4.31) pentru valoarea impusă

$$0,7159 \cdot \rho_{rel}^{1,427} = 0,0222$$

$$\rho_{rel} = 0,0878 \quad (5.5)$$

În final, valoarea raportului d/l corespunzător rigidității relative de 0,0222 s-a determinat prin soluționarea ecuației (4.30)

$$-0,291 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0,74 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,0497 \frac{d}{l} - 0,00055 = 0,0878$$

$$\frac{d}{l} = 0,334 \quad (5.6)$$

Structura cu raportul $d/l = 0,334$ s-a generat prin modificarea în modelul geometric a parametrului corespunzător diametrului grinzilor, rezultând astfel diametrul $d = 1,7034 \text{ mm}$ și raza de racord $r = 1,6483 \text{ mm}$. Toate operațiile au fost efectuate automat de software, rezultând modelul prezentat în Fig. 5.18.

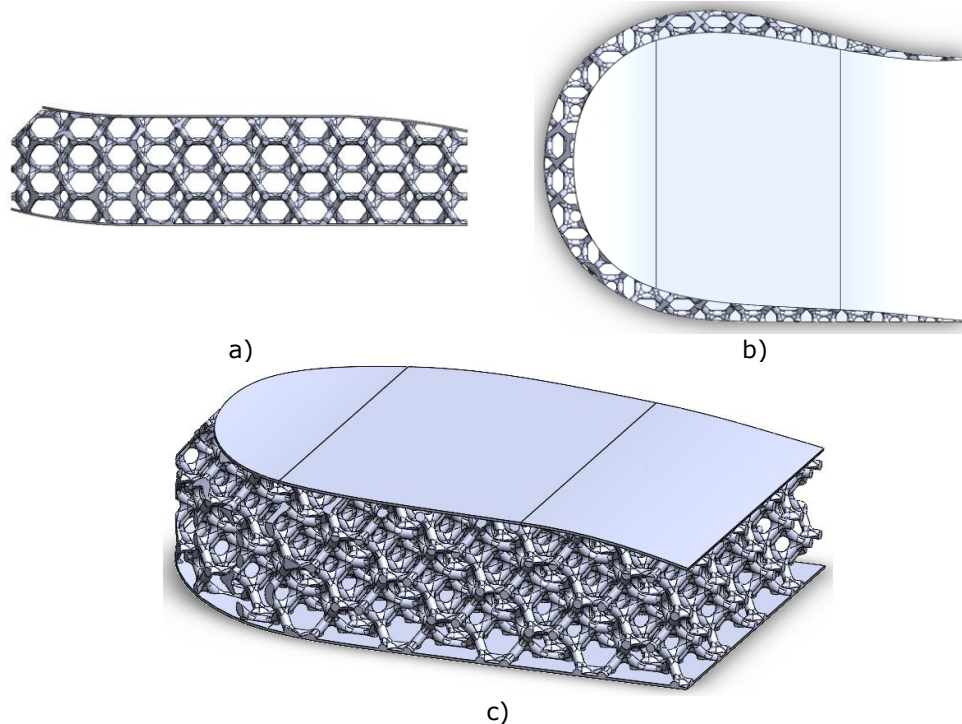


Fig. 5.18. Modelul actualizat al tălpii pe bază de structuri Kelvin în vedere laterală (a), în vedere de sus (b) și în vedere izometrică (c)

5.2.4. Analiza numerică a modelului actualizat

Discretizarea modelului actualizat al tălpiei bazat pe structura Kelvin a fost realizată prin tehnica liberă, utilizând elemente tetraedrice de tipul C3D10 de ordinul 2, cu mărimea medie de 3 mm. A rezultat un număr de 847971 elemente finite, Fig. 5.19.

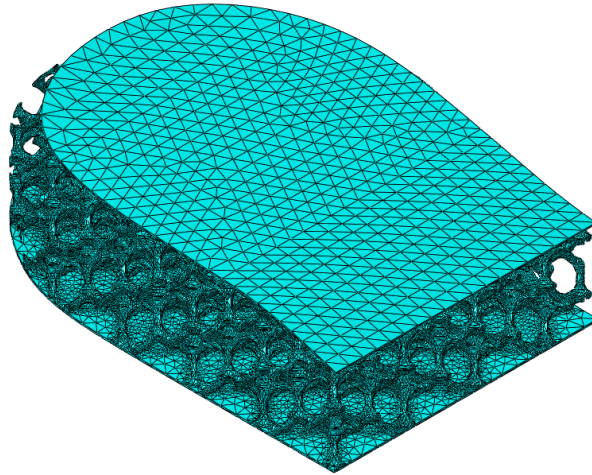
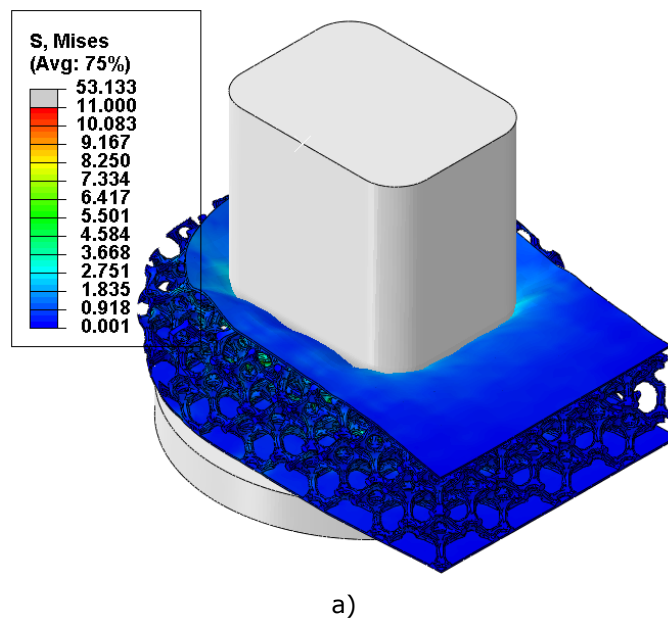
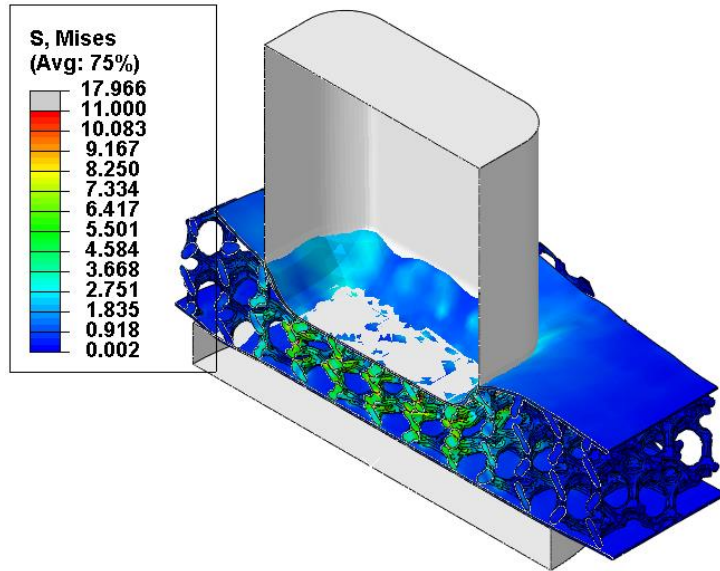


Fig. 5.19. Discretizarea modelului actualizat bazat pe structura Kelvin

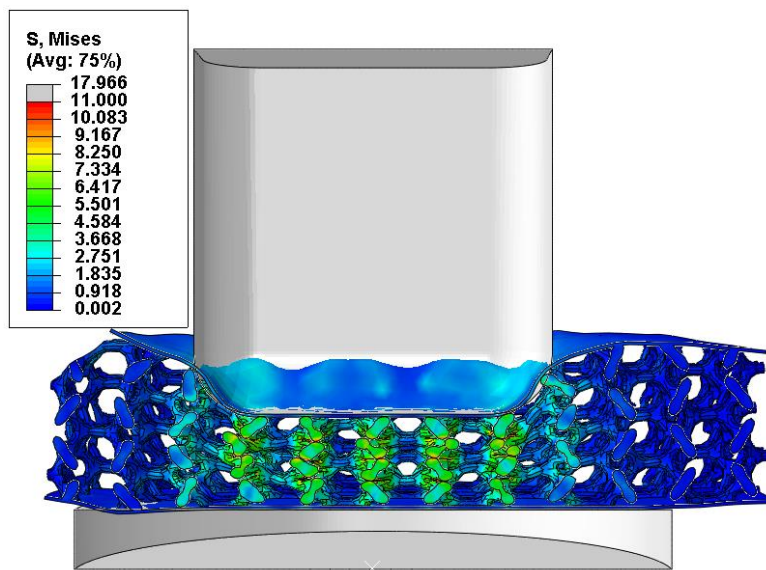
Evidențierea deformației structurii Kelvin, la aplicarea unei sollicitări de 1000 N este prezentată în vedere izometrică în Fig. 5.20, în vedere laterală în Fig. 5.21 și în vedere din spate în Fig. 5.22.



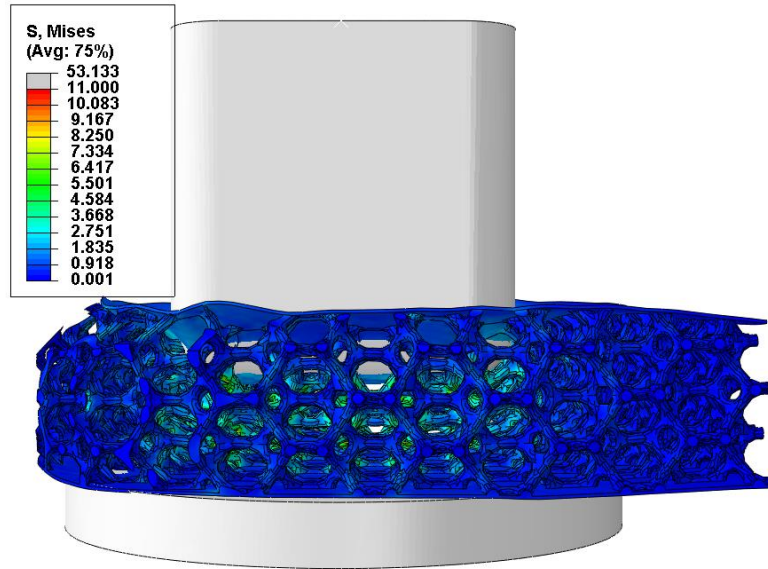


b)

Fig. 5.20. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)

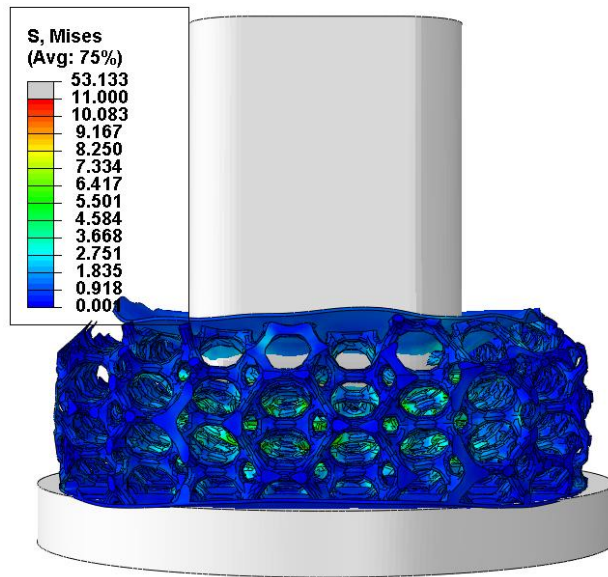


a)



b)

Fig. 5.21. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)



a)

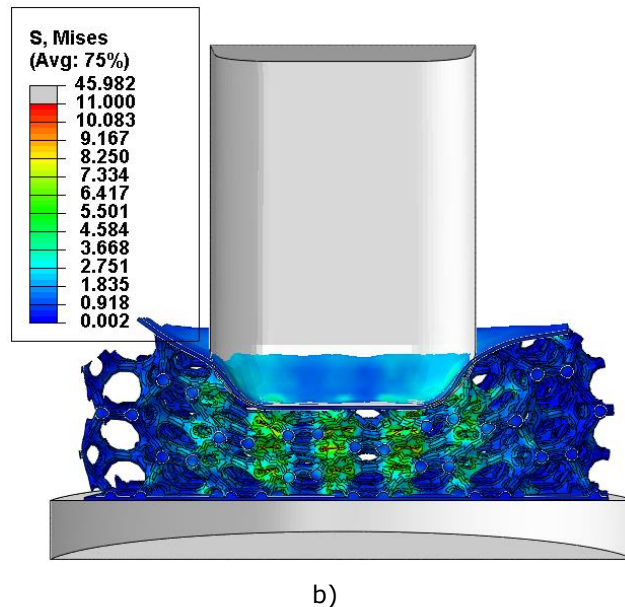


Fig. 5.22. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)

Și în acest caz, tensiunile maxime se situează în jurul valorii de 11 MPa , înregistrate atât în zona de racord, cât și în zona de contact dintre grinzi. Considerând forma curbei tensiune-deformație a materialului TPU, prezentă în Capitolul 2, se emite ipoteza că, datorită creșterii însemnate a rigidității materialului, sarcina este distribuită în regiuni ale celulelor unde deformația (și implicit rigiditatea) este mult mai redusă, din imagini observându-se solicitări semnificative ale grinzilor orientate normal la direcția de solicitare (grinzi aflate în planul xOy).

Comparația dintre curba forță-deplasare a modelului de referință (EVA) și cea a modelului actualizat bazat pe structura Kelvin este prezentată în Fig. 5.23.

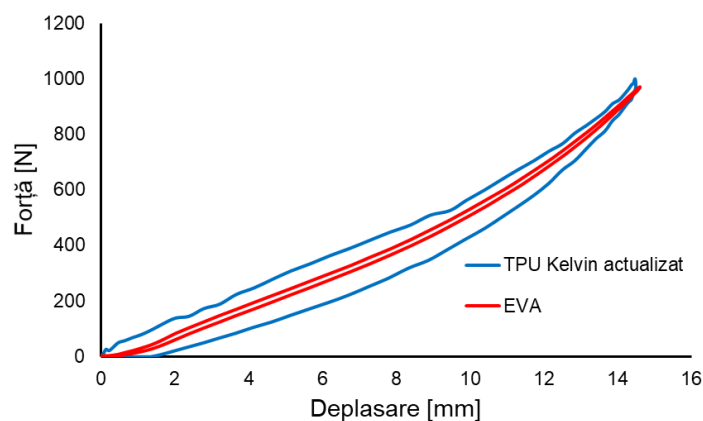


Fig. 5.23. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul actualizat bazat pe structura de tip Kelvin

Din Fig. 5.23 se observă că, deși în timpul încărcării curbele au o pantă similară, talpa pe bază de structură Kelvin determină reacțiuni mai mari pentru aceleași deformații, deoarece, la începutul deformației (până la aproximativ 1 mm), talpa fabricată din spumă EVA are o regiune de așezare.

Analizând forma curbei forță-deplasare pentru talpa bazată pe structura Kelvin, se poate considera că tensiunea maximă se atinge în jurul deplasării de 9 mm, unde se înregistrează o scurtă regiune de palier (posibil cauzată de o alunecare relativă a grinzilor aflate în contact). Totodată, talpa bazată pe structura Kelvin prezintă o buclă de histerezis mai pronunțată, efectele viscoelastice determinând revenirea elastică completă (la reacțiune nulă) la o deplasare de aproximativ 1,5 mm.

5.3. Talpa de încălțăminte generată din structura tip Kagome

5.3.1. Modelul geometric

Structura de tip Kagome prezintă două variații ale densității relative cu raportul d/l , datorită modificării variației razei de racord cu același parametru.

Pentru determinarea valorii raportului d/l corespunzătoare densității relative de 0,1924 trebuie analizată Fig. 4.23. Astfel, datorită faptului că densitatea relativă este mai mare decât valoarea de tranziție, egală cu aproximativ 0,13, se va soluționa ecuația (4.25)

$$-0,321 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0,656 \left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0,343 \frac{d}{l} + 0,0284 = 0,1924$$

$$\frac{d}{l} = 0,3165 \quad (5.7)$$

Pentru a genera modelul tălpii bazate pe structura Kagome, s-a construit o structură teselată alcătuită din $9 \times 2 \times 7$ celule (Fig. 5.24). Pentru a scala această structură la dimensiunile tălpii reale, s-a ales o lungime a grinzilor $l = 6,7 \text{ mm}$, rezultând un diametru $d = 2,6166 \text{ mm}$ și o rază de racordare $r = 0,408 \text{ mm}$.

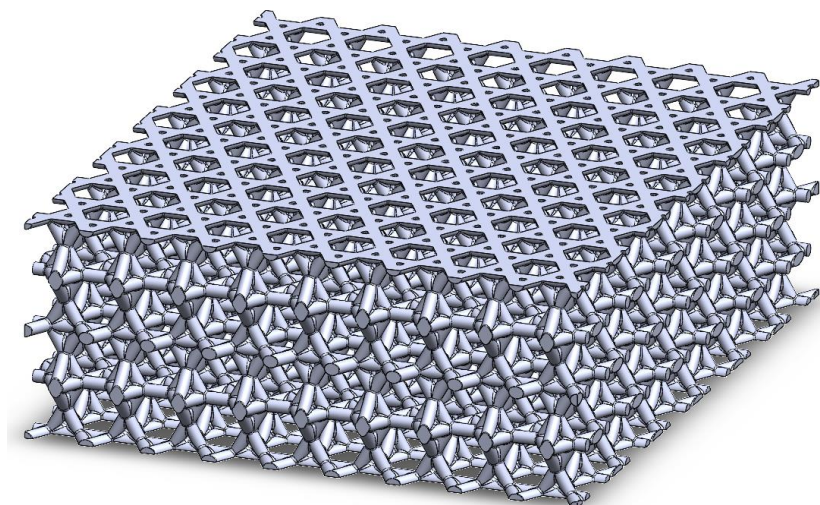


Fig. 5.24. Structura de tip Kagome cu densitate relativă de 0,1924

Geometria finală a tălpii bazate pe structura Kagome s-a obținut în mod similar modelului bazat pe structura Kelvin. Astfel, modelul negativului a fost importat în modelul structurii Kagome și a fost poziționat astfel încât suprafața plană inferioară a negativului să intre în contact cu suprafața inferioară a structurii (Fig. 5.25). Modelul tălpii a fost obținut prin realizarea unei operații booleene de eliminare a regiunilor din structură care intră în contact cu modelul negativului (Fig. 5.26). Analog modelului bazat pe structura Kelvin, talpa bazată pe structura Kagome a fost prevăzută cu două

fețe de $0,5\text{ mm}$ grosime pentru a se realiza o distribuție uniformă a forței în timpul solicitării.

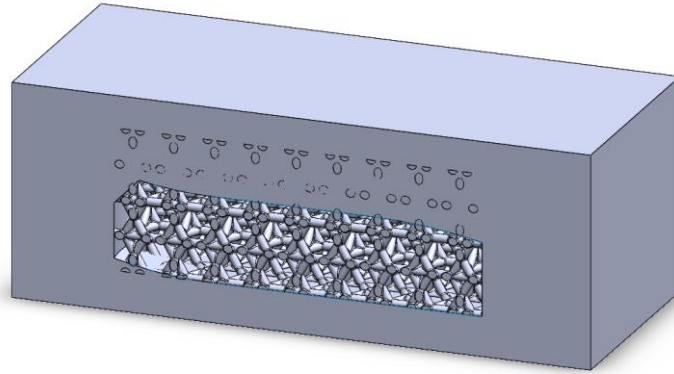


Fig. 5.25. Poziționarea relativă a negativului și a structurii Kagome

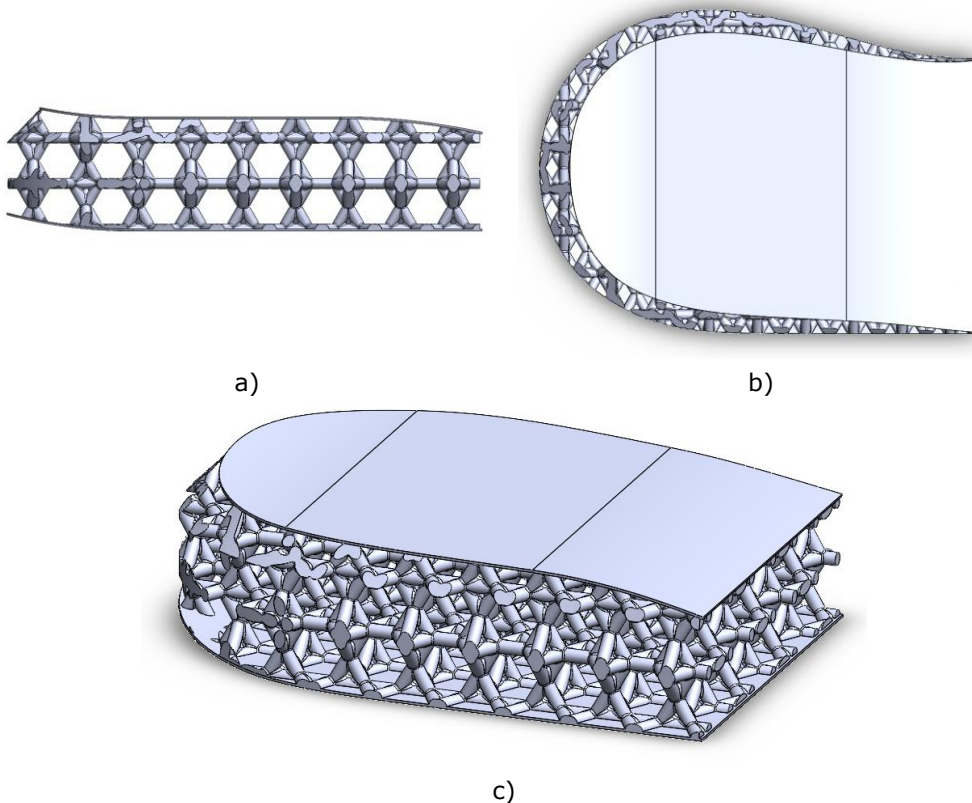


Fig. 5.26. Modelul tălpii pe bază de structuri Kagome în vedere laterală (a), în vedere de sus (b) și în vedere izometrică (c)

5.3.2. Analiza numerică a modelului inițial

Discretizarea modelului tălpii bazat pe structura Kagome a fost efectuată prin tehnica liberă, utilizând elemente tetraedrice C3D10 de ordinul 2 cu mărimea medie de 3 mm, rezultând un număr de 1140813 elemente finite (Fig. 5.27).

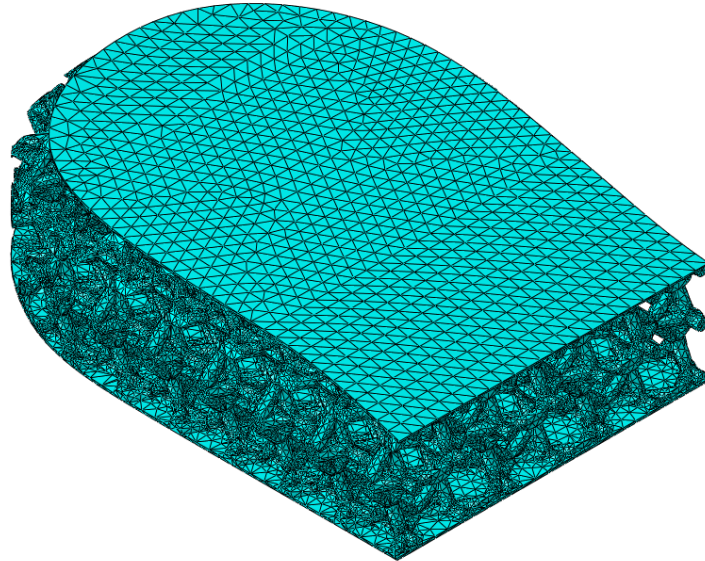
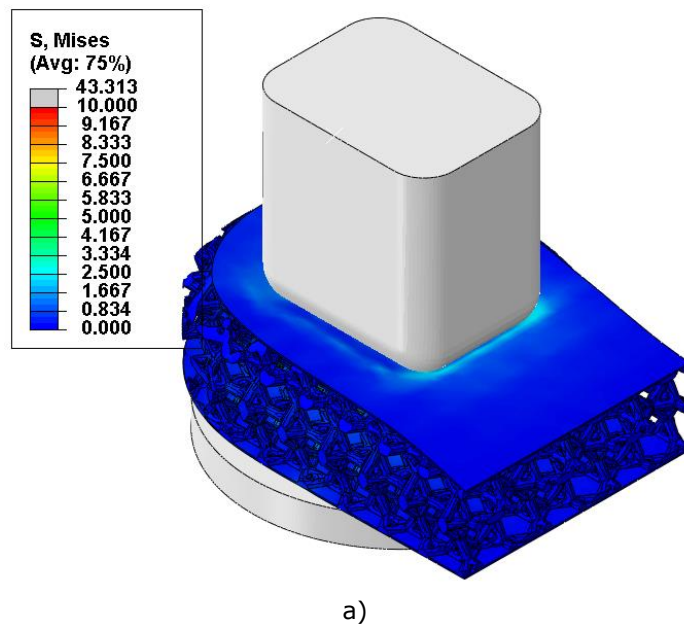
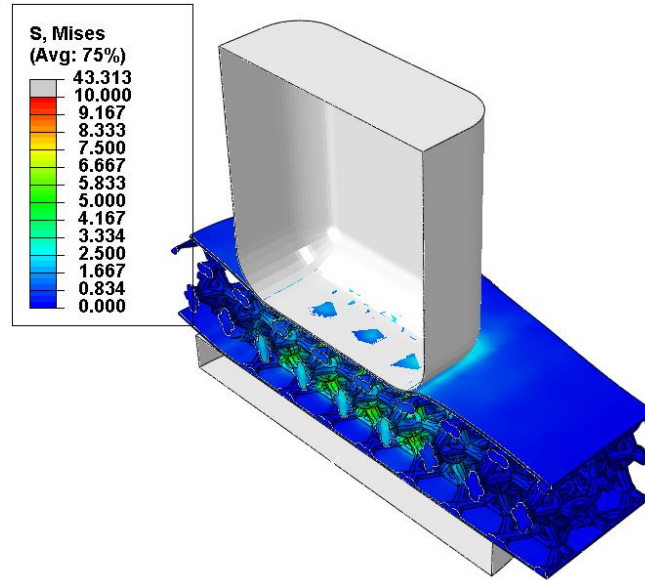


Fig. 5.27. Discretizarea modelului bazat pe structura Kagome



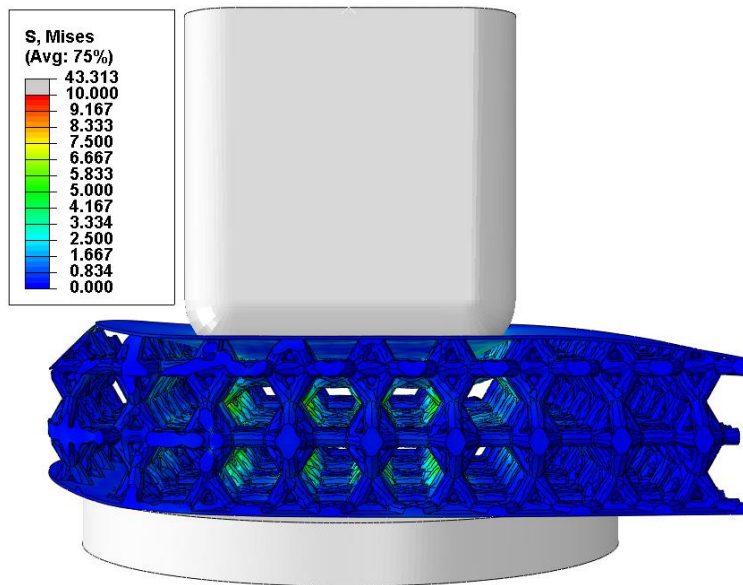
a)



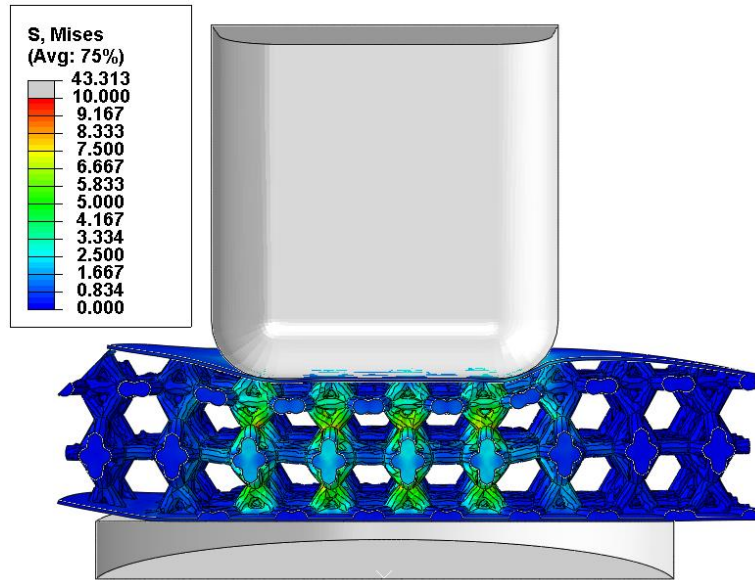
b)

Fig. 5.28. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)

Distribuția tensiunii echivalente von Mises pe modelul deformat al structurii Kagome pentru o solicitare de compresiune de 1000 N este prezentată în vedere izometrică în Fig. 5.28, în vedere laterală în Fig. 5.29 și în vedere din spate, Fig. 5.30.

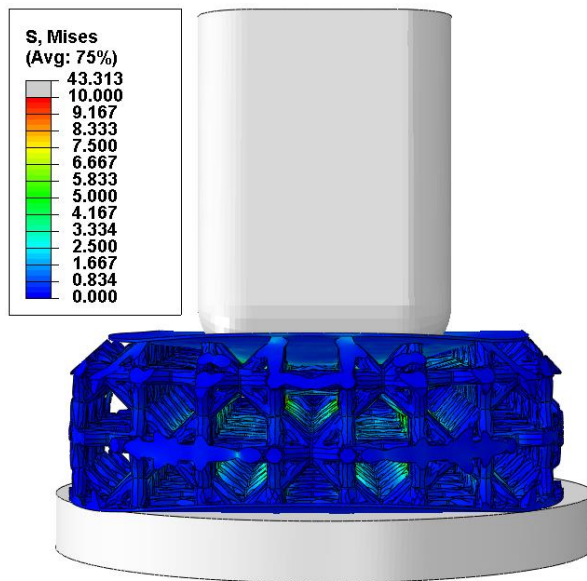


a)



b)

Fig. 5.29. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)



a)

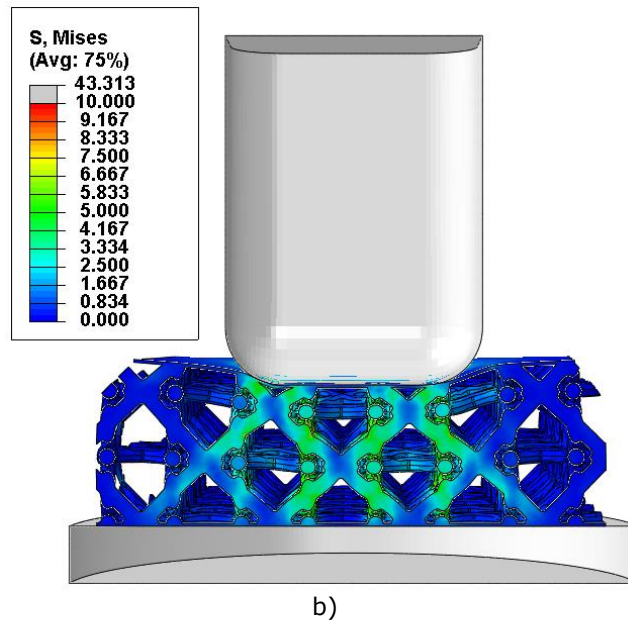


Fig. 5.30. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)

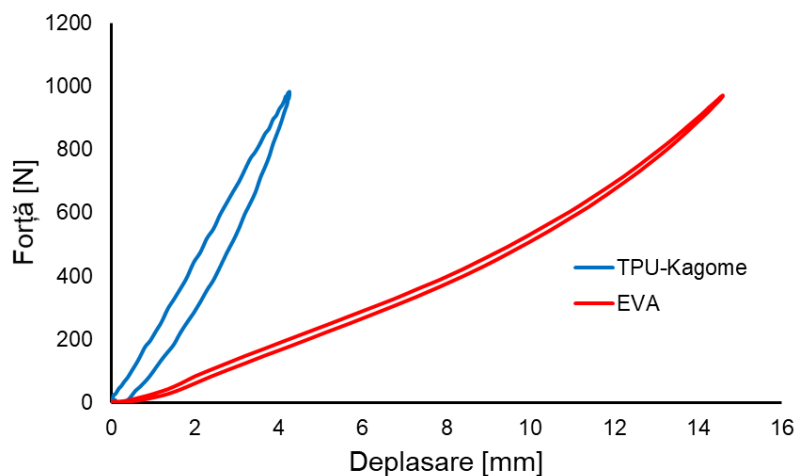


Fig. 5.31. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul bazat pe structura de tip Kagome

În mod similar tălpii bazate pe structura Kelvin, celulele tălpii bazate pe structura Kagome plasate în dreptul indenterului prezintă o deformare relativ uniformă. Deși din punct de vedere teoretic, structura de tip Kagome este predominant solicitată axial, datorită faptului că indenterul nu acționează normal asupra celulelor, grinzile sunt solicitate la încovoiere. Tensiunile din grinzi variază între 1 MPa și 5 MPa , determinând valori mai mici prin comparație cu structurile de tip Kelvin. Acest lucru se datorează, pe de o parte, particularității geometrice a structurii

Kagome, și faptului că această structură determină un raport d/l mai mare pentru aceeași densitate relativă, pe de altă parte.

Curbele forță-deplasare obținute din analizele numerice, pentru modelul de referință și pentru talpa generată din structura Kagome, sunt prezentate în Fig. 5.31.

Structura Kagome determină o rigiditate mai mare prin comparație cu structura Kelvin, atingându-se o deplasare a suportului de $4,23\text{ mm}$ la forța aplicată de 1000 N , curbele de histerezis fiind de asemenea mai redusă.

5.3.3. Modelul actualizat

Cu scopul obținerii unor rezultate similare modelului de referință, după procedeul aplicat structurii Kelvin, s-a impus o diminuare a proprietăților elastice ale tălpii bazate pe structura Kagome, prin reducerea densității relative.

Elasticitatea structurii Kagome a fost evaluată în mod similar, rezultând o pantă a dreptei

$$m_{TPU\text{ Kagome}} = 196,821\text{ N/mm} \quad (5.8)$$

Astfel, se poate estima că modelul inițial al tălpii generată din structura Kagome este mai rigid cu un factor $k = 4,797$.

Diminuând valorile forței obținute din analiza numerică pentru modelul inițial cu factorul k , se observă un comportament similar al celor două modele, pentru prima parte a deformației (Fig. 5.32).

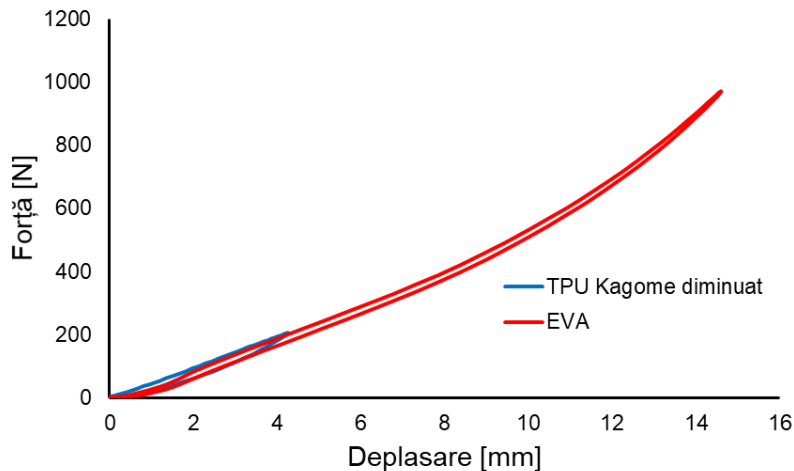


Fig. 5.32. Comparatie între rezultatele analizelor pentru modelul de referință (spumă EVA) și modelul bazat pe structura Kagome, diminuat cu factorul k

Considerând relația (4.26) (variația rigidității relative cu densitatea relativă pentru structura Kagome), pentru o densitate relativă de $0,1924$, corespunzătoare modelului inițial, a rezultat o rigiditate relativă de $0,1087$. Diminuând această valoare cu factorul k , pentru a obține rezultate similare cu modelul de referință, rezultă că valoarea rigidității relative ar trebui să fie egală cu $0,0226$ (valoare apropiată de cea obținută pentru structura Kelvin). Astfel, în scopul determinării raportului d/l

corespunzător valorii rigidității relative stabilite, în primă fază s-a determinat densitatea relativă, soluționând ecuația (4.26) pentru valoarea impusă

$$0,684 \cdot \rho_{rel}^{1,299} = 0,0226$$

$$\rho_{rel} = 0,0773 \quad (5.9)$$

Densitatea relativă impusă este sub valoarea de tranziție (evidențiată în Fig. 4.23), astfel că, în determinarea raportului d/l corespunzător rigidității relative de 0,0226, s-a soluționat ecuația (4.24)

$$-0,744 \left(\frac{d}{l}\right)^3 + 1,631 \left(\frac{d}{l}\right)^2 - 0,0026 \frac{d}{l} = 0,1087$$

$$\frac{d}{l} = 0,232 \quad (5.10)$$

Structura cu $d/l = 0,232$ s-a generat prin modificarea parametrului corespunzător diametrului grinzilor din modelul geometric, rezultând o valoare a diametrului $d = 1,554 \text{ mm}$ și a razei de racord $r = 0,648 \text{ mm}$ (Fig. 5.33).

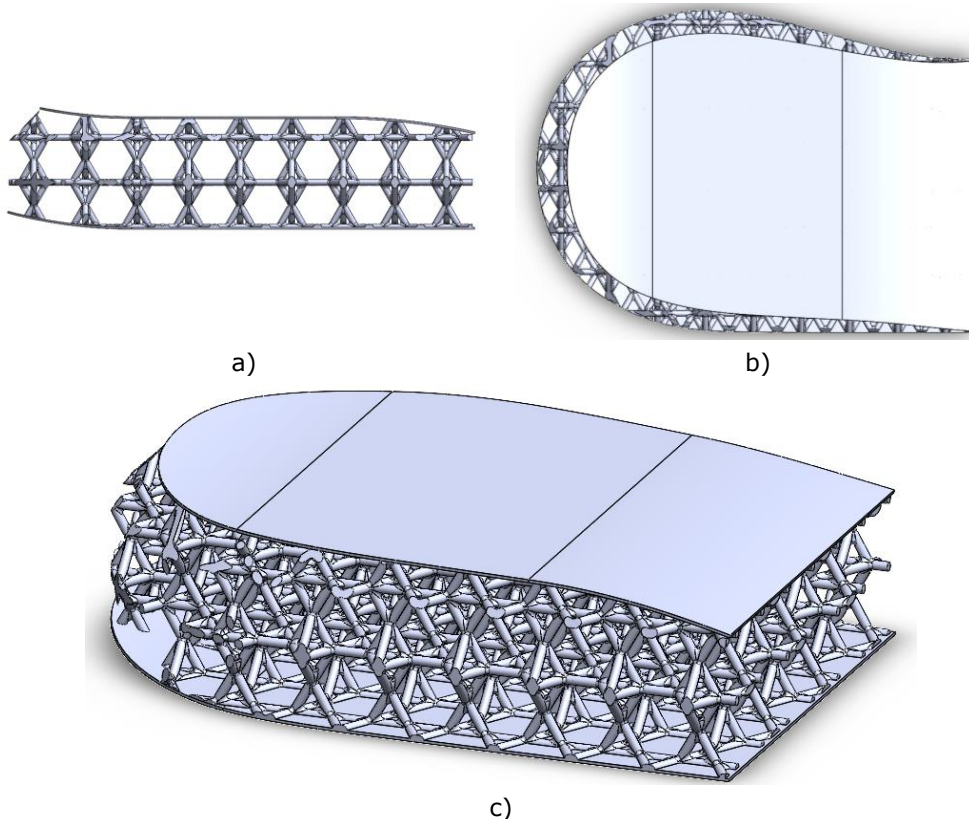


Fig. 5.33. Modelul actualizat al tăpii pe bază de structuri Kagome în vedere laterală (a), în vedere de sus (b) și în vedere izometrică (c)

5.3.4. Analiza numerică a modelului actualizat

Discretizarea modelului actualizat al tălpii generată din structura Kagome a fost efectuată prin tehnica liberă, utilizând elemente tetraedrice C3D10 de ordinul 2, cu mărimea medie de 2,5 mm. A rezultat un număr de 1380986 elemente finite Fig. 5.34.

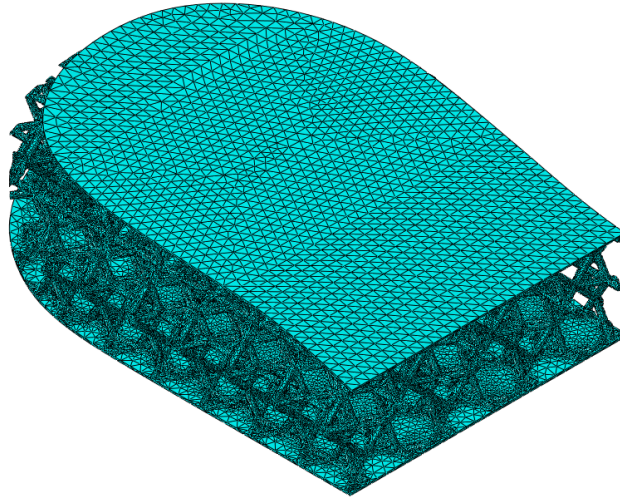
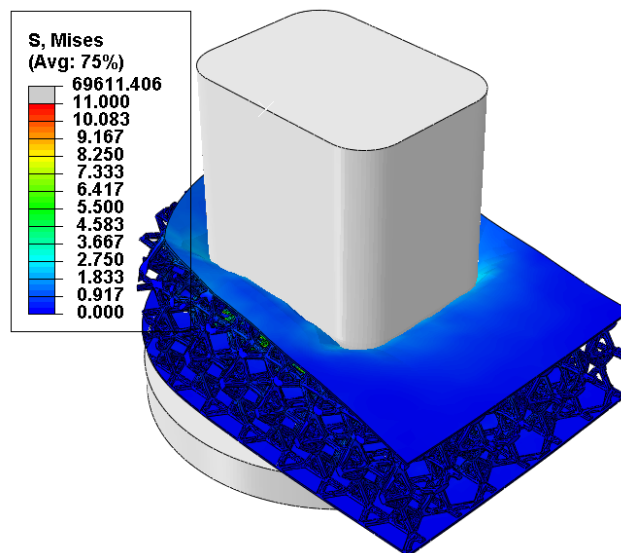
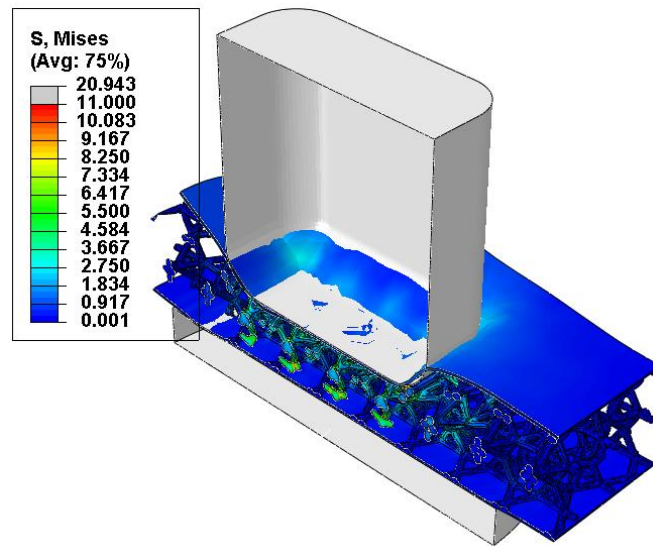


Fig. 5.34. Discretizarea modelului actualizat bazat pe structura Kagome

Evidențierea deformatelor structurii Kagome la aplicarea unei solicitări de compresiune de 1000 N este prezentată în vedere izometrică în Fig. 5.35, în vedere laterală în Fig. 5.36 și în vedere din spate în Fig. 5.37.

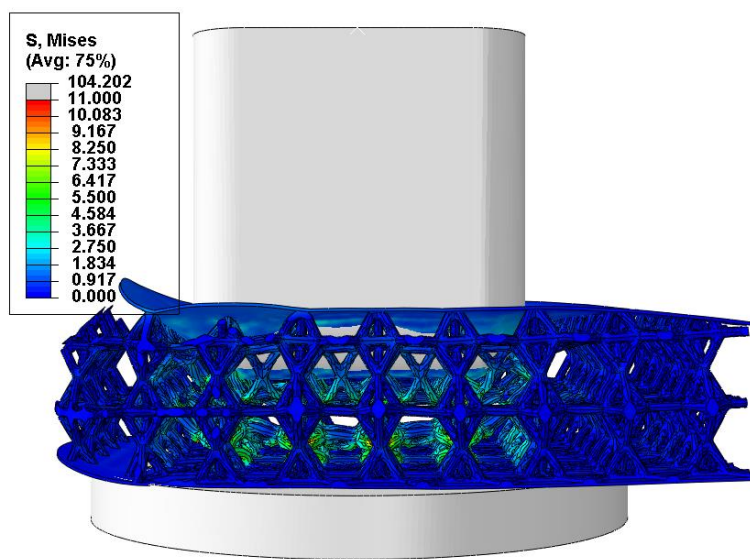


a)



b)

Fig. 5.35. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere izometrică pe întregul model (a) și în secțiune (b)



a)

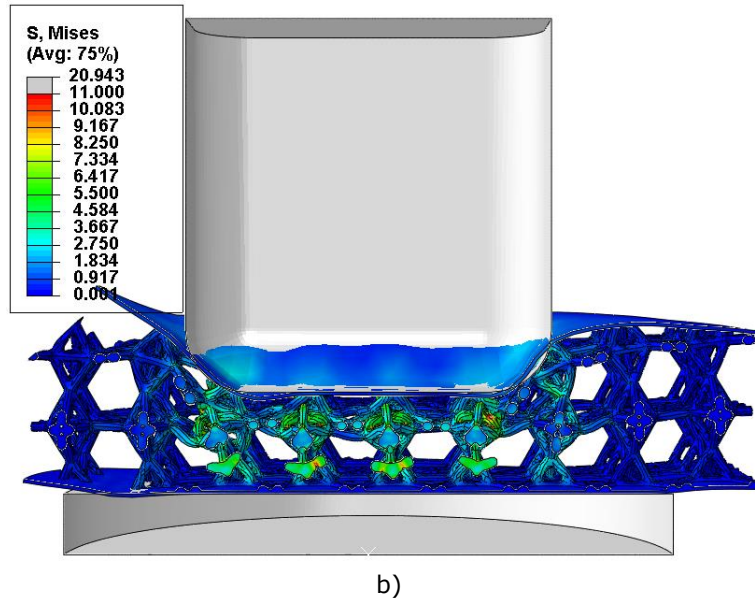
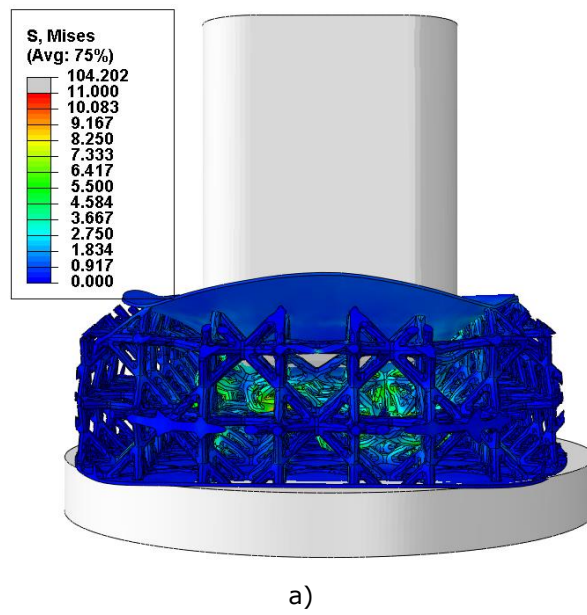
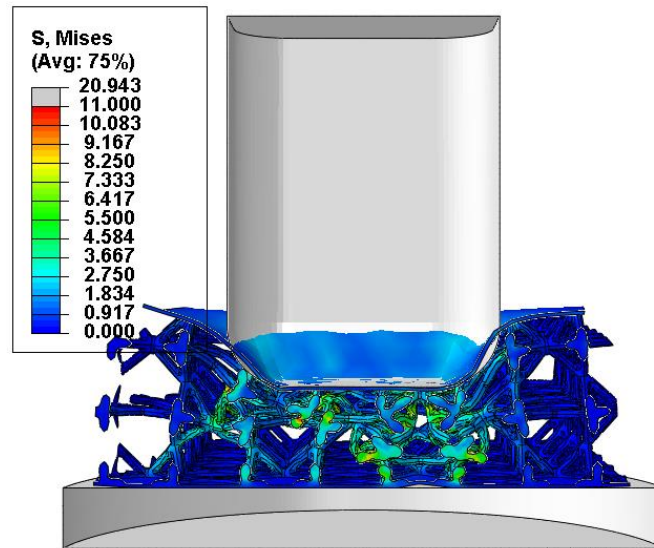


Fig. 5.36. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere laterală pe întregul model (a) și în secțiune (b)





b)

Fig. 5.37. Distribuția tensiunilor echivalente von Mises în vedere din spate pe întregul model (a) și în secțiune (b)

Solicitarea la compresiune prin aplicarea unei forțe egală cu 1000 N a modelului actualizat a determinat o deformare neuniformă a structurii, observându-se că majoritatea celulelor situate în dreptul indenterului au colabat. Această cedare se datorează flambării grinzilor, ca urmare a valorii reduse a raportului d/l .

În mod similar tălpilor bazate pe structura Kelvin, valoarea maximă a tensiunii înregistrate se situează în jurul valorii de 11 MPa , regiunile cel mai intens solicitate fiind cele din zona de îmbinare a grinzilor și zonele de contact între grinzile celulelor colabate.

În Fig. 5.38 se prezintă comparația dintre curba forță-deplasare a modelului de referință (EVA) și cea a modelului actualizat generat din structura Kagome. Comportamentul acestui model de talpă prezintă anumite asemănări cu modelul actualizat al tăpii bazate pe structura Kelvin.

Deși în primii milimetri de deplasare, panta curbei determinate de modelul de referință și cea a modelului bazat pe structura Kagome sunt asemănătoare, cea din urmă determină reacțiuni mai mari pentru aceeași valoare a deplasării. Observația este explicată de regiunea de așezare a modelului de referință.

O altă asemănare constă în apariția unei regiuni de palier, în cazul tăpii bazată pe structura Kagome, care debutează în jurul valorii de 4 mm . Spre deosebire de modelul bazat pe structura Kelvin, palierul sesizat în cazul modelului bazat pe structura Kagome este mult mai pronunțat, determinând valori relativ constante ale reacțiunii pentru o deplasare de aproximativ 4 mm . Comportamentul este datorat flambajului grinzilor.

Ultima regiune a curbei forță-deplasare determină o creștere progresivă a rigidității structurii, explicată de intrarea în contact a grinzilor, nivel ce poate fi considerat drept debutul regiunii de densificare a structurii celulare.

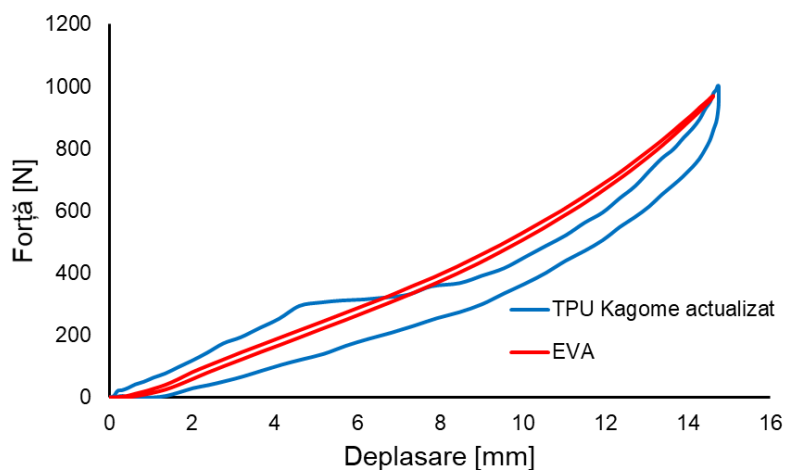


Fig. 5.38. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul de referință (EVA) și modelul actualizat bazat pe structura de tip Kagome

Comparația dintre curbele forță-deplasare determinate pentru modelul de talpă bazat pe structura Kelvin și modelul generat pe structura Kagome este prezentată în Fig. 5.39.

Se observă că regiunea inițială a curbelor prezintă o pantă asemănătoare. Acest fapt era așteptat, deoarece, în dezvoltarea modelelor actualizate, s-a avut ca obiectiv atingerea aceleiași valori a rigidității relative pentru cele două structuri.

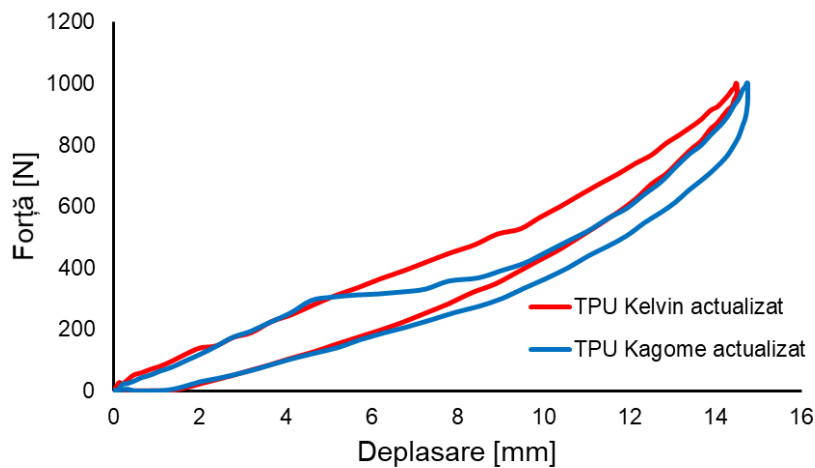


Fig. 5.39. Comparație între variația forței cu deplasarea pentru modelul actualizat bazat pe structura de tip Kelvin și modelul actualizat generat pe structura Kagome

Deși ambele tipuri de structuri au prezentat o regiune de palier, cea caracteristică modelului bazat pe structura de tip Kelvin este mult mai redusă decât regiunea de palier determinată de structura de tip Kagome. În plus, prima apare la deplasări mai mari, 8,5 mm față de 4 mm. Modelul bazat pe structura de tip Kagome a

determinat și deplasări mai mari la atingerea forței de 1000 N , în speță $14,75\text{ mm}$ față de $14,47\text{ mm}$ înregistrați în cazul structurii de tip Kelvin.

Efectele viscoelastice sunt asemănătoare pentru cele două tipuri de structuri, curbele de histerezis prezentând forme similare. Revenirea completă a ambelor structuri, corespunzătoare valorii nule a reacțiunii la retragere, se înregistrează la atingerea unei deplasări de $1,5\text{ mm}$.

Se poate concluziona că, deși posedă o masă mai mare, structura de tip Kelvin determină rezultate mai bune decât structura de tip Kagome, datorită uniformității răspunsului la solicitarea de compresiune. Astfel, în timpul utilizării, comportamentul tălpii generată pe structura Kelvin este mult mai previzibil prin comparație cu cel al tălpii bazată pe structura Kagome. Pentru aceasta din urmă modificarea bruscă a rigidității ar putea cauza un disconfort sportivului.

6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1. Concluzii

Obiectivul principal al tezei de doctorat l-a reprezentat dezvoltarea de echipamente sportive pe bază de structuri de metamateriale, urmând ca acestea să fie fabricate prin diverse procedee de prototipare rapidă. Metoda propusă are ca rezultat reducerea masei produselor finale, în condițiile păstrării proprietăților mecanice, și oferă posibilități mari de personalizare a caracteristicilor echipamentelor sportive.

În acest sens, au fost analizate patru tipuri de structuri, și anume, structura cubică diamantată, structura de grinzi octet, structura Kagome, respectiv structura Kelvin. A fost investigată variația proprietăților mecanice (rigiditatea relativă, respectiv rezistența mecanică relativă) cu densitatea relativă. Ca rezultat al acestei etape, au fost selectate două tipuri de structuri, în speță structura de tip Kagome și structura de tip Kelvin, în scopul implementării lor fabricarea echipamentelor sportive.

În următoarea etapă, pentru a efectua comparația între proprietățile noilor produse și ale celor existente pe piață, a fost necesară, pe de o parte, investigarea proprietăților mecanice ale materialelor utilizate în fabricarea componentelor, precum și determinarea caracteristicilor materialelor utilizate în aplicațiile de prototipare rapidă.

Spumele flexibile investigate au fost prelevate din produse comerciale, și anume cinci tipuri de încălțăminte sportivă, respectiv un echipament de protecție a capului. De asemenea, au fost investigate două materiale utilizate în aplicațiile de prototipare rapidă, furnizate sub forma unor epruvete standardizate. Încercările experimentale efectuate în cadrul tezei au pus în evidență comportamentul caracteristic al celor două clase de materiale ce pot fi supuse unor deformații reversibile foarte mari.

Testele monotone au determinat curbe caracteristice neliniare, atât pentru solicitări de compresiune, cât și pentru solicitări de tracțiune. În compresiune, ambele clase de materiale au determinat o rigiditate mai scăzută în primele etape ale deformației (până la aproximativ 60% pentru spumele flexibile, respectiv până la aproximativ 70% pentru elastomerii epruvetelor prototipate), urmată de o creștere exponențială a caracteristicii tensiune-deformație. În cazul solicitărilor de tracțiune, s-a observat un efect invers, materialele au prezentat o rigiditate sporită în prima etapă a deformației, până la aproximativ 20%, urmată un comportament aproape liniar (cu o pantă redusă) pentru restul solicitării. Diferitele materiale utilizate în fabricarea celor cinci tipuri de încălțăminte au determinat un comportament similar la compresiune, diferențe mai semnificative observându-se la solicitările de tracțiune. În cazul încălțăminte sportive, proprietățile la tracțiune afectează doar comportamentul la încovoiere al tălpilor, dar, ținând cont de rigiditatea scăzută la încovoiere pentru acest tip de echipament, se poate neglija efectul comportamentului diferit la tracțiune al materialelor investigate.

Testele de relaxare au fost efectuate pentru solicitarea de compresiune, menținându-se constantă o deformație specifică de 25% pentru o durată de o oră. Și în acest caz, comportamentul celor două tipuri de materiale a fost similar, înregistrându-se o scădere relativ bruscă a tensiunii în primele minute ale testului (între 20% și 40%), urmată de o regiune în care tensiunea scade într-o manieră mai lentă (între 5% și 10% pentru restul testului).

Solicitările ciclice au evidențiat caracteristicile specifice efectului Mullins, în speță o histereză a energiei, o reducere relativă a caracteristicii tensiune-deformație în cazul mai multor cicluri efectuate la aceeași amplitudine, respectiv o reluare

aproximativă a traseului descris de o epruvetă testată monoton, în cazul în care deformația crește peste amplitudinea maximă descrisă de solicitările ciclice la același nivel de solicitare.

În continuare, datele experimentale obținute au fost utilizate în calibrarea unor modele de materiale virtuale utilizate în analizele numerice. Spumele flexibile au fost modelate utilizând modelul Ogden modificat, cu scopul de a ține cont de deformațiile volumice mari. Astfel, curbele caracteristice tensiune-deformație au fost transformate în curbe energie specifică-deformație utilizând integrarea numerică. Aceste date au fost utilizate în evaluarea constantelor modelului Ogden modificat, folosind metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate. Pentru a ține cont de influența timpului asupra proprietăților mecanice, s-a adăugat un model de viscoelasticitate, model care constă într-o serie Prony. Datorită efectelor viscoelastice, caracteristica tensiune-deformație specifică calibrată anterior s-a diminuat, astfel că modelul spumelor flexibile a fost modificat prin calibrarea parametrilor utilizând valori augmentate ale tensiunii. Efectul Mullins observat la solicitările ciclice a fost modelat utilizând funcția Ogden-Roxburgh, calibrarea parametrilor efectuându-se pe baza datelor experimentale, cu metoda aproximării în sensul celor mai mici pătrate. O procedură similară s-a utilizat în calibrarea modelului de material virtual utilizat în simularea comportamentului elastomerilor. Astfel, datele experimentale au fost utilizate în calibrarea mai multor funcții hiperelastice, alegându-se varianta care a determinat rezultatele cele mai exacte. Modelele finale au fost validate prin reproducerea încercărilor experimentale, determinând rezultate exacte.

Cele patru tipuri de structuri investigate au fost modelate plecând de la o formă ideală a celulelor de bază, urmată de generarea de grinzi care să conecteze punctele caracteristice ale structurilor. Celulele de bază au fost teselate cu scopul determinării unor elemente de volum reprezentative. Fiecărui tip de structură i s-au adăugat raze de racordare între grinzi, pentru ameliorarea efectului de concentrare a tensiunilor.

Cu obiectivul de a determina variația densității relative cu parametrii geometrici, s-au generat structuri cu raportul dintre lungimea și diametrul grinzii variabil într-un anumit interval. Pentru fiecare structură astfel generată s-a determinat valoarea maximă a razei de racord care determină o geometrie validă. Rezultatele variației densității relative cu parametrii structurali au fost approximate prin intermediul unor curbe polinomiale. Rezolvarea lor pentru anumite valori impuse ale densităților relative, au determinat caracteristicile geometrice ale structurilor.

Modelele optimizate au fost supuse analizelor numerice cu metoda elementului finit, astfel, determinându-se variația rigidității relative și a rezistenței mecanice relative cu densitatea relativă. Pe baza acestor date s-au selectat structurile care urmau a fi implementate în noile echipamente sportive. Variantele optime din punctul de vedere al performanțelor s-au dovedit structurile de tip Kagome și de tip Kelvin.

Într-un demers firesc, în continuare, ca aplicație a structurilor de metamateriale în domeniul echipamentelor sportive, s-a ales integrarea lor în tălpile de încălțăminte sportivă. Compararea caracteristicilor mecanice, ale noilor echipamente cu ale celor existente în comerț, s-a efectuat pornind de la o solicitare cvasi-statică de compresiune a călcâiului, urmată de revenirea la poziția inițială.

Cu acest scop, s-a generat un model numeric având la bază o geometrie de talpă din comerț, cu atribuirea proprietățile de material determinate în Capitolul 3. Modelul a fost supus unei solicitări de compresiune până la atingerea forței de 1000 (N), curba forță-deplasare obținută fiind considerată de referință în comparațiile ulterioare. Modelele noi de tălpi au avut la bază un volum circumscris identic cu al

tălpii de referință, acest volum fiind ocupat cu cele două tipuri de structuri de metamateriale.

În primul pas, s-au generat modele geometrice cu densitatea relativă stabilită astfel încât să determine o masă identică cu masa tălpii fabricată din spumă flexibilă. Analizele numerice efectuate pe acest model au determinat valori mult mai mici ale deplasării la atingerea forței de 1000 (N). Astfel, pentru un comportament similar, noile densități relative ale celor două structuri de metamateriale au fost reevaluate (pe baza variației rigidității relative cu densitatea relativă, valori care au fost determinate numeric în Capitolul 4).

Structurile actualizate au determinat valori apropiate de cele de referință, determinând o reducere a masei de 1,86 ori în cazul structurii Kelvin (o masă totală a tălpii de 50,7 gr., comparativ cu 94,2 gr. pentru talpa din spumă flexibilă), respectiv de 3,12 ori în cazul structurii Kagome (o masă totală a tălpii de 30,16 gr.). Talpa modelată pe structura Kagome a determinat un caracter neliniar mai pronunțat decât talpa generată pe structura Kelvin. Comportamentul este explicat prin flambajul grinzilor. Această scădere a rigidității la deformații mari ar putea cauza un disconfort în timpul alegerii. Astfel, se recomandă utilizarea structurilor de tip Kelvin, care prezintă un comportament mai previzibil.

În concluzie, implementarea structurilor de metamateriale în echipamentele sportive este oportună. Ele determină componente cu mase reduse, pentru proprietăți mecanice similare. Totodată, ușurința în proiectarea componentelor cu rigidități variabile, care să țină cont de preferințele fiecărui sportiv, reprezintă un alt beneficiu important al implementării structurilor de metamateriale în echipamentele sportive.

6.2. Contribuții personale

Teza de doctorat aduce numeroase elemente originale în domeniul investigat, și anume, fabricarea echipamentelor sportive pe baza unor materiale avansate. În continuare, sunt sintetizate principalele contribuții personale în ordinea ce decurge din dezvoltarea lucrării.

În cadrul programului experimental, principalele contribuții ale autorului se referă la determinarea comportamentului mecanic al diverselor tipuri de materiale celulare utilizate în fabricarea încălțămintei sportive și a echipamentelor de protecție. Pe lângă evidențierea caracteristicilor determinate în testele de compresiune și tracțiune uniaxială monotonă, determinarea comportamentului la solicitări ciclice și la solicitări de lungă durată pentru aceste tipuri de materiale reprezintă o contribuție importantă, rezultate similare fiind indisponibile în literatura de specialitate.

Totodată, determinarea proprietăților mecanice ale elastomerilor obținuți prin prototipare rapidă reprezintă un subiect de interes major, ținând cont de proporția tot mai ridicată a aplicațiilor componentelor fabricate prin aceste tehnologii.

Calibrarea modelelor de materiale virtuale evidențiază câteva contribuții personale, și anume: suprapunerea diverselor modele constitutive, hiperelasticitate/spume flexibile cu seriile Prony și modelul Ogden-Roxburgh; replicarea solicitărilor monotone, ciclice și de lungă durată, cu rezultate de mare acuratețe.

Selecția structurilor optime a avut la baza analiza unor structuri descrise în literatura de specialitate. Principalele contribuții personale sunt reprezentate de determinarea variației razelor maxime de racord cu parametrii dimensionali, respectiv variația densității relative cu parametrii geometrici. Un alt element de noutate este reprezentat de analiza numerică a structurilor utilizând o formulare elastic-plastică a materialului de bază. S-a obținut variația rigidității relative și a rezistenței mecanice relative cu densitățile relative, ținând cont de stările complexe de solicitare care apar ca urmare a deformațiilor plastice.

Principala contribuție a studiului îl reprezintă generarea de componente pe bază de structuri de metamateriale și evaluarea numerică a comportamentului mecanic pentru solicitări similare cu cele observate în timpul utilizării. Analizele efectuate au evidențiat superioritatea noilor componente prin comparație cu cele convenționale, rezultând oportunități de dezvoltare de noi produse.

7. BIBLIOGRAFIE

- [1] „Harvard Sports Analysis Collective,” [Interactiv]. Available: <https://harvardsportsanalysis.org>. [Accesat 12 10 2022].
- [2] „Statista,” [Interactiv]. Available: <https://www.statista.com/>. [Accesat 12 10 2022].
- [3] D. Tyler și P. Venkatraman, „A critical review of impact resistant materials used in sportswear clothing,” în *Advances in Textiles, Machinery, Nonwoven and Technical Textiles*, Coimbatore, India, 2011.
- [4] Adidas, „What is Adidas boost technology?,” Adidas, 21 June 2021. [Interactiv]. Available: <https://www.adidas.com/us/blog/439874-what-is-boost>. [Accesat 10 10 2021].
- [5] M. Carre, J. Clarke, L. Damm și S. Dixon, „Friction at the tennis shoe-court interface: how biomechanically informed Lab-based testing can enhance understanding,” *Procedia Engineering*, vol. 72, pp. 883-888, 2014.
- [6] M. Cheskin, *The Complete Handbook of Athletic Footwear*, NY: Fairchild Books, 1987.
- [7] W. Motawi, *Shoe Material Design Guide: The shoe designers complete guide to selecting and specifying footwear materials (How Shoes are Made)*, Wade's Place; 1st edition, 2017.
- [8] M. Dickson și F. Fuss, „Effect of acceleration on optimization of Adidas Bounce shoes,” *Procedia Engineering*, vol. 13, nr. 5, p. 107–112, 2011.
- [9] T. McPoil, „Athletic Footwear: Design, performance and selection issues,” *Jurnal of Science and Medicine in Sport*, vol. 3, nr. 3, pp. 260-267, 2000.
- [10] J. Indesteege, R. Camargo, P. Mackey și G. D. A. Bagaglio, „Consideration on the selection of polyurethane systems for midsole wedges in athletic footwear applications,” *Jurnal of Cellular Plastics*, vol. 34, nr. 4, pp. 329-348, 1998.
- [11] L. Gibson, M. Ashby, J. Zhang și T. Triantafylliou, „Failure Surfaces for Cellular Materials Under Multi-Axial Loads - I. Modeling,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 31, nr. 9, p. 635–665, 1989.
- [12] L. Gibson și M. Ashby, *Cellular Solids. Structure and Properties*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2nd ed., 1997.
- [13] A. Shigeru, Interviewee, *Mizuno Enerzy Technology*. [Interviu]. 14 April 2020.
- [14] C. Mahesh și K. Ramachandran, „Finite element modelling of functionally graded elastomers for the application of diabetic footwear,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, nr. 8, pp. 16367-16377, 2018.
- [15] G. Marckmann și E. Verron, „Comparison of Hyperelastic Models for Rubber-Like Materials,” *Rubber Chemistry and Technology*, vol. American Chemical Society, nr. 79, pp. 835-858, 2006.
- [16] Y. Shimazuki, S. Nozu și T. Inoue, „Shock absorbtion properties of functionally graded EVA laminates for footwear design,” *Polymer Testing*, vol. 54, pp. 98-103, 2016.
- [17] S. Subotnick, „Evolution of athletic footwear,” în *Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine*, New York, Springer-Verlag, 2010, pp. 3-17.

- [18] M. Shariatmadari, R. English și G. Rothwell, „Effects of temperature on the material characteristics of midsole and insole footwear foams subject to quasistatic compressive and shear force loading,” *Materials & Design*, vol. 37, pp. 543-559, 2012.
- [19] T. Bückmann, M. Thiel, M. Kadic, R. Schittny și M. Wegener, „An elasto-mechanical unfeelability cloak made of pentamode metamaterials,” *Nature Communications*, vol. 5, nr. 1, pp. 1-6, 2014.
- [20] A. Spagnoli, R. Brighenti, M. Lanfranchi și F. Soncini, „On the auxetic behaviour of metamaterials with re-entrant cell structures,” *Procedia Engineering*, vol. 109, pp. 410-417, 2015.
- [21] N. Zheludev, „The road ahead for metamaterials,” *Science*, vol. 328, pp. 582-583, 2010.
- [22] ASTM D575, *Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression*, ASTM, 1991.
- [23] ASTM D412, *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension*, ASTM, 2002.
- [24] I. Rezaeian, S. Jafari, P. Zahedi, M. Ghaffari și S. Afradian, „Improvements of physical and mechanical properties of electron beam irradiation - crosslinked EVA foams,” *Polymers Advanced Technologies*, vol. 20, pp. 487-492, 2009.
- [25] S. Boedicker, S. Hunter, P. Klesmith, T. Nearn și P. Spreen, „Mechanical properties testing of running shoes,” *Journal of Undergraduate Materials Research*, vol. 4, nr. 1, pp. 34-38, 2010.
- [26] J. Diani, B. Fayolle și P. Gilormini, „A review on the Mullins effect,” *European Polymer Journal*, vol. 45, nr. 3, p. 601-612, 2009.
- [27] A. Drozdov, „Mullins’ effect in thermoplastic elastomers: Experiments and modeling,” nr. 36 pg. 437-443, 2009.
- [28] S. Cantournet, D. Desmorat și J. Besson, „Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 2255-2264, 2009.
- [29] J. A. C. Harwood, L. Mullins și A. Payne, „Stress softening in natural rubber vulcanizates. Part II. Stress softening effects in pure gum and filler loaded rubber,” *Rubber Chemistry and Technology*, nr. 39, p. 814-22, 1966.
- [30] A. Drozdov și N. Dusunceli, „Mullins-type phenomena in polypropilene,” *International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 8, nr. 11, pp. 82-98, 2012.
- [31] R. Rivlin, „Large elastic deformations of isotropic materials I. Fundamental concepts,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 240, nr. 822, pp. 459-490, 1948.
- [32] A. Meunier, G. Chagnon, D. Favier, L. Orgéas și P. Vacher, „Mechanical experimental characterisation and numerical modelling of an unfilled silicone rubber,” *Polymer Testing*, vol. 27, nr. 6, p. 765-777, 2008.
- [33] E. Parsons, M. Boyce și D. Parks, „An experimental investigation of the large-strain tensile behavior of neat and rubber-toughened polycarbonate,” *Polymer*, vol. 45, nr. 8, p. 2665-2684, 2004.

- [34] H. Brinson și L. Brinson, *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*, New York: Springer Science, 2008.
- [35] D. Bower, *An Introduction to Polymer Physics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [36] R. Marlow, „A general first-invariant hyperelastic constitutive model,” în *Constitutive Models for Rubber III*, vol. III, AA Balkema, 2003, pp. 157-160.
- [37] R. Ogden, G. Saccomandi și I. Sgura, „Fitting hyperelastic models to experimental data,” *Computational Mechanics*, vol. 34, p. 484-502, 2004.
- [38] R. Ogden, „Large deformation isotropic elasticity - on the correlation of theory and experimental for incompressible rubberlike solids,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 326, pp. 565-584, 1972.
- [39] Abaqus, „User's Manual,” vol. Analysis, 2020.
- [40] L. Mullins, „Effect of stretching on the properties of rubber,” *Journal of Rubber Research*, vol. 16, nr. 12, p. 281-300, 1947.
- [41] W. Mars și A. Fatemi, „Observations of the constitutive response and characterization of filled natural rubber under monotonic and cyclic multiaxial stress states,” *European Polymer*, vol. 126, pp. 19-28, 2004.
- [42] L. Mullins, „Softening of rubber by deformation,” *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 42, pp. 339-362, 1969.
- [43] D. Șerban, L. Marșavina, L. Culea și V. Silberschmidt, „Experimental determination of Mullins effect in semi-crystalline thermoplastic polymers,” *Acta Technica Napocensis*, vol. 53, pp. 317-323, 2010.
- [44] R. Ogden și D. Roxburgh, „A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber,” *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 455, p. 2861-2877, 1988.
- [45] A. Dorfmann și R. Ogden, „A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, nr. 7, pp. 1855-1878, 2004.
- [46] M. Shaw și W. MacKnight, *Introduction to Polymer Viscoelasticity*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [47] D. Viswanath, T. Ghosh, D. Prasad, N. Dutt și K. Rani, *Viscosity of Liquids. Theory, Estimation, Experiment and Data*, Dordrecht: Springer, 2007.
- [48] D. Șerban, *Constitutive models for the viscoplasticity and damage of thermoplastic polymers - Habilitation Thesis*, Timișoara: Politehnica University Timișoara, 2020.
- [49] D. Șerban, *Introducere în mecanica solidului deformabil*, Timișoara: Editura Politehnica, 2019.
- [50] C. Berbente, S. Mitran și S. Zancu, *Metode numerice*, București: Editura Tehnică, 1997.
- [51] D. Larionescu, *Metode numerice*, București: Editura Tehnică, 1989.
- [52] M. Scheffler și P. Colombo, *Cellular Ceramics – Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.

- [53] D. Șerban, O. Weissenborn, S. Geller, L. Marșavina și M. Gude, „Evaluation of the mechanical and morphological properties of long fibre reinforced polyurethane rigid foams,” *Polymer Testing*, vol. 49, p. 121–127, 2016.
- [54] X. Zheng, H. Lee, T. Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, E. Duoss, J. Kuntz, M. Biener, Q. Ge, J. Jackson, S. Kucheyev și N. Fang, „Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials,” *Science*, vol. 344, nr. 6190, pp. 1373–1377, 2014.
- [55] R. S. Kshetrimayum, „A brief intro to metamaterials,” *IEEE Potentials*, vol. 23, nr. 5, pp. 44 - 46, 2004.
- [56] D. Șerban, R. Negru, S. Sărăndan, G. Belgiu și L. Marșavina, „Numerical and experimental investigations on the mechanical properties of cellular structures with open Kelvin cells,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 28, nr. 13, p. 1367–1376, 2021.
- [57] M. Eidini, „Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials,” *Extreme Mechanics Letters*, vol. 6, p. 96–102, 2016.
- [58] N. Engheta și R. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [59] K. Wang, Y. Chang, Y. Chen, C. Zhang și B. Wang, „Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing,” *Materials and Design*, vol. 67, p. 159–164, 2015.
- [60] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang și L. Wua, „Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review,” *Progress in Materials Science*, vol. 94, p. 114–173, 2018.
- [61] D. Șerban, S. Sărăndan, R. Negru, G. Belgiu și L. Marșavina, „A parametric study of the mechanical properties of open-cell Kelvin structures,” în *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Timișoara, 2018.
- [62] D. Șerban, E. Linul, S. Sărăndan și M. L., „Development of parametric Kelvin structures with closed cells,” *Solid State Phenomena*, vol. 254, pp. 49–54, 2016.
- [63] „GrabCAD - Ultraboost running shoe,” [Interactiv]. Available: <https://grabcad.com/library/ultraboost-running-shoe-8uk-fitting-g-41-42-euro-1>. [Accesat 19 Septembrie 2019].
- [64] S. Schwanitz, S. Moser și S. Odenwald, „Comparison of test methods to quantify shock attenuating properties of athletic footwear,” *Procedia Engineering*, vol. 2, pp. 2805–2810, 2010.
- [65] R. Verdejo și N. Mills, „Performance of EVA foam in running shoes,” în *The Engineering of Sport 4*, Blackwell, 2002, pp. 580–587.