

CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA MATERIALELOR COMPOZITE LA SISTEMELE DE FRÂNARE ALE AUTOVEHICULELOR

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul Ingineria Materialelor
de către

Ing. Crăciun Andrei-Lucian

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Hepuț Teodor
prof.univ.dr.ing. Vida-Simiti Ioan
prof.univ.dr.ing. Țierean Mircea Horia
prof.univ.dr.ing. Socalici Ana Virginia

Ziua susținerii tezei: 08.05.2018

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea Politehnica 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, 2013

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 Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

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

Cuvânt înainte

Competitivitatea în domeniul industriei autovehiculelor impune obținerea de produse noi, care să ofere parametri ridicați în exploatare, la care caracteristicile geometrice se combină cu exploatarea complexă a proprietăților materialului, rezultatul fiind obținerea unui autovehicul mai performant și mai fiabil. Acest scop se atinge prin utilizarea unor materiale și tehnologii avansate, adaptate cerințelor impuse pe piață.

Multe părți din componența autovehiculelor contribuie activ sau pasiv la creșterea siguranței în funcționare, aceasta fiind strâns legată de eficiența sistemului de frânare. Sistemele de frânare sunt alcătuite din mai multe părți componente, fiecare dintre acestea având o funcție bine definită, performanța acestuia fiind asigurată de ansamblul disc-plăcuță de frână.

Ideea acestei lucrări de cercetare a plecat atât de la exigențele impuse la ora actuală autovehiculelor, cât și de la problemele pe care le provoacă asupra sănătății umane, utilizarea azbestului în fabricarea plăcuțelor de frână. Pe de o parte, exigențele impuse autovehiculelor necesită dezvoltarea materialelor și a tehnologiilor moderne de prelucrare în vederea creșterii performanțelor și a siguranței în funcționare, iar pe de altă parte, problemele cauzate de fibra de azbest, presupun găsirea unor soluții pentru înlocuirea acesteia. Deși, azbestul era cel mai popular material de fricțiune utilizat la fabricarea plăcuțelor de frână, încă de la începutul sec. al-XX-lea datorită proprietăților sale superioare, rapoartele medicale ulterioare au arătat că fibra de azbest are efecte negative asupra sănătății umane. Aceasta a dus la interzicerea materialelor de frecare pe bază de azbest în țările dezvoltate, iar multe țări în curs de dezvoltare se află pe aceeași cale. Acest lucru a motivat cercetătorii din întreaga lume să găsească soluții pentru înlocuirea acestor fibre. În acest context, tendința actuală în domeniul autovehiculelor este de a dezvolta materiale și tehnologii avansate care să asigure satisfacerea exigențelor manifestate față de calitate, cost și performanțele autovehiculelor, fără să se neglijeze impactul acestora asupra sănătății umane. La ora actuală, ingineria se orientează spre utilizarea materialelor compozite organice care sunt apreciate în domeniile în care greutatea materialelor joacă un rol important, cum este și cel al autovehiculelor. Folosirea acestor materiale duce la creșterea rezistenței pieselor, concomitent cu scăderea greutății vehiculelor, ceea ce se traduce prin reducerea consumului de combustibil și creșterea performanțelor acestora.

Cu ocazia definitivării lucrării doresc să adresez mulțumiri tuturor celor care m-au îndrumat, m-au sprijinit și mi-au împărtășit cunoștințele profesionale. Doresc să adresez cele mai calde mulțumiri conducătorului științific, domnului prof. univ. dr.ing. Teodor Hepuț, pentru sugestiile, sfaturile pline de profesionalism și încrederea acordată pe întreg parcursul elaborării tezei. De asemenea, doresc să mulțumesc colegilor de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara care în mod direct sau indirect au fost alături de mine în acest demers. Mulțumesc pe această cale domnilor conf.univ.dr.ing. Dragoș Uțu și prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina de la Facultatea de Mecanică din Timișoara pentru sprijinul acordat privind experimentările în fază de laborator și prelucrarea datelor obținute, precum și pentru sfaturile oferite anterior, și pe parcursul elaborării prezentei lucrări.

În final doresc să mulțumesc familiei pentru dragostea, răbdarea și înțelegerea de care au dat dovadă și, nu în ultimul rând, părinților mei fără de care nu aș fi ajuns aici. Mulțumesc astfel și referenților pentru recomandările efectuate și sprijinul acordat.

Timișoara, mai 2018

Crăciun Andrei-Lucian

Crăciun, Andrei-Lucian

**CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA MATERIALELOR
COMPOZITE LA SISTEMELE DE FRÂNARE
ALE AUTOVEHICULELOR**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 15, Nr. 26, Editura Politehnica,
2018, 228 pagini, 213 figuri, 48 tabele.

ISSN: 2285-1720

ISSN-L: 2285-1720

ISBN: 978-606-35-0222-4

Cuvinte cheie:

Ansamblu de frânare, disc frână, plăcuță de frână, plăcuță de frână organică, material compozit, fibră de nucă de cocos, aluminiu.

Rezumat

Teza de doctorat are un caracter multidisciplinar și reprezintă o contribuție în domeniul ingineriei materialelor cu destinație pentru sistemele de frânare ale autovehiculele rutiere. Prin cercetările și experimentările propuse și efectuate s-a urmărit obținerea, caracterizarea și testarea unor materiale compozite organice destinate realizării plăcuțelor de frână din componența sistemelor de frânare ale autovehiculelor de dimensiuni mici și cu performanțe medii.

Aceasta și-a propus abordarea a 3 direcții de cercetare:

- obținerea în laborator a materialelor compozite organice după rețete proprii, destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii;
- analiza tehnologică și optimizarea caracteristicilor calitative ale materialelor de fricțiune produse;
- caracterizarea și testarea materialelor compozite organice produse după rețete proprii conform standardelor în vigoare.

Cercetările au caracter aplicativ, rezultatele obținute având aplicabilitate practică în domeniul ingineriei autovehiculelor.

Scopul cercetărilor în domeniul materialelor compozite constă în atingerea următoarelor obiective:

- analiza rolului discurilor și a plăcuțelor de frână în ansamblul sistemelor de frânare ale autovehiculelor precum și a cerințelor impuse ansamblului disc-plăcuță de frână;
- studiul evoluției cercetărilor în domeniul materialelor destinate realizării discurilor și plăcuțelor de frână;
- studiul cauzelor de apariție a defectelor discurilor și plăcuțelor de frână, precum și a efectelor generate de acestea asupra funcționării sistemelor de frânare;
- obținerea în laborator a materialelor compozite organice, destinate realizării plăcuțelor de frână, după rețete proprii.

CUPRINS

	Pag.
Lista figurilor.....	8
Lista tabelelor.....	13
Lista abrevierilor.....	14
Capitolul 1. Oportunitatea cercetărilor, obiective și strategii experimentale	15
1.1 Oportunitatea și strategia cercetărilor.....	15
1.2 Structura tezei de doctorat.....	18
PARTEA I. Analiza stadiului actual al cercetărilor privind materialele destinate realizării discurilor și plăcuțelor de frână din ansamblul sistemelor de frânare ale autovehiculelor	21
Capitolul 2. Analiza componentelor sistemelor de frânare ale autovehiculelor	23
2.1 Preliminarii.....	23
2.2 Elemente componente ale sistemelor de frânare. Principii de funcționare.....	24
2.3 Cerințe impuse ansamblului disc-plăcuțe de frână.....	28
2.4 Concluzii.....	29
Capitolul 3. Stadiul actual al cercetărilor privind materialele utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână	31
3.1 Evoluția sistemelor de frânare.....	31
3.2 Utilizarea fontelor la fabricarea discurilor de frână.....	33
3.2.1 Compoziția chimică a fontelor.....	33
3.2.1.1 Tipuri de fonte.....	33
3.2.1.2 Influența elementelor de aliere asupra fontelor .	34
3.2.2 Factorii care influențează turnarea fontelor.....	35
3.2.3 Proprietăți fizico-mecanice.....	36
3.2.4 Elaborarea fontelor în cuptoare cu inducție.....	40
3.2.4.1 Principii de funcționare. Elemente componente .	40
3.2.4.2 Componenta și pregătirea încărcăturii.....	41
3.2.5 Evoluția cercetărilor în domeniul materialelor pentru discurile de frână.....	43
3.3 Utilizarea materialelor compozite la fabricarea plăcuțelor de frână.....	48
3.3.1 Elemente componente ale plăcuțelor de frână.....	48
3.3.2 Tipuri de plăcuțe de frână.....	49
3.3.3 Conceptul de material compozit. Clasificarea.....	50
3.3.4 Proprietățile materialelor compozite.....	52
3.3.5 Efectul materialelor compozite asupra mediului.....	55
3.3.6 Evoluția cercetărilor în domeniul materialelor destinate realizării plăcuțele de frână.....	56
3.3.6.1 Categorii de materiale.....	56
3.3.6.2 Coduri și coeficienți de frecare recomandați de SAE.....	59
3.4 Defecte ale discurilor și a plăcuțelor de frână.....	60
3.5 Concluzii și contribuții originale.....	63

PARTEA a-II-a. Cercetări și experimentări proprii privind obținerea, caracterizarea și testarea materialelor compozite destinate sistemele de frânare ale autovehiculelor.....	67
Capitolul 4. Experimentări și analize tehnologice privind obținerea și caracterizarea materialelor compozite	69
4.1 Proceduri experimentale.....	69
4.1.1 Realizarea matrițelor pentru producerea probelor din material compozit.....	69
4.1.2 Stabilirea rețetelor.....	70
4.1.3 Instalații experimentale utilizate.....	75
4.1.4 Tehnologia de obținere a materialelor compozite.....	77
4.2 Caracterizarea materialelor compozite.....	91
4.2.1 Determinarea densității, a porozității și a durtății.....	92
4.2.2 Determinarea rezistenței mecanice la compresiune....	96
4.2.3 Analiza tehnologică a rezultatelor.....	104
4.2.4 Studiul morfologiei suprafețelor.....	110
4.3 Studii de optimizare a obținerii probelor compozite.....	115
4.4 Concluzii și contribuții originale.....	126
Capitolul 5. Comportarea tribologică a materialelor compozite destinate realizării plăcuțelor de frână.....	131
5.1 Metodologia de cercetare.....	131
5.1.1 Obținerea și analiza tehnologică a probelor din fontă.	131
5.1.2 Caracteristicile instalației.....	136
5.1.3 Mod de încercări experimentale.....	136
5.2 Determinarea caracteristicilor funcționale a materialelor compozite.....	137
5.2.1 Influența caracteristicilor masice și dimensionale asupra unor parametri de uzare.....	137
5.2.2 Influența vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare.....	140
5.3 Studiul evoluției câmpului termic în zona de contact.....	145
5.4 Determinarea evoluției coeficientului de frecare.....	150
5.4.1 Prezentarea echipamentului de testare și a modului de lucru.....	150
5.4.2 Experimentări și rezultate.....	151
5.5 Concluzii și contribuții originale.....	159
PARTEA a-III-a Concluzii finale și contribuții personale pentru rezolvarea temei de doctorat. Direcții viitoare de cercetare în domeniul temei	161
Capitolul 6. Concluzii finale. Contribuții originale. Direcții viitoare de cercetare.....	163
6.1 Concluzii finale.....	163
6.2 Contribuții originale.....	166
6.3 Direcții viitoare de cercetare.....	167
Bibliografie	169

Anexe	Anexa 1: Experimentări preliminare.....	178
	Anexa 2: Forțe maxime de rupere și scurtările probelor obținute la încercarea mecanică de compresiune	182
	Anexa 3: Dimensiunile probelor pregătite în vederea efectuării încercării mecanice de compresiune.....	183
	Anexa 4: Dependente forță-deformație pentru rețetele formulate ..	184

LISTA FIGURILOR

- Fig.2.1 Părți componente ale sistemului de frânare al autovehiculelor [7], [8], [10]
Fig.2.2 Prezentarea elementelor sistemului de frânare în ansamblul unui autovehicul [5]
Fig.2.3 Principiul de funcționare a discurilor de frână [9]
Fig.2.4 Ansamblul disc frână-plăcuță [7]
Fig.2.5 Ansamblul disc-plăcuță-etrier [7]
Fig. 2.6 Discuri de frână utilizate în componența diferitelor sisteme de frânare [7], [8]
Fig.3.1 Influența lungimii lamelelor de grafit și a distanței dintre ele asupra uzării fontelor [19]
Fig.3.2 Influența cantității de perlită din structură asupra uzării fontelor [20]
Fig. 3.3 Amortizarea vibrațiilor la fonte [19]
Fig.3.4 Schema unui cuptor electric cu încălzire prin inducție, cu creuzet [24]
Fig.3.5 Schema fluxului tehnologic de elaborare a fontei în cuptoare cu inducție [23], [24]
Fig. 3.6a Fontă cu structură perlitică cu noduli de grafit inserați într-o matrice feritică
b-Fontă cu grafit vermicular- atac nital 2% ; c-Fontă cu matrice perlitică cu lamele de grafit -atac nital 2% [13], [27]
Fig.3.7 Dependența difuziei termice în funcție de echivalentul de carbon (CE), în cazul în care
$$CE = \% C + 1/3 (\ \% Si + P \%)$$
[13], [29]
Fig.3.8 Reprezentarea schematică a parametrilor care caracterizează morfologia lamelelor de grafit [13], [29]
Fig.3.9 Variația coeficientului de frecare în funcție de procentul de Ti din fonta pentru discurile de frână [7], [13]
Fig.3.10 Ansamblul plăcuței de frână [45]
Fig.3.11 Structura materialelor compozite [2]
Fig.4.1 Ansamblul matriței pentru realizarea probelor disc [64]
Fig.4.2 Matriță executată după modelul proiectat [24], [64]
Fig.4.3 Modelul 3D al matriței pentru realizarea epruvetelor de tip cilindru [66]
Fig.4.4 Matrița realizată în vederea obținerii probelor cilindrice [24]
Fig.4.5 Dimensiunile epruvetelor cilindrice realizate cu ajutorul matriței [24], [66]
Fig.4.6 Alumiuniul utilizat la fabricarea materialelor compozite; a-bucăți de aluminiu pregătite în vederea pilirii; b -aluminiu obținut prin pilire
Fig.4.7 Rășină fenolică tip Rășnov
Fig.4.8 Fibră de nucă de cocos
Fig.4.9 Oxid de aluminiu
Fig.4.10 Sulf
Fig.4.11Materiale în obținerea materialelor compozite destinate realizării plăcuțelor de frână- a-grafit; b-oxid de zirconiu; c-carbură de siliciu; d-oxid de titan; e-hexametyl tetramină
Fig.4.12 Moara cu bile tip PM 100
Fig.4.13 Presă electro-hidraulică tip PH 40
Fig.4.14 Elementele componente ale matriței nou concepute
Fig.4.15 Soluția îmbunătățită a ansamblului matriței
Fig.4.16 Strângerea pistonului matriței
Fig.4.17 Presarea ansamblului probă-matriță cu ajutorul presei hidraulice PH 40
Fig.4.18 Probe selectate în vederea determinării caracteristicilor fizico-mecanice

- Fig.4.19 Pini realizați în vederea efectuării testelor tribologice
- Fig.4.20 Eșantion de epruvete din familia F1 (TiO₂) pregătite în vederea determinării porozității
- Fig.4.21 Analiza densității probelor
- Fig.4.22 Analiza porozității probelor
- Fig.4.23 Analiza durității probelor
- Fig.4.24 Echipamentul pentru efectuarea încercărilor mecanice, tip Zwick/Roell Z005 aflat în dotarea laboratorului de Rezistența materialelor de la Facultatea de Mecanică, Timșoara
- Fig.4.25 Eșantion de probe aparținând familiei de compozite F1, pregătite pentru efectuarea încercării mecanice de compresiune
- Fig.4.26 Parametrii mășurați în timpul încercării de compresiune și modul de vizualizare pe monitorul echipamentului
- Fig.4.27 Dependența forță-deformație pentru P13
- Fig.4.28 Dependența forță-deformație pentru P14
- Fig.4.29 Dependența forță-deformație pentru P15
- Fig.4.30 Dependența forță-deformație pentru P16
- Fig.4.31 Dependența forță-deformație pentru P17
- Fig.4.32 Dependența forță-deformație pentru P18
- Fig.4.33 Dependența forță-deformație pentru P19
- Fig.4.34 Dependența forță-deformație pentru P20
- Fig.4.35 Variația rezistenței la compresiune a materialelor compozite din familia F1(TiO₂) în funcție de conținutul de fibră de nucă de cocos
- Fig.4.36 Variația rezistenței la compresiune a materialelor compozite din familia F2(Al₂O₃) în funcție de conținutul de aluminiu și fibră de nucă de cocos
- Fig.4.37 Variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos pentru familia F1 de materiale compozite
- Fig.4.38 Variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos pentru familia F2 de materiale compozite
- Fig.4.39 Imagini SEM pentru Familia 1 de materiale compozite (TiO₂)
- Fig.4.40 Imagini SEM pentru familia F2 de materiale compozite (Al₂O₃)
- Fig.4.41 Diagrama de obținere a materialelor de fricțiune
- Fig.4.42 Probele obținute după rețetele optimizate
- Fig.4.43 Analiza comparativă a densității probelor
- Fig.4.44 Analiza comparativă a porozității în apă și ulei a probelor
- Fig.4.45 Analiza comparativă a durității probelor
- Fig.4.46 Epruvetă aparținând familiei F2 de materiale compozite, cu 5 % fibră de nucă de cocos, deformată ca urmare a solicitării de compresiune
- Fig.4.47 Analiza comparativă a rezistenței la compresiune a probelor
- Fig.4.48 Imaginile SEM pentru materialele organice obținute în laborator
- Fig.5.1 Cuptor cu inducție [24], [66]
- Fig.5.2 Matrită pentru realizarea pinilor din fontă
- Fig.5.3 Forme pentru turnarea șarjelor de fontă elaborate a-formă cilindrică de diametrul de 38 mm, b- formă cilindrică de diametrul de 85 mm
- Fig.5.4 Eșantion de pini după efectuarea prelucrărilor mecanice
- Fig.5.5 Eșantion de probe cilindrice polizate și șlefuite
- Fig.5.6 Dimensiunile probei disc realizată din fontă [24], [66]
- Fig.5.7 Dimensiunile pini din fontă
- Fig.5.8 Microstructuri SEM pentru fonta elaborată în șarja S1
- Fig.5.9 Microstructuri SEM pentru fonta elaborată în șarja S2
- Fig.5.10 Compoziția chimică a celor patru șarje de fonte elaborate
- Fig.5.11 Gradul de saturație în carbon pentru cele patru șarje elaborate

- Fig.5.12 Instalație de uzare prin frecare uscată
Fig.5.13 Probele disc realizate din fontă împreună cu pinii din compozit
Fig.5.14 Suportul pentru montarea pinului din material compozit
Fig.5.15 Pin montat în suport
Fig.5.16 Cupla cinematică de testat montată în ansamblul instalației tribologice
Fig.5.17 Uzura masică a probelor din material compozit
Fig.5.18 Variația masei epruvetei C2 în funcție de timpul de încercare
Fig.5.19 Reducerea de greutate relativă pentru epruveta C2
Fig.5.20 Uzura masică pentru epruveta C2
Fig.5.21 Reducerea de înălțime relativă pentru epruveta C2
Fig.5.22 Reducerea de înălțime absolută pentru epruveta C2
Fig.5.23 Variația masei epruvetei C4 în funcție de timpul de încercare
Fig.5.24 Reducerea de greutate relativă pentru epruveta C4
Fig.5.25 Uzura masică pentru epruveta C4
Fig.5.26 Reducerea de înălțime relativă pentru epruveta C4
Fig.5.27 Reducerea de înălțime absolută pentru epruveta C4
Fig.5.28 Imaginea discului din fontă la finalul încercărilor tribologice
Fig.5.29 Imaginea unui pin realizat din material compozit (C2) la finalul încercărilor tribologice
Fig.5.30 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 3,92$ m/s, $F = 5$ N
Fig.5.31 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 4,71$ m/s, $F = 5$ N
Fig.5.32 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 3,92$ m/s, $F = 10$ N
Fig.5.33 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 4,71$ m/s, $F = 10$ N
Fig.5.34 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 3,92$ m/s, $F = 15$ N
Fig.5.35 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 4,71$ m/s, $F = 15$ N
Fig.5.36 Analiza comparativă a ratei liniare de uzare a probelor disc din material compozit, $F = 5$ N
Fig.5.37 Analiza comparativă a ratei liniare de uzare a probelor disc din material compozit, $F = 10$ N
Fig.5.38 Analiza comparativă a ratei liniare de uzare a probelor disc din material compozit, $F = 15$ N
Fig.5.39 Evoluția câmpului termic pentru pinul C2, $F = 5$ N, $R = 25$ mm
Fig.5.40 Evoluția câmpului termic pentru pinul C2, $F = 10$ N, $R = 25$ mm
Fig.5.41 Evoluția câmpului termic pentru pinul C4, $F = 15$ N, $R = 25$ mm
Fig.5.42 Evoluția câmpului termic pentru pinul C4, $F = 5$ N, $R = 25$ mm
Fig.5.43 Evoluția câmpului termic pentru pinul C4, $F = 10$ N, $R = 25$ mm
Fig.5.44 Evoluția câmpului termic pentru pinul C2, $F = 15$ N, $R = 25$ mm
Fig.5.45 Tribometru TR-20 pentru determinare coeficientului de frecare
Fig.5.46 Epruvetă montată în ansamblul instalației de uzare în timp determinărilor experimentale
Fig.5.47 Urme de uzare obținute pe epruvetele testate [113]
Fig.5.48 Coeficientul de frecare la încercarea probei C1 cu $F = 5$ N
Fig.5.49 Coeficientul de frecare la încercarea probei C2 cu $F = 5$ N
Fig.5.50 Coeficientul de frecare la încercarea probei C3 cu $F = 5$ N
Fig.5.51 Coeficientul de frecare la încercarea probei C4 cu $F = 5$ N
Fig.5.52 Coeficientul de frecare la încercarea probelor C1- C4, cu $F = 10$ N
Fig.5.53 Coeficientul de frecare la încercarea probei C1 cu $F = 15$ N
Fig.5.54 Coeficientul de frecare la încercarea probei C2 cu $F = 15$ N
Fig.5.55 Coeficientul de frecare la încercarea probei C3 cu $F = 15$ N
Fig.5.56 Coeficientul de frecare la încercarea probei C4 cu $F = 15$ N
Fig.5.57 Influența forței de apăsare asupra coeficientului de frecare pentru cele patru probe

- Fig.5.58 Influența forței de apăsare asupra uzurii celor patru probe
Fig.A.1.1 Dependența forță-deformație pentru rețeta P5, tabel 4.1, (proba 1)
Fig.A.1.2 Dependența forță-deformație pentru rețeta P5, tabel 4.1 (proba 2)
Fig.A.1.3 Dependența forță-deformație pentru rețeta P6, tabel 4.1 (proba 1)
Fig.A.1.4 Dependența forță-deformație pentru rețeta P6, tabel 4.1 (proba 2)
Fig.A.1.5 Dependența forță-deformație pentru rețeta P11, tabel 4.2 (proba 1)
Fig.A.1.6 Dependența forță-deformație pentru rețeta P11, tabel 4.2 (proba 2)
Fig.A.1.7 Dependența forță-deformație pentru rețeta P12, tabel 4.2 (proba 1)
Fig.A.1.8 Dependența forță-deformație pentru rețeta P12, tabel 4.2 (proba 2)
Fig.A.4.1 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 1)
Fig.A.4.2 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 1)
Fig.A.4.3 Dependența forță-deformație pentru proba 3(rețeta 1)
Fig.A.4.4 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 2)
Fig.A.4.5 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 2)
Fig.A.4.6 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 2)
Fig.A.4.7 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 3)
Fig.A.4.8 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 3)
Fig.A.4.9 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 3)
Fig.A.4.10 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 4)
Fig.A.4.11 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 4)
Fig.A.4.12 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 4)
Fig.A.4.13 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 5)
Fig.A.4.14 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 5)
Fig.A.4.15 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 5)
Fig.A.4.16 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 6)
Fig.A.4.17 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 6)
Fig.A.4.18 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 6)
Fig.A.4.19 Dependența forță-deformație pentru proba 1(rețeta 7)
Fig.A.4.20 Dependența forță-deformație pentru proba 2(rețeta 7)
Fig.A.4.21 Dependența forță-deformație pentru proba 3(rețeta 7)
Fig.A.4.22 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 8)
Fig.A.4.23 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 8)
Fig.A.4.24 Dependența forță-deformație pentru proba 3(rețeta 8)
Fig.A.4.25 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 9)
Fig.A.4.26 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 9)
Fig.A.4.27 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 9)
Fig.A.4.28 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 10)
Fig.A.4.29 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 10)
Fig.A.4.30 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 10)
Fig.A.4.31 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 11)
Fig.A.4.32 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 11)
Fig.A.4.33 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 11)
Fig.A.4.34 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 12)
Fig.A.4.35 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 12)
Fig.A.4.35 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 12)
Fig.A.4.37 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 13)
Fig.A.4.38 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 13)
Fig.A.4.39 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 13)
Fig.A.4.40 Dependența forță-deformație pentru proba 1 (rețeta 14)
Fig.A.4.41 Dependența forță-deformație pentru proba 2 (rețeta 14)
Fig.A.4.42 Dependența forță-deformație pentru proba 3 (rețeta 14)

LISTA TABELELOR

- Tabel 3.1 Evoluția cronologică a materialelor utilizate la realizarea discurilor de frână [13]
- Tabelul 3.2 Influența elementelor din compoziția fontei asupra procesului de grafitizare [19]
- Tabelul 3.3 Caracteristicile electrice și de funcționare ale cuptoarelor electrice cu inducție cu creuzet [23], [25]
- Tabelul 3.4 Compoziția chimică (%) din fontă cenușie folosită de General Motors Brazilia [13]
- Tabelul 3.5 Compoziția chimică a discurilor de frână conform normelor ASTM A 150 [38]
- Tabelul 3.6 Performanța structurală a materialelor compozite [46]
- Tabelul 3.7 Valorile rezistențelor la compresiune pentru unele materiale compozite [46]
- Tabelul 3.8 Principalele materiale abrazive utilizate în fabricarea plăcuțelor de frână [48]
- Tabelul 3.9 Principalele materiale utilizate ca modificatori de frecare în fabricarea plăcuțelor de frână [48]
- Tabelul 3.10 Principalele materiale utilizate în fabricarea plăcuțelor de frână ca materiale de umplutură și întărire [48]
- Tabelul 3.11 Materiale liante utilizate la fabricarea plăcuțelor de frână [48]
- Tabelul 3.12 Sistem de identificare a pentru coeficienții de frecare a plăcuțelor de frână și a saboți de frână [48], [63]
- Tabelul 4.1 Componenta rețetelor probelor din materiale compozite (P1-P10)
- Tabelul 4.2 Componenta rețetelor probelor din materiale compozite (P11-P20)
- Tabelul 4.3 Tehnologia de producere în laborator a materialului compozit pentru probe
- Tabelul 4.4 Compoziția chimică a celor două familii de materiale compozite care vor constitui obiectul studiilor experimentale următoare
- Tabelul 4.5 Valorile caracteristicilor fizico-mecanice pentru cele două familii de materiale compozite
- Tabelul 4.6 Valorile medii ale caracteristicilor mecanice de compresiune pentru materialele compozite cu din familia F1 (TiO_2) și concentrații diferite de fibră de nucă de cocos
- Tabelul 4.7 Valorile medii ale caracteristicilor mecanice de compresiune pentru materialele compozite cu Al_2O_3 și concentrații diferite de fibră de nucă de cocos
- Tabelul 4.8 Compoziția chimică a celor 15 rețete pentru familia F1 de materiale compozite
- Tabelul 4.9 Compoziția chimică a celor 15 rețete pentru familia F2 de materiale compozite
- Tabelul 4.10 Compoziția materialelor din familia F1 (TiO_2) după sinterizare
- Tabelul 4.11 Compoziția materialelor din familia F2 (Al_2O_3) după sinterizare
- Tabelul 4.12 Compoziția chimică optimizată a materialelor compozite aparținând familiei F1
- Tabel 4.13 Compoziția chimică optimizată a materialelor compozite aparținând familiei F2
- Tabelul 4.14 Valorile densității, porozității și a durtății probelor obținute după rețetele optimizate
- Tabel 4.15 Dimensiunile probelor paralelipipedice supuse încercării la compresiune
- Tabelul 4.16 Valorile medii ale caracteristicilor mecanice de compresiune

Tabelul 4.17 Rezultatele analizei EDX pentru materialele compozite organice produse după rețetele optimizate
Tabelul 5.1 Compoziția chimică, duritatea și densitatea fontelor destinate în elaborarea șarjelor
Tabelul 5.2 Compoziția chimică a șarjei S1
Tabelul 5.3 Compoziția chimică a șarjei S2
Tabelul 5.4 Relații de calcul utilizate la determinarea parametrilor încercărilor
Tabelul 5.5 Caracteristicile dimensionale ale epruvetelor
Tabelul 5.6 Parametrii de uzare pentru proba de fontă și pinii din material compozit
Tabelul 5.7 Rezultate experimentale privind reducerea greutateii și înălțimii epruvetelor
Tabelul 5.8 Rezultate experimentale privind variația masei și a înălțimii epruvetei C2
Tabelul 5.9 Rezultate experimentale privind variația masei și a înălțimii epruvetei C4
Tabelul 5.10 Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 5N$
Tabelul 5.11 Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 10N$
Tabelul 5.12 Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 10N$
Tabelul 5.13 Temperatura urmei de contact dintre discul din fontă și pinii din material compozit
Tabelul 5.14 Rezultatele determinărilor experimentale $F = 5N$
Tabelul 5.15 Rezultatele determinărilor experimentale $F = 10N$
Tabelul 5.16 Rezultatele determinărilor experimentale $F = 15N$
Tabelul A2.1 Dimensiunile probelor pregătite în vederea efectuării încercării mecanice de compresiune - Familia de materiale compozite F1 (TiO_2)
Tabelul A2.2 Dimensiunile probelor pregătite în vederea efectuării încercării mecanice de compresiune - Familia de materiale compozite F2 (Al_2O_3)
Tabelul A3.1 Forțe maxime de rupere și scurtările probelor obținute la încercarea mecanică de compresiune pentru familia de materiale compozite F1 (TiO_2)
Tabelul A3.2 Forțe maxime de rupere și scurtările probelor obținute la încercarea mecanică de compresiune pentru familia de materiale compozite F2 (Al_2O_3)

LISTA ABREVIERILOR

ABS -Anti-lock braking system;
ESP- Electronic Stability Program;
DSC -Dymanimc Stability Control;
EBD - Electronic Brake Distribution;
ASTM A 159- Standard Specification for Automotive Gray Iron Castings;
ZIMT -Zwick Interpreter for Materials Testing;
PMC -Polymer Matrix Composites (materiale compozite cu matrice polimerică);
MMC -Metal Matrix Composites (materiale compozite cu matrice metalică);
CMC- Ceramic Matrix Composites (materiale compozite cu matrice ceramică);
CC- Carbon-Carbon Composit (materiale compozite cu matrice carbon-carbon);
SEM - Microscopie electronică;
EDX -Energy Dispersive X-Ray Microanalysis;
SAE - Societatea Inginerilor Auto.

CAPITOLUL 1

OPORTUNITATEA CERCETĂRILOR, OBIECTIVE ȘI STRATEGII EXPERIMENTALE

1.1 Oportunitatea și strategia cercetărilor

Exigențele actuale, privind siguranța rutieră, impune dezvoltarea unor noi soluții tehnice pentru sistemele „vitale” ale autovehiculului. Aceste sisteme sunt realizate din componente cu funcții multiple în ansamblul autovehiculului, funcționarea optimă a acestuia fiind asigurată atât de fiecare subansamblu în parte, cât și de ansamblul legăturilor care există între ele. Fiecare subansamblu, la rândul său este alcătuit din mai multe repere care pot fi realizate dintr-o mare diversitate de materiale. Performanțele tehnice ale subansamblelor și implicit ale autovehiculului din care acestea fac parte, depind de *caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor* din care sunt realizate reperele respective [1].

Multe părți din componența autovehiculelor contribuie activ sau pasiv la creșterea performanței în funcționare. *Siguranța este strâns legată de eficiența sistemului de frânare*, acesta fiind unul dintre cele mai importante componente dintr-un autovehicul. Pe de altă parte, funcționarea corectă a sistemelor de frânare este esențială, atât pentru siguranța transporturilor de mărfuri, cât și de persoane [2].

În cazul componentelor sistemelor de frânare ale autovehiculelor, siguranța în funcționare este condiționată de trei factori [1]: concepția constructivă, materialele utilizate și controlul electronic. Dintre acești factorii, alegerea materialelor și a proceselor de prelucrare este o etapă dificilă, dar foarte importantă pentru realizarea performanțelor tehnice și obținerea unui cost relativ mic al produsului finit. Alegerea are la bază promovarea de materiale cu preț de cost scăzut, ușor de achiziționat, realizându-se o valorificare optimă a proprietăților tehnologice ale acestora [2].

La începutul construcției automobilului, cu aproximativ 100 de ani în urmă, așteptările cumpărătorilor erau relativ scăzute, acesta fiind realizat în proporție de 80 % din materiale metalice, respectiv fontă și oțel [3]. La ora actuală, autovehiculele moderne trebuie să vină în întâmpinarea unei varietăți de cerințe legate de: siguranță, confort, conservarea resurselor naturale și nu se neglijează nici impactul autovehiculului asupra mediului înconjurător care se manifestă prin emisiile poluante generate de motoarele cu ardere internă, cu efect distructiv pentru societate [3]. Datorită evoluției continue din domeniul autovehiculelor, componența pe materiale a unui autovehicul s-a schimbat semnificativ în ultimul timp astfel încât, la ora actuală doar 51% din masa totală a acestuia mai este reprezentată de oțel și fontă, 15% fiind reprezentat de metale ușoare, iar aproximativ 12% de materiale plastice. Aceste cerințe pot fi îndeplinite prin utilizarea unor materiale avansate care implică și existența unor tehnologii de fabricație moderne [3]. Înlocuirea materialelor metalice cu materiale compozite a condus la creșterea duratei de funcționare a unor repere din ansamblul autovehiculului, la reducerea

zgomotului și a vibrațiilor în funcționare, precum și la preluarea energiei cinetice a șocurilor în caz de accidente [3].

Competitivitatea în domeniul industriei impune obținerea de produse noi, care să ofere parametri ridicați în exploatare, la care caracteristicile geometrice se combină cu exploatarea complexă a proprietăților materialului, rezultatul fiind obținerea unui autovehicul mai performant și mai fiabil.

În general, tehnologia materialelor și metodele de prelucrare din industrie sunt într-o continuă schimbare, în funcție de creșterea varietății mijloacelor și metodelor de dezvoltare a tehnicii. Datorită faptului că *industria autovehiculelor este o ramură a economiei care utilizează produse obținute în aproape toate celelalte industrii, fiind cea mai mare consumatoare de materiale din economie, preocupările actuale sunt îndreptate în direcția valorificării celor mai noi cercetări din domeniul materialelor și tehnologiilor moderne din toate domeniile care participă la realizarea autovehiculelor* [4]:

- metalurgia metalelor, aliajelor feroase, neferoase și a pulberilor;
- prelucrarea metalelor și nemetalelor prin procedee neconvenționale;
- automatizarea și robotizarea proceselor de fabricație și montaj;
- conceperea și realizarea unor sisteme de proiectare, încercare, reparare și control a producției asistate de calculator.

Pe de altă parte, pe fondul necesității unei resurse sustenabile de materii prime, precum și a problemelor de mediu, cauzate de materialele plastice și cele metalice greu degradabile, **producători de automobile sunt mereu în căutarea unor materiale noi, în special cele compozite, cu impact redus asupra mediului și a sănătății umane, care după încheierea ciclului de viață să fie ușor reciclabile și biodegradabile, care să asigure aceleași performanțe, dar să fie produse într-un mod cât mai ecologic posibil** [5]. Datorită problemelor de mediu cauzate de volumul mare de deșeuri, lumea se orientează spre utilizarea materialelor compozite organice. Acestea sunt apreciate în domeniile în care greutatea materialelor joacă un rol important, un astfel de domeniu fiind și cel al autovehiculelor [6].

Sistemele de frânare sunt alcătuite din mai multe părți componente: discuri/tamburi, plăcuțe de frână, etriere, circuit hidraulic. Fiecare dintre acestea îndeplinește o funcție bine definită, în ansamblul sistemului de frânare, un rol important în asigurarea performanțelor acestuia, fiind asigurat de ansamblul disc-plăcuță de frână. Atât discurile, cât și plăcuțele de frână pot fi realizate din diferite materiale și pot fi folosite la diferite categorii de autovehicule.

Gama de materiale folosite la fabricarea plăcuțelor de frână variază de la azbest la formule organice, semimetalice și ceramice. În trecut, azbestul era un material preferat în fabricarea plăcuțelor de frână, datorită proprietăților sale superioare comparativ cu alte materiale de fricțiune, dar s-a dovedit a fi dăunător sănătății umane. Tendința actuală în fabricarea plăcuțelor de frână este în utilizarea fibrelor minerale, polimerice, celuloză, fibră de sticlă, fibre de cupru și oțel. În funcție de proprietățile acestora variază și gradul de uzură al discurilor de frână. Fiecare material are avantajele și dezavantajele sale legate de: condițiile de mediu, uzură, zgomot, capacitatea de frânare, însă proprietățile finale ale fiecărui tip de plăcuță de frână sunt influențate de materialul abraziv [7].

În acest context, temele actuale ale cercetării în domeniul științei și ingineriei materialelor vizează dezvoltarea unor materiale cu performanțe superioare, care să răspundă exigențelor industriei moderne, simultan cu aplicarea unor tehnologii de prelucrare de maximă eficiență economică [4].

Aceste aspecte, preocupări și concluzii justifică elaborarea tezei de doctorat cu titlul **"Cercetări privind utilizarea materialelor compozite la sistemele de frânare ale autovehiculelor"** în cuprinsul căreia s-a urmărit prezentarea sistematică a stadiului actual al cercetărilor privind materialele utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână, obținerea în laborator a materialelor compozite organice destinate realizării plăcuțelor de frână după rețete proprii, optimizarea caracteristicilor calitative ale acestora, precum și caracterizarea și testarea lor în conformitate cu standardelor în vigoare.

Teza de doctorat are un caracter multidisciplinar și reprezintă o contribuție în domeniul ingineriei materialelor cu destinație pentru sistemele de frânare ale autovehiculelor rutiere. Prin cercetările și experimentările propuse și efectuate s-a urmărit obținerea, caracterizarea și testarea unor materiale compozite organice destinate realizării plăcuțelor de frână din componența sistemelor de frânare ale autovehiculelor de dimensiuni mici și cu performanțe medii.

Teza de doctorat și-a propus abordarea a 3 direcții de cercetare:

- **obținerea în laborator a materialelor compozite organice după rețete proprii, destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii;**
- **analiza tehnologică și optimizarea caracteristicilor calitative ale materialelor de fricțiune produse;**
- **caracterizarea și testarea materialelor compozite organice produse după rețete proprii conform standardelor în vigoare.**

Cercetările au caracter aplicativ, rezultatele obținute având aplicabilitate practică în domeniul ingineriei autovehiculelor.

Scopul cercetărilor în domeniul materialelor compozite constă în atingerea următoarelor obiective:

- *analiza rolului discurilor și a plăcuțelor de frână în ansamblul sistemelor de frânare ale autovehiculelor precum și a cerințelor impuse ansamblului disc-plăcuță de frână;*
- *studiul evoluției cercetărilor în domeniul materialelor destinate realizării discurilor și plăcuțelor de frână;*
- *studiul cauzelor de apariție a defectelor discurilor și plăcuțelor de frână, precum și a efectelor generate de acestea asupra funcționării sistemelor de frânare;*
- *obținerea în laborator a materialelor compozite organice, destinate realizării plăcuțelor de frână, după rețete proprii;*
- *stabilirea componenței optime a rețetelor pentru materialele de fricțiune produse;*
- *îmbunătățirea tehnologiei de sinterizare prin experimentări și analize tehnologice succesive;*
- *investigarea caracteristicilor calitative ale materialelor produse și prelucrarea datelor experimentale;*
- *cercetarea comportării tribologice a materialelor de fricțiune în conformitate cu standardele în vigoare.*

În vederea îndeplinirii obiectivelor anterior prezentate s-a stabilit o strategie de cercetare care cuprinde parcurgerea următoarelor etape:

- **analiza componentelor sistemelor de frânare cu evidențierea factorilor care influențează funcționarea ansamblului disc-plăcuță de frână, precum și a cerințelor care trebuie îndeplinite pentru funcționarea acestuia în deplină siguranță;**

- **documentarea din literatura de specialitate cu privire la stadiul actual al cercetărilor privind evoluția materialelor utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână, prelucrarea și evaluarea informațiilor obținute;**
- **studiul cauzelor de apariție a defectelor discurilor și a plăcuțelor de frână, precum și a efectelor generate de acestea asupra funcționării sistemelor de frânare;**
- **cercetări și experimentări în fază de laborator privind obținerea materialelor compozite organice destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii;**
- **analize tehnologice în vederea îmbunătățirii tehnologiei de fabricație;**
- **determinarea experimentală a caracteristicilor fizico-mecanice și prelucrarea datelor în vederea optimizării proporției constituenților din rețete;**
- **stabilirea rețetelor optime prin calcul statistico-matematic, precum și a tehnologiei optime de sinterizare;**
- **determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și analiza morfologiei suprafețelor pentru materialele compozite obținute din rețetele optimizate;**
- **determinarea comportării tribologice a probelor din materialele compozite organice produse prin studiul evoluției parametrilor de uzură, a coeficientului de frecare și a temperaturii în zona cuplei de frecare;**
- **interpretarea rezultatelor obținute;**
- **concluzii și contribuții originale.**

1.2. Structura tezei de doctorat

Teza de doctorat este structurată pe șase capitole.

Capitolul 1 cu titlul "**Oportunitatea cercetărilor, obiective și strategii experimentale**" prezintă importanța efectuării cercetărilor din acest domeniu, scopul și obiectivele cercetării, precum și modul prin care se vor atinge aceste obiective.

Partea I. Analiza stadiului actual al cercetărilor privind materialele destinate realizării discurilor și plăcuțelor de frână din sistemele de frânare ale autovehiculelor

Capitolul 2 cu titlul "**Analiza componentelor sistemului de frânare ale autovehiculelor**" cuprinde o prezentare generală a principalelor componente ale sistemului de frânare cu evidențierea principiilor de funcționare ale acestora, analiza rolului discurilor și a plăcuțelor de frână în ansamblul sistemelor de frânare ale autovehiculelor, prezentarea cerințelor impuse acestor elemente co-funcționale în vederea evitării riscurilor legate de siguranță, precum și importanța utilizării materialelor compozite în producerea plăcuțelor de frână.

Capitolul 3 cu titlul "**Stadiul actual al cercetărilor privind materialele utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână**" cuprinde sinteza bibliografică cu privire la evoluția materialelor utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână. Acest capitol a fost structurat pe trei direcții referitoare la:

utilizarea fontelor la fabricarea discurilor de frână, utilizarea materialelor compozite la fabricarea plăcuțelor de frână, studiul cauzelor de apariție a defectelor la aceste repere co-funcționale, precum și efectele generate de acestea asupra funcționării sistemelor de frânare.

Partea a-II-a. Cercetări și experimentări proprii privind obținerea, caracterizarea și testarea materialelor compozite destinate sistemelor de frânare ale autovehiculelor

Capitolul 4 cu titlul "**Experimentări și analize tehnologice privind obținerea și caracterizarea materialelor compozite**" cuprinde realizarea matrițelor pentru producerea probelor din materiale compozite organice din care se vor realiza epruvete destinate experimentărilor ulterioare, stabilirea rețetelor, prezentarea instalațiilor experimentale, obținerea în laborator a materialelor organice după rețete proprii, experimentări succesive și analize tehnologice în vederea îmbunătățirii tehnologiei de sinterizare. De asemenea, acest capitol cuprinde determinarea densității, a porozității și a durtății, a rezistenței la compresiune și analiza tehnologică a rezultatelor în vederea optimizării proporției componentelor din rețete, analiza morfologiei suprafețelor utilizând microscopia electronică SEM și analiza EDX. Pe baza rezultatelor obținute s-au realizat studii de optimizare a obținerii probelor compozite prin calcul statistico-matematic, care a permis stabilirea domeniului tehnologic care asigură cele mai bune caracteristici mecanice la compresiune pentru materialele compozite produse. Probele produse după rețetele optimizate au fost caracterizate și testate conform standardelor în vigoare.

Capitolul 5 cu titlul "**Comportarea tribologică a materialelor compozite destinate realizării plăcuțelor de frână**" cuprinde determinarea caracteristicilor funcționale, a coeficientului de frecare și a temperaturii în zona cuplei de frecare. În acest sens s-au efectuat determinări experimentale în laborator efectuate cu privire la uzura probelor din materiale compozite produse după rețete proprii optimizate, folosind metode de testare standardizate. Cercetarea tribologică a probelor din material compozit a avut ca obiective influența unor factori de material (concentrația și natura constituenților) și a unor parametri ai regimului de lucru (forța de apăsare, viteza de alunecare, timpul de încercare, regimul de frecare) asupra caracteristicilor tribologice a probelor testate.

Partea a-III-a. Concluzii finale și evidențierea contribuțiilor personale pentru rezolvarea temei de doctorat. Direcții viitoare de cercetare în domeniul temei

Concluziile generale desprinse din elaborarea tezei, contribuțiile proprii și direcțiile de dezvoltare a cercetărilor sunt prezentate în **Capitolul 6**.

Partea I

**Analiza stadiului actual al cercetărilor privind
materialele destinate realizării discurilor și
plăcuțelor de frână din sistemele de frânare ale
autovehiculelor**

CAPITOLUL 2

ANALIZA COMPONENTELOR SISTEMELOR DE FRÂNARE ALE AUTOVEHICULELOR

2.1 Preliminarii

*Industria autovehiculelor este o ramură a economiei care utilizează produse obținute în aproape toate celelalte industrii, (metalurgie, chimie, electronică, electrotehnică, materiale textile, etc.), iar pe durata funcționării, autovehiculul reprezintă un important consumator de produse petroliere și de fluide industriale [5]. Datorită acestui fapt, **industria constructoare de autovehicule este cea mai mare consumatoare de materiale din economie [2].***

Totodată, **concurența din acest domeniu și exigențele impuse autovehiculelor necesită cunoașterea proprietăților materialelor, dezvoltarea de materiale avansate și tehnologii moderne de prelucrare, în vederea creșterii performanțelor și a siguranței în funcționare, în condițiile unor prețuri accesibile, adaptate cerințelor impuse pe piață [5].** În vederea satisfacerii exigențelor manifestate față de calitatea, costul și performanțele autovehiculelor, preocupările actuale sunt îndreptate în direcția valorificării celor mai noi cercetări din domeniul materialelor și a tehnologiilor din toate domeniile care participă la realizarea autovehiculelor [5].

Istoria dezvoltării industriei autovehiculelor ilustrează tendința spre mărirea vitezelor de circulație care este strâns legată de îmbunătățirea performanțelor sistemelor de frânare. Astfel, acestea sunt într-o evoluție permanentă, căutându-se obținerea unei siguranțe depline în funcționare și a celui mai bun compromis între confort, performanțe, costuri și masă [5].

Pentru a satisface aceste cerințe, sistemul de frânare trebuie să aibă calitățile enumerate în cele ce urmează [5], [7]:

- **eficacitate**, care se apreciază prin decelerația obținută, aceasta fiind limitată de valoarea aderenței dintre pneu-cale de rulare, precum și de factorii biologici umani;
- **stabilitate**, care constituie calitatea automobilului de menținere a traiectoriei în procesul frânării;
- **fidelitate**, calitatea frânei de a obține decelerații identice la toate roțile, în toate condițiile de drum și de încărcătura;
- **confort**, calitate care se caracterizează prin: progresivitatea frânării, eforturi reduse la pedală pentru o cursă judicios aleasă, absența zgomotelor și a vibrațiilor.

Materialele tradiționale utilizate în construcția de autovehicule, au fost studiate în timp, astfel încât astăzi se cunosc caracteristicile lor, avantajele și dezavantajele pe care acestea le au. Problemele tehnologice care nu pot fi rezolvate în mod corespunzător prin utilizarea acestor materiale, ca și problemele privind resursele,

modul de obținere, precum și aspectele economice, au determinat cercetătorii din domeniul autovehiculelor să caute materiale speciale care să le înlocuiască pe cele clasice, [4].

Prin folosirea materialelor avansate și prin aplicarea tehnologiilor moderne în conceperea, fabricarea și testarea autovehiculelor se asigură [2]:

- *îmbunătățirea randamentelor motoarelor și a transmisiilor;*
- *reducerea componentelor poluante din gazele de eșapament;*
- *obținerea de piese cu greutate cât mai mică, rigiditate corespunzătoare și rezistență mare la uzură.*

Un studiu efectuat de specialiști la cererea unor firme japoneze producătoare de autovehicule are ca principală concluzie faptul că: "firmele care nu vor lua măsuri de înlocuire a materialelor tradiționale cu altele noi, nu vor putea face față concurenței" [6], [8].

2.2. Elemente componente ale sistemelor de frânare. Principii de funcționare

Funcția principală a sistemelor de frânare este de a reduce viteza autovehiculului până la o valoare dorită sau până la oprire. Aceasta se realizează prin ***transformarea energiei cinetice în căldură, prin frecare și disiparea acesteia eficient prin componentele sistemului de frânare.*** Astfel, ***sistemul de frânare reprezintă elementul primordial în asigurarea securității circulației, aceasta fiind strâns legată de eficiența sistemului de frânare [5],[9].***

În ultimii ani, creșterea continuă a calităților dinamice ale autovehiculelor, dar și a traficului, au accentuat importanța sistemului de frânare în asigurarea recursivității circulației [7].

Sistemul de frânare al autovehiculelor cuprinde următoarele elemente componente, fig.2.1 [7], [8],[10]:

- ***circuitul hidraulic*** care face posibilă transmiterea forței de apăsare a pedalei de frână către etriere, prin intermediul lichidului de frână,;
- ***discurile sau tamburii de frână*** care se rotesc solidar cu roțile autovehiculului;
- ***etrierele*** care presează plăcuțele de frână pe discuri sau sistemul de acționare al saboților pe tamburi;
- ***plăcuțele de frână.***

Principiu de funcționare: conducătorul auto acționează pedala de frână prin intermediul unei tije care apasă asupra servomecanismului care amplifică această forță de apăsare și o transmite pompei de frână. Aceasta face conversia forței din tijă în presiune care împinge lichidul de frână prin conducte. Ulterior, prin intermediul unor cilindri, presiunea lichidului din conducte acționează asupra frânelor cu disc, sau, după caz asupra tamburilor [5], [7], [8].

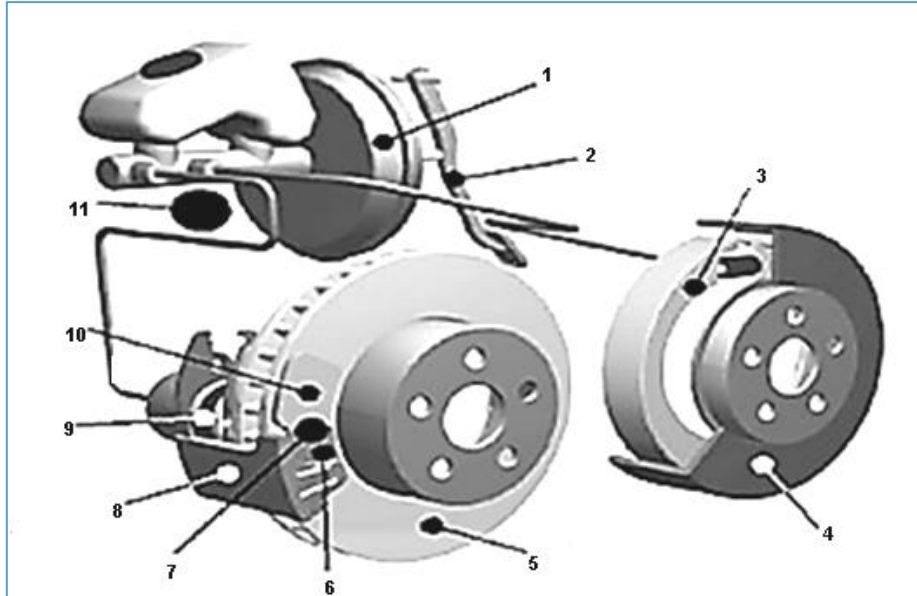


Fig. 2.1 Părți componente ale sistemului de frânare al autovehiculelor [7], [8], [10]
 1-amplificator de efort, 2-pedală, 3- sabot, 4 -tambur, 5-disc frână, 6-plăcuță frână,7-suport plăcuță frână, 8-etrier, 9-piston, 10-material fricțiune, 11-sistem hidraulic

Principalele elemente componente ale unui sistem de frânare din ansamblul unui autovehicul se prezintă în fig.2.2 [5].

Sistemele de frânare ale autovehiculele sunt echipate cu frâne prin fricțiune pe fiecare roată [5]:

- **frâne cu disc pe puntea față [A]** care sunt universal utilizate la automobile atât pentru stabilitatea lor, cât și pentru buna capacitate de transfer termic [5];
- **frâne cu disc sau cu tambur pe puntea spate [B]** care sunt limitate datorită performanțelor termice reduse, din acest motiv ele fiind prezente pe puntea spate a vehiculelor de mici dimensiuni [5].

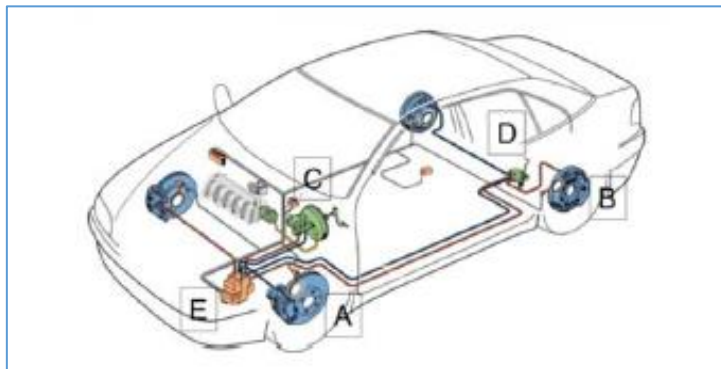


Fig.2.2 Prezentarea elementelor sistemului de frânare în ansamblul unui autovehicul [5]

În general, frânele sunt comandate hidraulic, presiunea de comandă fiind generată într-un cilindru emițător ca urmare a efortului aplicat pe pedala de frână. Acest efort este amplificat de către un **amplificator de efort [C]**, alimentat de către depresiunea naturală a motorului sau printr-o pompă de vid. Cilindrul principal de comandă al circuitelor hidraulice de frânare este separat de către un piston care delimitează două circuite izolate fiecare comandând o parte dintre receptorii de frână. Sistemul este completat de organe de reglare a presiunii [5]:

- **corector hidraulic de frânare**, poziționat între cilindrul emițător și frânele roților spate, pentru ca alunecarea acestora să rămână inferioară alunecării roților față [D];
 - **bloc de reglare și captatori ABS de viteză ai roții**, permițând limitarea presiunii în frânele roților, acolo unde tendința la blocare este sesizată [E].
- O componentă de o importanță majoră în sistemul de frânare este **discul de frână**.

Principalele funcții ale discurilor de frână sunt fig.2.3, [5], [7], [8], [9]:

- **transmiterea unei forțe mecanice în scopul încetinerii sau opriri roților autovehiculului aflat în mișcare de rotație;**
- **disiparea căldurii obținute în timpul acestei operațiuni.**

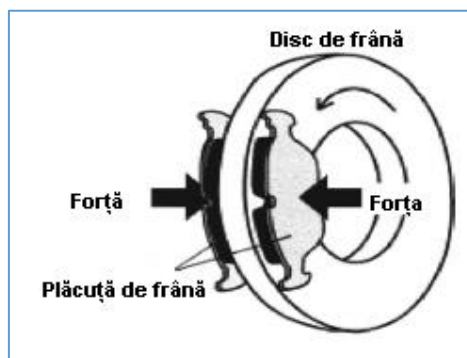


Fig.2.3 Principiul de funcționare a discurilor de frână [9]

Pentru a îndeplini această funcție, pe suprafața discurilor de frână apasă prin intermediul unei forțe mecanice plăcuțele de frână, care sunt realizate din material de fricțiune și sunt montate într-un etrier.

Există două soluții constructive de discuri de frână, și anume: **fără canale de răcire și cu canale de răcire**. În timpul rulării autovehiculului, datorită forței de apăsare la pedala de frână, se produce presarea plăcuțelor de frână pe discuri. Ca rezultat al forței de frecare create, o mare parte din energia cinetică a autovehiculului se transformă în căldură într-un timp relativ scurt [5], [9].

Principala cerință impusă discurilor de frână este de a asigura o disipare cât mai rapidă a căldurii. Supraîncălzirea sistemului de frânare se produce atunci când căldura acumulată nu poate fi transmisă suficient de repede mediului ambiant. Ca urmare a acestui fenomen, capacitatea de frânare scade, în cazurile extreme fiind posibil ca autovehiculul să nu mai poată fi oprit [10].

În situația supraîncălzirii sistemului de frânare pot apărea următoarele situații [10]:

- **plăcuțele de frână au în componență material de fricțiune și rășini fenolice ca liant;** la temperaturi înalte, aceste rășini încep să se

vaporizeze, formând un gaz; acesta se va dispune sub forma unei pelicule subțiri între plăcuțele de frână și disc, iar contactul dintre cele două nu se va mai realiza eficient, ducând la *scăderea capacității de decelerare a autovehiculului*;

- **cantitatea prea mare de căldură nu poate fi disipată de discurile de frână** și este transferată către etriere iar de aici, spre lichidul de frână. Acesta poate atinge punctul de fierbere, formându-se bule de aer; aerul va fi comprimat de presiunea exercitată prin apăsarea pedalei de frână și nu va mai fi posibilă acțiunea corectă a pistonșelor care presează plăcuțele de frână pe disc, rezultatul fiind *reducerea capacității de frânare a autovehiculului*.

Pentru a combate aceste neajunsuri, au fost proiectate discurile de frână ventilate. Pentru autoturismele mai performante se utilizează discuri de frână ventilate cu striatii și/sau cu perforații, realizate din aliaje speciale utilizând tehnologii de fabricație avansate [10]. **Discurile de frână ventilate cresc randamentul sistemului de frânare**, datorită faptului că între cele două straturi de frână există un spațiu de ventilație care în timpul rulării permite apariția unui curent de aer între cele două discuri. Astfel, se evacuează căldura și suprafețele de frânare sunt răcite suplimentar și din interior, ceea ce duce la păstrarea eficienței frânelor un timp mai îndelungat. **Discurile ventilate sunt dimensionate pentru a nu depășească temperaturi de 600-700°C în cazul unor succesiuni de frânări severe** [11]:

- *coborârile alpine, aglomerări în orașe/localități, drumuri în lucru*, care solicită capacitatea termică a discurilor și posibilitățile acestora de răcire;
- *înlănțuiri de accelerații-frânări*, care solicită în mod implicit capacitatea termică a discurilor.

S-a constatat că, utilizarea unei arhitecturi aerodinamice la discul de frână conduce la o scădere cu peste 30% a timpului de răcire și, în consecință se obține o scădere a solicitării termice cu un procent similar [9], [10]. În fig.2.4 se prezintă ansamblul disc ventilat-plăcuță de frână [7].

Datorită faptului că în procesul de frânare al autovehiculului, **discurile de frână sunt expuse unor solicitări mari, în stabilirea tehnologiei de fabricație a acestora trebuie să se aleagă materialul cel mai adecvat** [2], [9].



Fig.2.4 Ansamblul disc- frână – plăcuță [7]

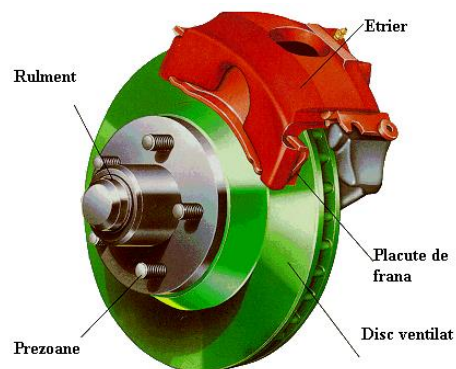


Fig.2.5 Ansamblul disc -plăcuță-etrier [7]

Etrierul transformă presiunea hidraulică în forță mecanică care apasă plăcuțele pe discul de frână. În funcție de performanțele dinamice ale autovehiculului, etrierele pot avea mai multe pistoane. Cu cât numărul de pistoane este mai mare cu atât crește valoarea forței de strângere aplicată, capacitatea de frânare fiind direct proporțională cu aceasta [5], [7].

În fig.2.5 se prezintă ansamblul disc-plăcuță de frână-etrier al punții față din componența unui autovehicul pentru pasageri [7].

Cilindrul principal reprezintă elementul de comandă a dispozitivelor de frânare cu transmisie hidraulică, rolul acestuia fiind de a produce forța necesară transmiterii lichidului de frână spre cilindrul secundar (etrier). Astfel, plăcuțele de frână presează discul de frână în procesul de funcționare al autovehiculului.

Conductele de frână au rolul de a conecta cilindrul principal de cei secundari.



tren avion autovehicul elevator pod rulant

Fig. 2.6 Discuri de frână utilizate în componența diferitelor sisteme de frânare [7], [8]

Sistemele de frânare nu sunt întâlnite doar în ansamblul autovehiculelor, ci și în componența altor utilaje, mașini și echipamente care deservește diferite procese tehnologice specifice mai multor industrii. În ceea ce privește construcția discurilor de frână, există mai multe forme constructive, dar toate sunt similare în ceea ce privește principiul de funcționare, fig.2.6 [7].

2.3. Cerințe impuse ansamblului disc - plăcuțe de frână

În procesul frânării, **tensiunile mecanice și termice care acționează asupra discului și a plăcuțelor de frână sunt foarte mari**. De asemenea, **condițiile atmosferice și tipul suprafeței pe care rulează autovehiculul influențează funcționarea ansamblului disc-plăcuțe de frână**. Toate acestea pot duce la uzuri intense, modificări de formă sau deteriorări ale acestora. În măsura în care discurile și plăcuțele de frână sunt considerate elemente esențiale care funcționează în cadrul procesului de frânare, acest lucru presupune [9], [10], [11]:

- stabilitate la fricțiune de-a lungul unui interval foarte larg de temperatură;
- dependență scăzută a coeficientului de frecare față de presiunea din timpul contactului, de viteză și de mediul în care se realizează frânarea;
- rezistență la deformare;
- stare de uzură cuprinsă între anumite valori limită specificate;
- toleranțele componentelor cuprinse între anumite valorile limită;
- comportament adecvat la uzură al discurilor și a plăcuțelor de frână.

Pe de altă parte, elementele de fricțiune utilizate la sistemele de frânare ale autovehiculelor prezintă nivele de frecare care descresc semnificativ plecând de la aproximativ 300°C. În acest sens, se urmărește **limitarea temperaturilor atinse**

în cadrul frânelor succesive, în special în ceea ce privește creșterea capacității de transfer termic a discurilor de frână [9], [12].

În afară de proprietățile termice, se urmărește a fi dezvoltate numeroase calități pentru ansamblul disc-plăcuțe de frână, acestea fiind adesea contradictorii [12]:

- repartiția omogenă a presiunii și a uzurii pe plăcuțele de frână;
- uzura redusă a discului și a plăcuțelor de frână;
- rigiditate mare a etrierului, un joc mic între plăcuță și discul de frână, un cuplu rezidual redus în fazele din afara frânării;
- calitatea plăcuțelor de a neutraliza defectele geometrice prezente la rotația discului;
- funcționarea silențioasă, fără vibrații.

În condițiile respectării acestor cerințe, **riscurile legate de siguranță, pierderea confortului și reducerea duratei de viață a acestui ansamblu co-funcțional pot fi evitate prin** [12]:

- **utilizarea unor materiale adecvate care să satisfacă multitudinea de cerințe impuse pentru ambele componente co-funcționale;**
- **utilizarea unor tehnologii moderne de fabricație;**
- **întreținerea corectă a ansamblului disc-plăcuță de frână.**

Discurile și plăcuțele de frână sunt cele mai solicitate componente pentru siguranța sistemului de frânare, care funcționează împreună. În acest sens, acestora li se impun anumite cerințe care trebuie îndeplinite de fiecare în parte.

2.4 Concluzii

- Industria constructoare de autovehicule este cea mai mare consumatoare de materiale din economie;
- Punerea în valoare a performanțelor de viteză și de accelerație ale unui autovehicul în condiții de siguranță depind într-o mare măsură de capacitatea de frânare a acestuia;
- Sistemul de frânare reprezintă elementul primordial în asigurarea siguranței circulației;
- Calitățile sistemului de frânare sunt: eficacitate, stabilitate, fidelitate, confort, care pot fi asigurate prin: utilizarea unor materiale adecvate pentru realizarea componentelor acestuia, utilizarea unor tehnologii moderne de fabricație și întreținerea corectă a ansamblului disc-plăcuță de frână;
- Discurile și plăcuțele de frână sunt cele mai solicitate componente care funcționează împreună și contribuie la siguranța sistemului de frânare;
- Cantitatea mare de căldură care se degajă în timpul frânării contribuie la înrăutățirea calităților de frânare ale autovehiculului și grăbește uzura plăcuțelor de frână, respectiv a discurilor de frânare;
- În ansamblul autovehiculului, discurile și plăcuțele de frână sunt expuse unor solicitări termo-mecanice mari, motiv pentru care în stabilirea tehnologiei de fabricație a acestora trebuie să se aleagă materialul cel mai adecvat;
- Funcționarea ansamblului disc-plăcuță de frână este influențată de condițiile atmosferice și tipul suprafeței de rulare;
- **Principala cerință impusă discurilor și plăcuțelor de frână este de a asigura o disipare cât mai rapidă a căldurii spre mediul exterior;**

- *La fabricarea plăcuțelor de frână trebuie găsit întotdeauna un compromis între siguranță, confort și eficiență economică;*
- *Direcțiile de cercetare actuale în industria autovehiculelor sunt îndreptate spre domeniul materialelor și tehnologiilor de fabricație a pieselor din componența acestuia.*

În cadrul acestui capitol **contribuțiile originale** constau în sinteza bibliografică cu privire la:

- *elementele componente ale sistemului de frânare;*
- *factorii care influențează funcționarea ansamblului disc-plăcuță de frână;*
- *cerințele care se impun în funcționarea discurilor și a plăcuțelor de frână;*
- *importanța utilizării materialelor și a tehnologiilor moderne în fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână.*

CAPITOLUL 3

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND MATERIALELE UTILIZATE LA FABRICAREA DISCURILOR ȘI A PLĂCUȚELOR DE FRÂNĂ

3.1 Evoluția sistemelor de frânare

Istoria automobilului a început în anul 1700 când Nicholas Cugnot l-a convins pe regele Franței să îi finanțeze proiectul, un vehicul de 10 tone destinat tractării tunurilor. Vehiculul rula cu 10 km/h și era propulsat cu ajutorul unui cazan cu aburi. La prima călătorie, inventatorul a realizat că nu a prevăzut o soluție de oprire a acestuia, motiv pentru care vehiculul s-a lovit de un zid, astfel, având loc și primul accident [13].

În jurul anului 1886, Gottlieb Daimler și Carl Benz au schimbat istoria, inventând, independent unul de celălalt, primele prototipuri de automobile cu combustie internă, care au fost produse eficient doar după zece ani [13].

La sfârșitul sec. al-XIX-lea, datorită apariției unui număr mare de automobile, s-a impus dezvoltarea componentelor acestora, atât în ceea ce privește materialele utilizate, cât și din punct de vedere al formei lor geometrice [13].

Primul disc de frână a fost creat de inginerul englez Frederick William Lanchester, în 1902 [13],[14]. Acesta descrie discul de frână ca fiind un disc metalic, rigid, conectat la roțile din spate ale autovehiculului, având presate pe margini niște gheare [14], [15]. Această perioadă evidențiază o dezvoltare majoră a noilor tehnologii de producere a discurilor de frână. Primele companii care au introdus aceste tehnologii au fost Mercedes și Renault [13], [16]. Evoluția discurilor de frână pentru automobile a fost marcată de Dunlop Gridlingand Lockheed Corporation, a căror discuri de frână sunt similare cu cele produse la ora actuală [13], [14].

Discurile de frână moderne au fost produse de către Dunlop în Anglia, în anul 1953 și au fost folosite pe mașina de curse Jaguar C-Type. În 1955 prima mașină de serie care folosea discuri de frână moderne a fost Citroen DS [17].

Primul material din care au fost realizate discurile de frână a fost **fonta** care întrunește toate cerințele impuse în ceea ce privește: conductivitatea termică, difuzivitatea termică, rezistență la coroziune, durabilitate în funcționare, zgomot scăzut, stabilitate la frecare, uzură redusă, preț de cost scăzut. De-a lungul a peste 100 de ani s-au dezvoltat numeroase materiale care au fost create cu scopul de a îmbunătăți performanțele sistemelor de frânare. Multe dintre acestea, însă s-au dovedit a fi ineficiente, **singurul material care s-a păstrat până în zilele noastre fiind fonta [7],[8],[13].**

Inventatorul primului material utilizat la realizarea plăcuțelor de frână a fost Herbert Froad în 1897. Materialul era realizat din bumbac impregnat cu o soluție de bitum și era folosit atât la roțile de tren, cât și la roțile primelor automobile. Această invenție a dus la înființarea fundației Ferodo Company, mare producătoare de

materiale pentru sistemele de frânare până în zilele noastre [13]. În jurul anului 1920, acestea au fost înlocuite cu materiale turnate care conțineau fibre de azbest. Plăcuțele de frână pe bază de rășini au fost introduse în anul 1950, iar în jurul anilor 1960 au apărut primele plăcuțele de frână semimetalice [13].

În tabelul 3.1 se prezintă cronologic, evoluția materialelor utilizate la realizarea discurilor și a plăcuțelor de frână [8], [13].

Tabel 3.1. Evoluția cronologică a materialelor utilizate la realizarea discurilor de frână [13]

Descrierea materialului	Aplicații	An aproximativ
Fontă pe oțel	Utilizate în blocuri și alte componente ale frânelor vagoanelor	1870
Bumbac (benzi)	Roți de car și primul automobil	1897
Țesut de azbest și alte fire pentru a crește performanțele	Camioane și automobile	1908
Plăcuțe de bronz cu conținut redus de cenușă și cărbune bituminos, produse cu armare internă de fibre scurte	Camioane și automobile	1926
Material turnat dintr-un amestec uscat de post-metal pentru a înlocui plăcuțele de frână de fontă fragile la trenurile electrice	Metroul Londrei	1930
Rășină flexibilă obținută cu elemente aglutinate complicat formulate	Armarea tamburilor de frână	1930
Metal combinat cu rășină	Utilizate în industria aeronautică	1950
Sticlă, minerale, metale, carbon și fibre sintetice pentru a da semi-metalelor performanțe mai bune decât azbestul (începutul discuției despre siguranța azbestului)	Automobile și camioane	1960
Compușii fără azbest	Frâne cu tambur și echipamente auto	1980
Fibră de carbon	Frâne auto	1991

Evoluția sistemelor de frânare s-a manifestat și asupra altor componente, astfel în anul 1918 Malcolm Loughheed elaborează proiectul pentru sistemul de frânare hidraulic, iar în 1929 Gabriel Voisin dezvoltă pentru prima dată conceptul unui sistem de frânare cu agregat ABS (Anti-lock braking system) utilizat în industria aeronautică. Mai târziu, în anul 1971, Firma Chrysler introduce sistemul de frânare cu ABS pe autovehiculele de serie, iar din anul 2010 dezvoltarea sisteme de frânare înglobează și sistemele de control a stabilității (exemplu: ESP- Electronic Stability Program, DSC -Dymanimc Stability Control, EBD - Electronic Brake Distribution) [18]. Astfel, de-a lungul timpului, atât discurile de frână, cât și plăcuțele de frână au fost continuu îmbunătățite, atât din punct de vedere al materialului, cât și din punct de vedere al performanțelor.

3.2. Utilizarea fontelor la fabricarea discurilor de frână

Discurile de frână sunt realizate din fontă și se obțin prin turnare, procedeul în cadrul căruia trebuie riguros controlată atât compoziția chimică, cât și procesul de răcire, în vederea dirijării formei, a distribuției și a precipitării excesului de carbon [19], [20]. Astfel, se asigură minimizarea distorsiunilor din procesul de prelucrare, caracteristici de uzare bune, vibrații reduse, precum și rezistență la fisurare, în utilizarea ulterioară [19], [20].

Fonta este un material metalic tradițional, care conține în mod frecvent $2 < C < 4,5$ % și prezintă rezistență ridicată la temperaturi înalte, preț de fabricație relativ scăzut, dar datorită densității mari, duce la creșterea greutății discurilor de frână. Acestea reprezintă mai mult de jumătate din masa sistemului de frânare, deoarece ele adaugă până la aproximativ 12 kilograme pe fiecare roată a unui vehicul de clasă medie, ceea ce implică consumul unei cantități mai mari de combustibil în funcționare, datorită inerției mari [19].

3.2.1 Compoziția chimică a fontelor

3.2.1.1 Tipuri de fonte

În fontă, carbonul se poate găsi sub formă de [19], [20]:

- **carbon legat chimic cu alte elemente** din compoziția fontei (cel din cementită) - C_{leg} ;
- **carbon liber** (sub formă de grafit) - C_{gr} ;
- **carbon dizolvat în soluție solidă** (austenită și ferită) - C_{sol} .

Carbonul total va fi [19]:

$$C_t = C_{leg} + C_{gr} + C_{sol} \quad (3.1)$$

Deoarece carbonul dizolvat în soluție solidă are valoare foarte mică comparativ cu valoarea existentă în cementită și grafit, se poate considera că [19]:

$$C_t = C_{leg} + C_{gr} \quad (3.2)$$

Cementita se poate găsi în structura fontei, fie legată în perlită, fie liberă.

În funcție de valoarea carbonului legat (C_{leg}), respectiv liber (C_{gr}), fontele se pot clasifica [19]:

- **Fonte cenușii** – nu conțin în structură cementită liberă, ci numai legată:
 - **fonte cenușii feritice** - structură: ferită + grafit;
 - **fonte cenușii ferito-perlitice** - structură: ferită + perlită + grafit;
 - **fonte cenușii perlitice** - structură: perlită + grafit
- **Fonte pestrițe** – au cementită liberă și grafit, iar structura constă din perlită, cementită și grafit;
- **Fonte albe** – grafitul lipsește din structură, tot carbonul găsindu-se sub formă de cementită liberă și legat în perlită.

În structura fontelor, grafitul poate fi întâlnit sub mai multe forme care se deosebesc prin compactitate, respectiv raportul dintre suprafață și volum [21]. În funcție de forma grafitului în structura fontelor, acestea pot fi [19]:

- **Fonte cenușii** – cu grafit lamelar;
- **Fonte modificate** – cu grafit lamelar modificat, cu grafit nodular, cu grafit vermicular;
- **Fonte maleabile** – cu grafit în cuiburi.

3.2.1.2 Influența elementelor de aliere asupra fontelor

Elementele din compoziția fontei influențează în mare măsură condițiile de grafitizare. Din acest punct de vedere, unele elemente au acțiune pozitivă, iar altele acțiune negativă. Influența elementelor din compoziția fontei asupra procesului de grafitizare se prezintă în tabel 3.2 [19].

Tabelul 3.2. Influența elementelor din compoziția fontei asupra procesului de grafitizare [19]

+		-
	Al, C, Si, Ti, Ni, Cu, P, Co, Zr	W, Mn, Mo, Cr, V, Mg, Ce, Te, B

Elementele din partea stânga șirului, favorizează procesul de grafitizare, iar cele din dreapta șirului îl frânează. Având în vedere numărul mare de elemente din compoziția chimică a fontei, acestea pot fi grupate în [19]:

- **elemente de bază** (C, Si, Mn, P, S);
- **elemente însoțitoare** (Sn, Sb, Zn, Pb, Bi, Te);
- **gaze** (O, N, H).

Carbonul și siliciul sunt elemente grafitizante cu cea mai mare importanță, variația lor determinând cele mai mari schimbări în structura fontelor. Carbonul se găsește în stare liberă (grafit) sau legat (cementită), iar siliciul se găsește dizolvat în ferită. La creșterea conținutului în carbon și siliciu, crește cantitatea de grafit și cea de ferită din structură și se înregistrează o scădere a rezistenței la tracțiune, precum și a durității fontelor [19].

Pentru conținutul de *siliciu se prevăd și anumite valori limită 2-3,5 %*. La creșterea siliciului peste aceste limite, conținutul de carbon din fontă se micșorează, iar la o creștere a conținutului acestuia peste 3 %, se obține o creștere a durității fontei în condițiile în care structura rămâne aceeași (ferită+grafit) [20].

Influența carbonului și a siliciului trebuie privită și în funcție de raportul dintre concentrațiile lor. La același grad de saturație în carbon, micșorarea raportului Si:C (crește carbonul) duce la scăderea rezistenței la tracțiune și a durității fontei.

În fontele cenușii, *manganul variază între 0,3-1,5 %, iar sulful între 0,03-0,15%*. **Manganul și sulful au o acțiune antigrafitizantă la solidificarea fontelor**. Influența antigrafitizantă a sulfului este cu atât mai mare cu cât conținutul de carbon și siliciu este mai redus.

Atât **manganul, cât și sulful au o acțiune perlitizantă**, favorizând transformarea austenitei în perlită, ceea ce determină creșterea gradului de dispersie al acesteia. Creșterea conținutului de mangan determină creșterea rezistenței la tracțiune, datorită acestei acțiuni perlitizante [19]. Proprietățile mecanice sunt influențate datorită acțiunii proporției de perlită din structură. **Duritatea fontei este mărită odată cu creșterea conținutului în mangan**, acestea fiind cu atât mai mare cu cât gradul de saturație în carbon al fontei este mai scăzut. *Creșterea sulfului conduce la scăderea rezistenței la tracțiune a fontelor cenușii* [19].

În fontele cenușii, *fosforul variază în limitele 0,1-1,5 %*. Acesta are rolul de a reduce solubilitatea carbonului în fontă, favorizând procesul de grafitizare. La solidificarea fontelor, **fosforul are o acțiune slab grafitizantă** ducând la o tendință de albire. În același timp, se constată și o finisare a grafitului, care se prezintă sub formă de lamele cu dimensiuni mai mici (scăderea lungimii lamelor de

la 250 la 200^μ, prin creșterea fosforului de la 0,1 la 0,25%). **Fosforul se manifestă ca un element slab perlitzant**, favorizând transformarea austenitei în perlită [19]. Fosforul influențează proprietățile mecanice ale fontei prin schimbări structurale, cum ar fi: *finisarea grafitului, creșterea proporției de perlită, formarea eutecticului fosforos și este un component dur și fragil*. Creșterea proporției de eutectic fosforos conduce la fragilizarea fontei, astfel că la o valoare critică a conținutului de fosfor, se constată o micșorare a rezistenței la tracțiune. În general, *valoarea critică a conținutului de fosfor este cuprinsă între 0,25-0,4%* [20].

În vederea obținerii unor fonte cu caracteristici superioare, acestea sunt supuse procedului de modificare care se poate realiza cu : Ca, Sr, Ba, Mg, Ce [21]. Particularitățile procesului de modificare sunt [19], [21]:

- *modificarea se obține prin introducerea în fonta lichidă a unor cantități mici de elemente sau combinații de elemente, în valoare de maximum 0,2% pentru fiecare element în parte;*
- *prin modificare se influențează forma și numărul separărilor de grafit, dar și dendritele primare de austenită, deci procedeul de modificare influențează structura primară;*
- *prin modificare nu se schimbă compoziția de bază a fontei;*
- *efectul de modificare dispare la menținerea fontelor în stare lichidă, în timp ce efectul de aliere se menține.*

În cazul fontelor cu grad de saturație scăzut în carbon, modificatorii trebuie să asigure nu numai compactizarea și mărirea numărului de separări de grafit, ci și mărirea tendinței de grafitizare a fontei. De aceea, **principalul modificador frecvent utilizat la elaborarea fontelor este ferosiliciu (FeSi)** [20].

3.2.2 Factorii care influențează turnarea fontelor

Viteza de răcire a pieselor turnate este determinată de viteza de transmitere a căldurii și depinde de [19]:

- **grosimea peretelui piesei;**
- **proprietățile termo-fizice ale formei de turnare;**
- **caracteristicile tehnologiei de turnare (temperatura, viteza de turnare, temperatura formei de turnare).**

La creșterea grosimii peretelui piesei turnate, viteza de răcire scade, iar cantitatea de grafit și gradul de grafitizare cresc. Creșterea cantității de grafit și mărirea dimensiunilor acestuia, precum și micșorarea cantității de perlită și a gradului său de dispersie fac ca odată cu creșterea grosimii peretelui să se înregistreze o micșorare a proprietăților mecanice ale fontei. *Micșorarea vitezei de răcire spre centrul piesei turnate conduce la scăderea în aceeași direcție, a cantității de perlită, respectiv la creșterea cantității de ferită* [19].

Viteza de răcire a piesei turnate este influențată și de *proprietățile termo-fizice ale materialului formei de turnare: conductibilitatea termică, căldura specifică, greutatea specifică, coeficientul de acumulare de căldură* [20].

Turnarea fontelor se poate realiza: în forme metalice și forme de grafit. Formele metalice reprezintă un mijloc de îmbunătățire a proprietăților mecanice ale fontei. Aceasta asigură o viteză de răcire ridicată, influențând atât structura, cât și proprietățile fontei. Această soluție de turnare se poate aborda în două cazuri [22]:

- *se urmărește o finisare a structurii;*
- *se urmărește obținerea unei piese cu crustă dură.*

Pentru obținerea unor piese turnate cu caracteristici superioare, un rol important îl are *încălzirea formei în momentul turnării*, acest lucru ducând la

micșorarea vitezei de răcire și preîntâmpinarea apariției cementitei libere sau a grafitului interdendritic. Temperatura de preîncălzire se recomandă a fi în jur de 250-350° C.

Viteza de răcire a fontei turnate mai este influențată și de viteza de turnare. *Creșterea vitezei de umplere a formei conduce la menținerea căldurii și a temperaturii fontei lichide, și prin aceasta, la scădere vitezei de răcire* [19], [22].

3.2.3 Proprietăți fizico-mecanice

Proprietățile fizico-mecanice ale fontelor joacă un rol important în asigurarea durabilității în exploatare a pieselor turnate [19]. Datorită cerințelor impuse discurilor de frână în exploatare, interesul se îndreaptă asupra proprietăților mecanice ale acestora.

Densitatea fontelor determină prelucrabilitatea acestora în exploatare. Această proprietate fizică este determinată de structura acestora, știind că nu toți constituenții structurali au aceeași greutate. În general, *densitatea fontelor este mare și scade cu creșterea carbonului echivalent. Pe de altă parte, creșterea densității determină creșterea rezistenței la tracțiune* [19].

Rezistența la șoc termic exprimă tendința pieselor turnate la fisurare în condiții de încălziri și răciri repetate [19].

Rezistența la șoc termic depinde de un număr mare de factori:

$$RST = f\left(\frac{\lambda, A, R}{\alpha, E}\right)$$

În care: λ - conductivitate termică; A-alungirea, R-rezistența la tracțiune; α - coeficient de dilatare liniară, E- modul de elasticitate longitudinal.

Asigurarea rezistenței la șoc termic este realizată de conductibilitatea termică care la rândul ei este influențată de structura acestora. *Din punct de vedere al structurii, ferita asigură cea mai bună conductibilitate termică a fontelor, iar din punct de vedere al compoziției chimice, grafitul este principalul component care conferă fontelor o conductibilitate termică ridicată* [19].

Rezistența la uzură este strict legată de procesul de uzare. Uzarea reprezintă un proces fizico-chimic complex de pierdere a greutateii sau de micșorare a dimensiunilor piesei, datorită frecării dintre două corpuri în mișcare care formează un cuplu de frecare. Distrugerea fontelor prin uzare depinde de tipul procesului de frecare (alunecare sau rostogolire) care poate avea loc în condiții de ungere, semi-ungere sau frecare uscată. Odată cu creșterea presiunii specifice și a vitezei de mișcare, se intensifică uzarea fontei [19], [22].

Influența compoziției chimice a fontei asupra rezistenței la uzare se manifestă mai ales prin modificarea corespunzătoare a structurii.

Creșterea conținutului de carbon în fonta cenușie, până la 3,4-3,8 % este utilă în cazurile în care se înlătură formarea grafitului interdendritic [22].

Siliciul, la concentrații până la 2-3 %, reduce uzura prin rostogolire și o mărește pe cea de alunecare [22].

Manganul până la 1,5%, micșorează puțin rezistența la uzură. La un conținut mai mare, acesta albește fonta, finisează structura sau formează structura martensitică, care mărește rezistența la uzură a fontei, măbind coeficientul de frecare [22].

Sulfur are o influență favorabilă asupra rezistenței la uzare, în special în cazul frecării uscate și a frecării de alunecare, prin mărirea cantității de carbon legat [22].

Fosforul, în limitele 0,3-1 %, are influență favorabilă și se manifestă atât în masa de bază feritică, cât și în cea perlitică, condiția de bază fiind separarea eutecticului fosforos sub forma unei rețele fine într-o bază perlitică solidă [22].

Cuprul are influența favorabilă asupra rezistenței la uzare, chiar la un conținut redus. Aceasta se explică, pe de o parte, prin separările lui submicroscopice, iar pe de altă parte prin reducerea oxidării masei metalice de bază. Totuși, acțiunea lui favorabilă se manifestă mai ales la frecarea prin alunecare [22].

În fonte, componenta structurală cea mai stabilă față de uzură este ferita. Stabilitatea ei poate fi ridicată prin aliere cu nichel, cupru și crom, care măresc rezistența la uzură și reduc oxidarea [22].

O influență favorabilă asupra rezistenței la uzură o are grafitul. Cea mai bună formă a grafitului este cea sub formă de lamele, care nu constituie o rețea. Grafitul fin, duce la scăderea rezistenței la uzare, deși acesta duce la o îmbunătățire a proprietăților mecanice. Totuși, nici o cantitate prea mare de grafit nu este recomandată din punct de vedere al uzării, deoarece prin finisare se formează pori mari care favorizează, la frecare, smulgerea de material din masa metalică de bază [22].

Literatura de specialitate a arătat că, uzura se micșorează proporțional cu creșterea până la o anumită limită a cantității de carbon legat în fonta cenușie [22]. În cazul fontelor fără cementită liberă în structură, pierderile în urma frecării uscate sunt determinate atât de componența masei metalice de bază, cât și de tipul grafitului, fig.3.1. În cazul fontelor cu grafit nodular, pierderile prin uzare sunt cele mai scăzute [19].

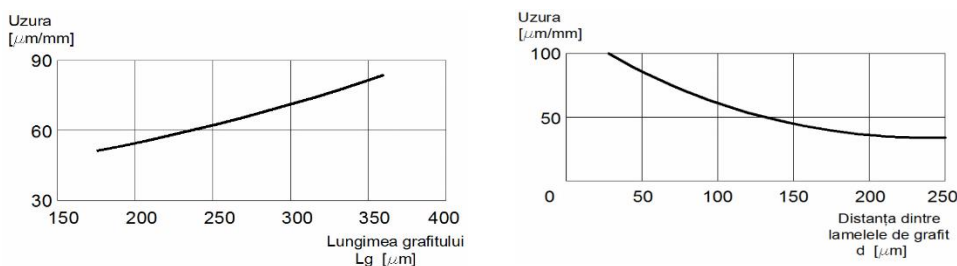


Fig.3.1 Influența lungimii lamelor de grafit și a distanței dintre ele asupra uzării fontelor [19]

Fontele pentru discurile de frână trebuie să aibă un coeficient de frecare ridicat ($\mu = 0,4 - 0,8$) pentru a asigura o distanță mică de frânare. Din acest punct de vedere se recomandă fonte perlitice cu grafit lamelar, cu eutectic fosforos sub formă de rețea [22].

Coroziunea duce la scăderea rezistenței pieselor, mai ales în cazul în care acestea sunt supuse la solicitări variabile [19]. Efectele coroziunii depind de un mare număr de factori interni și externi: compoziția chimică, structura și caracterul suprafeței, de prezența eforturilor și a deformațiilor, de compoziția, temperatura și mobilitatea mediului agresiv, precum și de prezența catalizatorilor [20]. **Rezistența la coroziune, depinde în mare măsură de compoziția chimică**, de aceea, alierea este un factor important de protecție împotriva coroziunii. Creșterea rezistenței la coroziune prin aliere se obține, fie prin introducerea de elemente cu potențial înalt, Cu, Ni, Mo, fie prin intermediul elementelor cu potențial scăzut, Cr, Si, Al, capabile să formeze straturi superficiale pasive [21], [22].

Siliciul, până la 3 %, nu modifică stabilitatea la coroziune a fontei în soluție de săruri și mărește coroziunea în acizi. La un conținut mai mare, stabilitatea la acizi crește [19], [20].

Influența manganului, în acizi și în apă, se manifestă slab, însă în limitele de 0,5-0,7 % se poate considera favorabilă, dar duce la creșterea densității fontei. La o proporție mai mare, se manifestă acțiunea sorbitizantă ceea ce duce la creșterea vitezei de coroziune [19].

Sulfur, contrar manganului, micșorează stabilitatea chimică a fontei în acizi [19].

Influența *fosforului* asupra stabilității la coroziune se explică prin faptul că eutecticul fosforos, la fel ca și grafitul, prezintă o rezistență mare la coroziune, însă formarea microelementelor suplimentare acționează în sens contrar [20].

Cromul are acțiune favorabilă, chiar la un conținut redus de 0,5 %, în deosebi în acizi și în apa de mare, datorită creșterii densității structurii și a reducerii gradului de grafitizare. La un conținut mare de crom, fonta devine stabilă din punct de vedere chimic [19].

Acțiunea favorabilă a *molibdenului* asupra stabilității la coroziune se manifestă numai în combinație cu alte elemente de aliere [22].

Din punct de vedere al coroziunii, structura ideală a aliajului este cea omogenă și monofazică, cum ar fi fonta maleabilă, datorită crusteii feritice omogene. Comparativ cu oțelul, fonta nu poate avea o structură monofazică, ea conține două componente structurale, soluția α sau γ , pe de o parte și grafitul sau carburile, pe de altă parte [22]. Din punct de vedere al uzării, cea mai favorabilă structură este cea perlitică, cu un grad de dispersie cât mai ridicat, fig.3.2 [20].

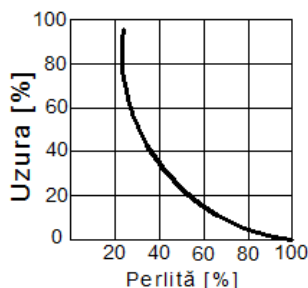


Fig.3.2 Influența cantității de perlită din structură asupra uzării fontelor [20]

În ceea ce privește forma, **cele mai favorabile sunt separările de grafit lamelar sau rotunjite, de mărime mijlocie, care nu se încrucișează. Cu cât este mai mare conținutul de carbon legat, cu atât este mai mare rezistența la coroziune** [22].

Duritatea-valoarea durezzații oferă indicații cu privire la plasticitate, rezistență la tracțiune, rezistență la uzură și prelucrabilitatea aliajelor. În cele mai multe cazuri, pentru măsurarea durezzații fontelor se folosește metoda Brinell. Influența structurii masei metalice de bază asupra durezzații fontei rezultă din următoarele date: structura feritică: 100-160HB; perlitică 160-220HB; sorbitică 220-300HB; bainitică 300-380 HB; martensitică 380-600HB; perlito-cementitică 380-550HB; martensito-cementitică 550-700 HB; austenitică 140-220 HB [20].

Alierea fontelor și mărirea gradului de dispersie duc la creșterea durezzații. În condițiile finisării perlitice are loc o creștere pronunțată a durezzații [19].

Fontele cu grafit nodular au o duritate mai mare decât fontele cu grafit lamelar, la aceeași structură, deoarece conțin mai mult siliciu și au separări de grafit mai compacte, iar fontele maleabile au aproximativ aceeași duritate ca și fontele cu grafit lamelar. Cu cât crește cantitatea de grafit, duritatea se micșorează, dar în măsură redusă [19].

Prelucrabilitatea prin aşchiere are importanță din punct de vedere economic, deoarece valoarea ei influențează costul piesei turnate, dar și al piesei finite, iar pe de altă parte are importanță tehnologică, deoarece influențează calitatea suprafeței, și prin aceasta, rezistența la oboseală, [19]. **Prelucrabilitatea este mult micșorată odată cu creșterea durității și scade cu creșterea cantității de perlită și a gradului de finisare a structurii** [20].

Carbonul și siliciul influențează prelucrabilitatea prin acțiunea grafitizantă, grafitul având o acțiune pozitivă. Influența favorabilă a siliciului se manifestă numai în ceea ce privește acțiunea lui grafitizantă, în cazul în care structura masei metalice de bază este stabilă, siliciul influențează puțin capacitatea de prelucrare. Pentru obținerea unor suprafețe prelucrate cu o rugozitate cât mai mică, se recomandă o cantitate mai redusă de grafit și o finisare avansată a structurii. Astfel, un rol important îl are modificarea fontelor, care determină creșterea gradului de uniformizare a structurii, îmbunătățind prelucrabilitatea [19].

Manganul, în limitele obișnuite și la un conținut de sulf până la 0,1 % influențează puțin prelucrabilitatea, dar la o valoare mai mare aceasta scade, datorită măririi durității și a apariției carburilor [19].

Fosforul peste 0,5 % scade în mare măsură prelucrabilitatea. De asemenea, forma grafitului are o influență mai mică asupra prelucrabilității la aceeași valoare a durității. Fonta cu grafit nodular are o prelucrabilitate mai bună decât fonta cu grafit lamelar, iar cea mai bună prelucrabilitate o au fontele maleabile [19].

Cuprul și a molibdenul au acțiune favorabilă asupra prelucrabilității, deoarece aceste elemente duc la creșterea omogenității fontei. Totuși, în unele cazuri, când la alierea fontei duritatea se mărește, capacitatea de prelucrare scade [19].

Rezistența la compresiune a fontelor este de 3-4 ori mai mare decât rezistența la tracțiune și este puțin afectată de prezența grafitului lamelar. *Modul de elasticitate la compresiune variază mai puțin cu creșterea sarcinii de compresiune* [20].

Capacitatea de amortizare a vibrațiilor la fonte constituie una din calitățile deosebite ale acestui material. Capacitatea de amortizare a vibrațiilor este influențată de structura fontelor, rolul principal avându-l grafitul [19]. Astfel, **creșterea carbonului echivalent, care conduce la mărirea cantității de grafit**, determină îmbunătățirea capacității de amortizare a fontelor [21].

Capacitatea de amortizare a vibrațiilor se poate determina fie prin raportul dintre mărimea pierderii de energie și întreaga cantitate de energie a ciclului, fie prin decrementul logaritmic λ care caracterizează diminuarea amplitudinii între două vibrații succesive liber amortizate, fig.3.3 [19].

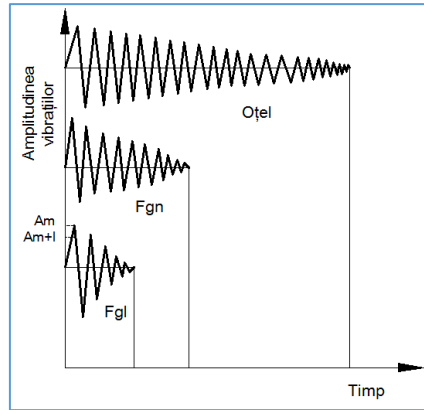


Fig. 3.3 Amortizarea vibrațiilor la fonte [19]

Decrementul logaritmic se determină cu relația, [19]:

$$\lambda = \ln \frac{A_m}{A_{m+1}} \quad (3.3)$$

Unde: A- amplitudinea vibrațiilor.

Pentru materialele prezentate în fig.3.3, cel mai bine amortizează vibrațiile fonta cu grafit lamelar, urmată de fonta cu grafit nodular [19].

3.2.4 Elaborarea fontelor în cuptoare cu inducție

3.2.4.1 Principiu de funcționare. Elemente componente

Cuptorul cu inducție fără miez de fier este format dintr-un creuzet ceramic înconjurat de o serpentină din țevă de cupru (inductorul) răcită cu apă, deci este un creuzet încălzit electric, respectiv un transformator cu inductorul ca circuit primar (cu n spire) și încărcătura metalică ca circuit secundar ($n_1=1$ spiră) [23]. Principalele elemente componente ale unui cuptor electric cu inducție se prezintă în fig.3.4 [23], [24].

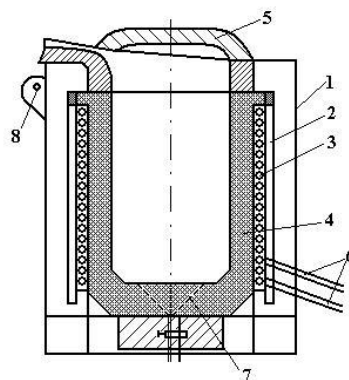


Fig.3.4 Schema unui cuptor electric cu încălzire prin inducție, cu creuzet [24]

1- carcasă; 2 - ecran magnetic; 3 - inductor; 4 - creuzet; 5 - capac; 6 - conducte pentru apa de răcire; 7 - sistem de semnalizare a avariilor; 8 - ochiul mecanismului de basculare

În încărcătură se produc curenți induși datorită câmpului electromagnetic variabil format în jurul inductorului, încălzirea făcându-se prin efectul Joule-Lenz al curenților turbionari induși. În cazul în care materialul este feromagnetic se adaugă, încălzirea prin efectul de histerezis până la punctul Curie [23], [25]. Creuzetul și inductorul sunt montate într-o construcție metalică (carcasă, manta), având un schelet din profile metalice cu îmbinări izolate pentru a se evita circuite electrice și magnetice închise, deci pentru a evita producerea de curenți induși. Creuzetul are pereți relativ subțiri: 100 mm la partea de jos și 50mm sus pentru capacități până la 1,4t, respectiv 130 mm și 90 mm pentru capacitatea de peste 1,4t și sunt mai groși pentru cuptoare mai mari. Acesta se execută de obicei din material refractar acid, silică și cuarțită cu peste 95%SiO₂, dar și din material bazic de regulă din magnezită. Pentru oțel obișnuit durabilitate de 100 șarje la 150 șarje cu întreținere bună [23], [24], [25]. Raportul între înălțimea și diametrul interior al creuzetului este de regulă cuprins între 0,5-1,0. Pentru H/D =1 se obțin cele mai mici pierderi de căldură prin căptușeala creuzetului.

Caracteristicile electrice și de funcționare ale cuptoarelor electrice cu inducție cu creuzet se prezintă în tabelul 3.3 [23], [25].

Tabelul 3.3. Caracteristicile electrice și de funcționare ale cuptoarelor electrice cu inducție cu creuzet [23],[25]

Capacitate [kg]	Frecvența de lucru [kHz]	Puterea generatorului [kW]	Timpul de topire [min]	Consumul specific de energie electrică [kW]
10	300-100	30-60	20-15	1500-2000
50	70-10	60-100	40-30	800-1000
250	3-2	150-250	60-50	700-800
500	2-1	250-500	70-60	600-800
1000	1-0,5	500-600	80-60	600-700
10000	0,5-0,05	2500-3000	100-90	580-620

3.2.4.2. Componenta și pregătirea încărcăturii

În fig.3.5 se prezintă fluxul tehnologic de elaborare a fontei în cuptorul electric cu încălzire prin inducție [23], [24].

La cuptoarele existente în dotarea laboratoarelor de specialitate, cu capacitate cuprinsă între 10-20 kg, încărcarea se face manual. La începutul topirii se lucrează cu tensiune maximă și intensitate redusă până se depășește punctul Curie (770 °C), după care se poate scădea tensiunea și mări intensitatea curentului electric, accelerându-se topirea, a cărei durată depinde de compoziția chimică, starea fizică a încărcăturii metalice, de instalația electrică și de calificarea personalului. Durata topirii este de 40-50min pentru cuptoarele cu capacitatea sub 0,5t și de 55-60 min pentru capacitate de 0,5-3t, iar în cazul cuptoarelor mai mari până la 120-130 min [23].

Cuptorul cu inducție este un agregat pentru retopire, nefiind indicat pentru procese de afinare, defosforare desulfurare, având în vedere faptul ca zgura se topește prin căldura preluată de la topitura metalică, deci nu este o zgură activă. Ca urmare, este de dorit ca baia metalică să aibă un conținut de carbon la terminarea topirii apropiat de cel final, de asemenea pe cât posibil compoziția băii trebuie să fie apropiată de cea finală, sau cel puțin la limita inferioară prevăzută de standard.

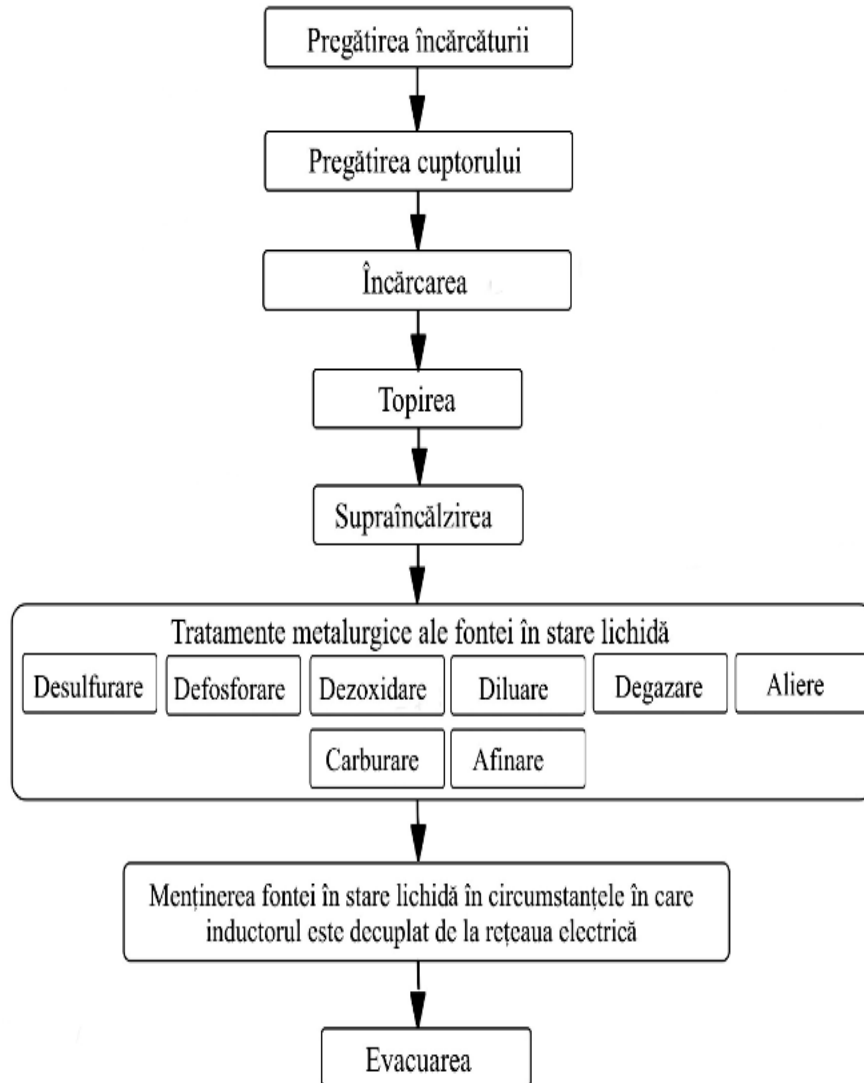


Fig.3.5 Schema fluxului tehnologic de elaborare a fontei în cuptoare cu inducție [23], [24]

Corecția compoziției chimice, respectiv alierea se face după terminarea topirii, prelevarea probei și cunoașterea compoziției chimice a acesteia. Se adaugă feroaliajele pentru dezoxidare și aliere în cantități rezultate din calculele tehnologice, înainte de adaos se îndepărtează zgura [24]. După dezoxidare și corecția compoziției chimice se menține fonta în cuptor fără curent sau cu curent redus la o treime, până când temperatura corespunde turnării. În fig.3.7 se prezintă fluxul tehnologic de elaborare al fontei în cuptorul electric cu încălzire prin inducție [23], [24]. Pentru turnare se basculează cuptorul, iar fonta curge pe jgheabul de evacuare în forma de turnare, lingotieră.

3.2.5 Evoluția cercetărilor în domeniul materialelor pentru discurile de frână

Discurile de frână trebuie să asigure transmiterea forței mecanice aplicată de la pedala de frână, precum și disiparea căldurii produse în procesul de frânare. În timpul decelerării la frânare, temperatura ansamblului disc-plăcuță de frână poate atinge valori apropiate de 700°C, aceasta depinzând de severitatea și de numărul frânărilor. Supraîncălzirea ansamblului disc-plăcuță de frână poate avea consecințe grave, reducând siguranța sistemului de frânare [9],[10]. Aceasta creează gradienti mari de temperatură în discul de frână, ceea ce duce la apariția fenomenului de oboseală termică. Datorită acestor acțiuni simultane, termice și mecanice, aplicate ciclic, se produce uzura discului de frână. Prin urmare, **în condiții reale de funcționare, discul este expus la o solicitare de oboseală termomecanică** [9],[13]. Din acest motiv, **materialele utilizate la realizarea discurilor de frână trebuie să prezinte o conductivitate termică și o difuzivitate ridicată, precum și o densitate scăzută.** De asemenea, materialele destinate fabricării discurilor de frână **trebuie să ofere un coeficient bun de frecare, caracteristici mecanice stabile la temperaturi ridicate în mediu umed, precum și rezistență ridicată la uzură** [7],[9], [10].

Din punct de vedere teoretic, mai multe materiale ar fi în măsură să îndeplinească cerințele pentru o performanță ridicată a discurilor de frână. Cu toate acestea, din cauza comportamentului metalurgic stabil, a costurilor mici și a posibilităților relativ simple de fabricație, **fonta este unul dintre materialele cel mai des folosite la fabricarea discurilor de frână** [13]. Cercetările efectuate în acest domeniu au arătat că **fontele preferate pentru fabricarea discurilor de frână sunt: cenușii cu grafit lamelar, nodular, vermicular** [13], [19].

La ora actuală, aliajele din fontă prezintă cel mai bun raport preț/cerințe impuse discurilor de frână pentru autovehicule. *Pentru producerea mai multor tipuri de fontă, încărcătura metalică care trebuie topită este de obicei compusă din fontă brută, fier vechi și feroaliaje(FeSi, FeMn, FeBr, FeV, etc). Toate elementele din aliaj tind să crească rezistența mecanică, iar cele mai eficiente sunt vanadiu, molibdenul și cromul* [19], [20], [21],[22].

De exemplu, cele mai utilizate aliaje pentru producerea discurilor de frână de către General Motors din Brazilia sunt fontele cenușii, cu sau fără alte elemente de aliere, așa cum se vede în tabelul 3.4 [13].

Tabelul 3.4. Compoziția chimică (%) din fontă cenușie folosită de General Motors Brazilia [13]

Element	Aliaj metalic			
	A	B	C	D
%C	3,20 - 3,60	3,20 - 3,60	3,60 - 3,80	3,70 - 3,90
%Si	1,90 - 2,40	1,90 - 2,40	1,80 - 2,20	1,75 - 1,95
%Mn	0,60 - 0,90	0,60 - 0,90	0,60 - 0,80	0,50 - 0,80
%P	Max. 0,20	Max. 0,10	Max. 0,10	Max. 0,10
%S	Max. 0,12	Max. 0,10	Max. 0,12	Max. 0,13
%Cr	-	0,25 - 0,40	0,10 - 0,25	Max. 0,20
%Mo	-	0,40 - 0,50	0,30 - 0,60	Max. 0,10
%Cu	-	-	0,30 - 0,45	Max. 0,40

Fontele prezintă o excelentă conductivitate termică, ceea ce facilitează disiparea căldurii generate prin frecarea cu plăcuțele de frână, precum și o bună capacitate de amortizare a vibrațiilor [13]. Una dintre modalitățile de *îmbunătățire a capacității de transfer de căldură* este reprezentată de **creșterea difuzivității termice**, care reprezintă parametrul fundamental la proiectarea frânelor. Difuzivitatea termică poate fi utilizată pentru a calcula conductivitatea termică, care este o măsură a modului eficient de transmitere a căldurii prin discuri, în procesul de frânare. *Discurile de frână cu conductivitate termică îmbunătățită prezintă o creștere considerabilă a rezistenței la oboseală termică, ceea ce face posibilă creșterea duratei lor de viață* [9], [13]. **Deci, în selecția materialelor pentru discurile de frână de o importanță majoră sunt difuzivitatea termică și conductivitatea termică, deoarece discurile trebuie să realizeze simultan atât transferul, cât și disiparea căldurii rezultată prin transformarea energiei cinetice în energiei termică** [26]. Acest lucru facilitează disiparea căldurii generate prin frecarea dintre acestea și plăcuțele de frână în timpul frânării autovehiculului, iar pe de altă parte, oferă și o capacitate mare de amortizare a vibrațiilor, care sunt principalele caracteristicile ale acestui component al sistemului de frânare [10], [13], [19].

Discurile de frână cu conductivitate termică îmbunătățită prezintă o creștere a rezistenței la oboseală termică, făcând posibilă creșterea duratei de funcționare a acestora [28].

Principali factori care influențează transferul de căldură din fontă sunt distribuția, mărimea și morfologia tipului de grafit, deoarece grafitul distribuit sub formă de lamele are o conductivitate termică mult mai mare decât matricea de bază [13], [27].

Conductivitatea termică a fontei este proporțională cu raportul dintre suprafața și volumul său. Astfel, fonta cu grafit nodular, fig.3.6a, asigură un transfer termic mai mic decât fonta cu grafit vermicular, fig.3.6b. Aceasta, la rândul ei, asigură un transfer termic mai mic decât structura perlitică, cu lamele de grafit fig.3.6c [13], [27].

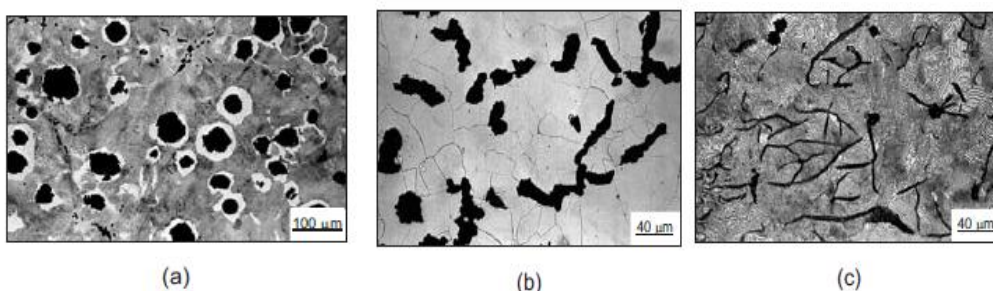


Fig. 3.6a Fontă cu structură perlitică cu noduli de grafit inserați într-o matrice feritică -atac nital 2%;
b-Fontă cu grafit vermicular- atac nital 2%
c-Fontă cu matrice perlitică cu lamele de grafit -atac nital 2% [13], [27]

În literatura de specialitate s-a arătat că, conductivitatea termică a fontei este proporțională cu nodulii de grafit [13], [28]. De asemenea, s-a observat că **difuzivitatea termică a fontei cenușii este influențată de carbonul echivalent** (lungimea maximă a lamelilor de grafit) fig.3.7 [13], [29].

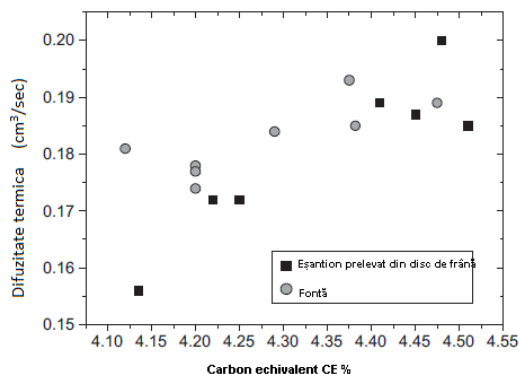


Fig.3.7 Dependența difuziei termice în funcție de echivalentul de carbon (CE), în cazul în care $CE = \% C + 1/3 (\% Si + \% P)$ [13], [29]

Creșterea carbonului sau a CE este cea mai rapidă modalitate de îmbunătățire a fontei cenușii grafitizată. S-a observat că, o creștere cu 25 % a difuzivității în discurile de frână se obține odată cu o creștere a carbonului echivalent CE cu 0,40 % [30].

Hecht și colaboratorii săi în anul 1999 au observat că în fonta cenușie difuzia se reduce odată cu creșterea temperaturii până la 500°C. Peste această temperatură, difuzia ridicată poate fi atinsă prin controlarea procesului de turnare a discurilor de frână din fontă cenușie cu lamele de grafit mai lungi [29].

Valoarea difuzivității într-o structură feritică este mai mare decât cea prezentată într-o structură perlitică. Astfel, **cel mai bun material pentru producția discurilor de frână ar fi fonta cenușie care prezintă lamele de grafit mai lungi într-o matrice feritică de bază.** Acest lucru nu este adevărat, deoarece miezul influențează difuzia în mică măsură [31], [32], iar discul trebuie să prezinte o rezistență mecanică ridicată, respectiv o rezistență la abraziune mărită. Acesta este motivul pentru care majoritatea discurilor de frână utilizate la autoturisme sunt produse din fonta a căror microstructură conține lamele de grafit într-un miez perlitic. *Perlita, compusă din lamele intercalate de forme de ferită și cementită (Fe_3C) are o rezistență mecanică mai mare* [32].

Cho și colaboratorii au investigat caracteristicile fontei cenușii cu privire la cantitățile de bază de grafit și ferită, precum și perlita ca micro-constituent. Aceștia au controlat microstructura prin variația cantității de carbon, estimată prin carbonul echivalent și viteza de răcire. Ei au observat că, cantitatea de ferită liberă și cantitatea de perlită din discul de fonta cenușie nu afectează coeficientul de frecare. În plus, **creșterea procentuală a coeficientului de frecare are loc cu cât suprafața cu grafit este mai mare** [13], [33].

Pentru a evita producerea discurilor din fontă cenușie cu compoziție chimică identică și proprietăți mecanice diferite este necesar ca viteza de solidificare la fiecare șarjă produsă să fie aceeași, astfel încât microstructura să nu se modifice. Ca o consecință, parametrii de turnare, trebuie să fie strict controlați la fiecare nouă producție [19], [20].

La ora actuală, cunoscând modul în care morfologia grafitului influențează transferul de căldură, este posibil să se analizeze modul în care variază parametrii de turnare ai discurilor de frână, ceea ce poate duce la schimbarea performanțele acestora. În prezent, există programe de calculator capabile să măsoare parametrii

morfologici ai lamelelor de grafit, analizând imagini în două dimensiuni, fig.3.8. De asemenea, *cu cât lungimea lamelelor de grafit este mai mare, cu atât difuzivitatea și conductivitatea sunt mai mari* [13], [19], [29].

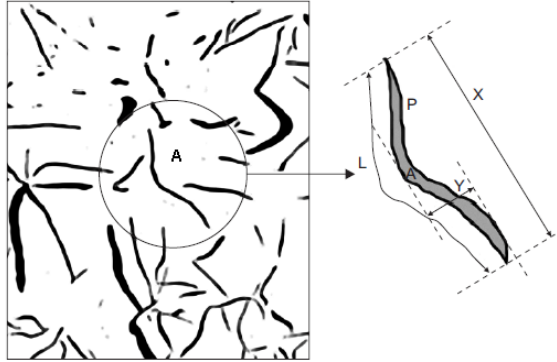


Fig.3.8 *Reprezentarea schematică a parametrilor care caracterizează morfologia lamelelor de grafit* [13],[29]

P - lungimea perimetrului forme de grafit, A - zonă de grafit, L - lungime efectivă a forme de grafit, X - axa mare a forme lamelelor de grafit, Y - axa secundară a forme lamelelor de grafit

În cazul în care compoziția chimică este modificată prin adăugarea de elemente de aliere, proprietățile mecanice vor fi schimbate. Astfel, **pentru a modifica proprietățile mecanice, cei mai importanți factori asupra cărora se poate acționa sunt: perioada de răcire și compoziția chimică a fontei** [21].

Rhee și colaboratorii au subliniat că o *modificare a compoziției chimice a discului de frână, afectează foarte puternic atât proprietăți mecanice cât și limitele de uzură ale acestuia* [34].

Libsch & Rhe au arătat că *mici schimbări la nivelul elementelor de aliere, modifică limitele de uzură ale discului de frână* [35].

Anderson a arătat că lamellele subțiri de grafit au rolul de a reduce proprietățile de uzură ale discului [36].

Tabelul 3.5. Compoziția chimică a discurilor de frână conform normelor ASTM A 150 [38]

ASTM A 159	Fontă	Clase	Compoziție chimică %					Duritate HB
			C	Si	Mn	S	P	
		G1800	3,4-3,7	2,3-2,8	0,5-0,8	0,15	0,25	187
		G 2500	3,2-3,5	2,0-2,4	0,6-0,9	0,15	0,20	170-229
		G 3000	3,1-3,4	1,9-2,3	0,6-0,9	0,15	0,15	187-241
		G 3500	3,0-3,3	1,8-2,2	0,6-0,9	0,15	0,12	207-255
		G 4000	3,0-3,3	1,8-2,1	0,7-1,0	0,15	0,10	217-269

Zhang și colaboratorii au studiat proprietățile tribologice ale fontei din punct de vedere al concentrației de fosfor și a morfologiei grafitului. Astfel, *s-a observat că fonta cu fosfor și grafit cu structură vermiculară, prezintă coeficientul de frecare cel mai ridicat și uzură redusă* [37].

În ceea ce privește normele în vigoare, compoziția chimică a discurilor de frână pentru autovehicule conform ASTM A 159 se prezintă în tabelul 3.5 [38].

Aspectele importante ale discurilor includ **duritatea, grosimea și zona de frecare** [13]. Datorită forțelor mecanice exercitate asupra lor de către plăcuțele de frână, discurile trebuie fabricate din materiale cu *duritate mare, iar din punct de vedere al grosimii, ele trebuie să aibă o grosime constantă*, deoarece diferențele de grosime pot avea efecte nedorite asupra sistemului de frânare. De asemenea, acestea trebuie să fie *perfect plane*, deoarece orice bătaie laterală a discului în timpul utilizării poate provoca frânarea involuntară. Pe de altă parte, discul de frână poate avea multe forme sau modele, acestea afectând greutatea și rezistența acestuia. Forma discului de frână și proprietățile fizice pot afecta performanțele de frânare și pot cauza vibrații, pierderi de material în timpul opririi și zgomot [34], [39]. Acest lucru se întâmplă pentru că proprietățile fizice ale fontei cenușii, cum ar fi conductivitatea termică, coeficientul de dilatare termică și căldura specifică se modifică în funcție de fazele prezente în structura acesteia [39], [40].

Un material utilizat la fabricarea discurilor de frână este **fonta aliată cu titan**, element care mărește rezistența acestuia la uzură, dar reduce coeficientul de frecare, care poate fi o problemă majoră atunci când distanța de frânare este redusă. Figura 3.9 prezintă reducerea coeficientului de frecare cu creșterea procentului de titan în discul de frână [7], [13].

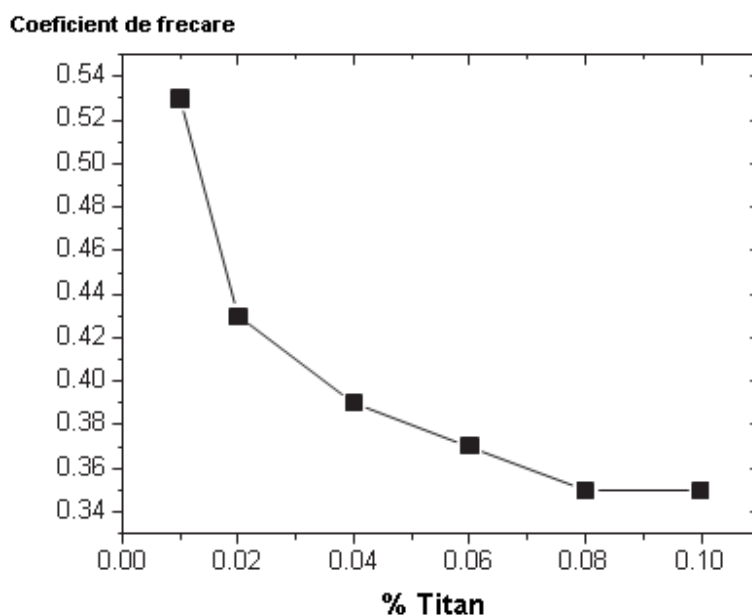


Fig.3.9 Variația coeficientului de frecare în funcție de procentul de Ti din fonta pentru discurile de frână [7], [13]

Aliajele de aluminiu care conțin carbură de siliciu pot fi, de asemenea, utilizate la realizarea discurilor de frână, deoarece acestea au o densitate scăzută, dar nu disipă căldura la fel de bine ca și fonta cenușie obișnuită [9], [41], [42].

În cazul autovehiculelor de înaltă performanță se utilizează **discuri de frână ceramice care asigură performanțe mult mai bune decât cele metalice sunt mai ușoare, dar au preț de cost mai mare**. În ultimele decenii, o mare atenție a fost acordată îmbunătățirii performanței discurilor de frână în ceea ce

privește comportamentul lor atunci când există frecare cu plăcuțele de frână. Acest efort a dus la dezvoltarea de noi materiale, cum ar fi: aliaje neferoase pe bază de cupru, compozite pe baza de aluminiu, compozite cu matrice de carbon [43], [44]. Cu toate acestea, fonta cenușie este încă foarte utilizată la fabricarea discurilor de frână ale autovehiculelor, deoarece, în afară de a avea proprietăți fizice și mecanice bune, are un preț de cost redus și prezintă o tehnologie de fabricație nu foarte complicată. Există și alte tipuri de materiale care sunt folosite pentru condiții de frânare de înaltă performanță, cum ar fi materialele compozite. Ele prezintă performanțe excelente în ceea ce privește transferul de căldură, dar costul de fabricație relativ mare face ca acestea să nu fie folosite pentru toate tipurile de autovehicule [43], [44].

Din punct de vedere tehnologic, de-a lungul timpului s-au realizat un număr mare de experimente, mai ales după anul 1938. Cu toate acestea, evoluția în dezvoltarea de noi materiale pentru discurile de frână se bazează pe modelare, motivația fiind costurile reduse, cât și timpul relativ scurt care ne permite obținerea unor rezultate optime. În modelare, se încearcă să se estimeze comportamentul discului de frână, precum și durata lui de viață, sub influența mai multor parametri care pot apărea în funcționarea reală. Cu toate că acest tip de analiză prezintă rezultate satisfăcătoare sunt necesare teste și determinări experimentale pentru validarea acestora, adică este necesară studierea comportamentului real, în defavoarea condițiilor virtuale. În acest context, ***la ora actuală analizele, studiile și cercetările experimentale sunt îndreptate spre dezvoltarea materialelor și a tehnologiilor utilizate la fabricarea discurilor de frână.***

3.3. Utilizarea materialelor compozite la fabricarea plăcuțelor de frână

3.3.1. Elemente componente ale plăcuțelor de frână

Plăcuțele de frână sunt o componentă importantă în cadrul sistemului de frânare al autovehiculelor. Acestea sunt de diferite tipuri, iar alegerea lor se face în funcție de: *tipul autovehiculului, tipul motorului și caracteristicile generale prevăzute în standardele aflate în vigoare* [45].

Principalele părți componente ale plăcuțelor de frână sunt, fig.3.10 [45]:

- ***1-materialul de fricțiune*** care este o mixtură de materiale, fiecare component având o anumită concentrație stabilită în mod individual pentru fiecare tip de autovehicul;
- ***2-strat intermediar*** care are rolul de a asigura confortul, siguranța, izolarea fonică și influențează compresibilitatea plăcuței de frână;
- ***3-adeziv*** care asigură îmbinarea suportului plăcuței cu materialul de fricțiune și are rolul de a oferi o rezistență la forfecare, asigurând ca materialul de fricțiune să nu se desprindă de pe suport nici în cele mai solicitante situații;
- ***4-cadru principal*** are rol în asigurarea unei funcționări sigure a etrierului și a pistonului; în legătură cu acesta există prevederi stricte legate de toleranță;
- ***5-strat de amortizare*** se realizează din cauciuc material plastic sau plăcuțe metalice.

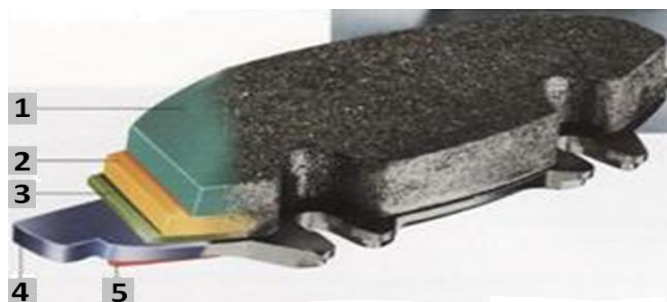


Fig.3.10 Ansamblul plăcuței de frână [45]

3.3.2. Tipuri de plăcuțe de frână

Tipologia plăcuțelor de frână depinde de materialul din care acestea sunt realizate. În ceea ce privește gama materialelor utilizate la fabricarea plăcuțelor de frână, acestea variază de la azbest la formule organice și metalice. Fiecare astfel de material are avantaje și dezavantaje legate de folosirea în anumite condiții de mediu, uzură și zgomot [45].

La început, plăcuțele de frână erau realizate din azbest, ca material de fricțiune. Acesta este un silicat de calciu și magneziu care are proprietatea de absorbție și disipare a căldurii rezultate în procesul de frânare. În timpul frânării însă inhalarea prafului de azbest produce boli grave [45]. Prin urmare, constructorii au fost nevoiți să recurgă la materialele organice, cum ar fi: cauciucul, Kevlarul (fibră polimerică organică), pe care le-au combinat cu rășini rezistente la degajări calorice [44], [45].

Principalele tipuri de plăcuțe de frână existente la ora actuală sunt [45]:

- **plăcuțe de frână organice;**
- **plăcuțe de frână semi-metalice (sinterizate);**
- **plăcuțe de frână metalice;**
- **plăcuțe de frână ceramice.**

Plăcuțe organice - conțin metale în proporție mai mică de 30 %. Avantajele acestora constă în faptul că sunt ecologice, ușor de reciclat, sunt silențioase datorită durității mici a materialului, însă se uzează mai repede, ceea ce implică înlocuirea lor la intervale relative scurte de timp. Coeficientul de frecare variază între 0,3 și 0,5. De asemenea, ele provoacă uzură mai mică asupra discului de frână. Ca dezavantaje, acestea prezintă rezistență scăzută la uzură și temperatură de funcționare scăzută. Plăcuțele de frână organice sunt folosite la autovehiculele mici, cu performanțe medii, fiind total neindicat pentru modelele sportive sau vehiculele de mare tonaj. Un alt dezavantaj al acestora este faptul nu au o comportare bună în condiții de umiditate [45].

Plăcuțe semi-metalice au în componența lor materiale care asigură un bun transfer al căldurii: cuprul, aluminiul, oțelul și grafitul, conținut care poate varia de la 30% până la 40%. Acestea, în combinație cu alte materiale permit un transfer de căldură eficient. Datorită conținutului de metal, durabilitatea plăcuțelor este semnificativ mai mare. De asemenea, disiparea căldurii este îmbunătățită, deoarece conținutul metalic permite un transfer termic mai eficient între materialul plăcuței și plăcuța suport. Avantajul major al acestui tip de plăcuțe de frână constă în faptul că au o durată de utilizare mare, în condițiile unor performanțe ridicate și au capacitatea de a menține coeficientul de frecare la temperaturi ridicate.

Dezavantajele principale ale acestora sunt: zgomotul crescut în timpul utilizării, greutate mare, iar funcționarea optimă se obține după ce acestea se încălzesc. Pe de altă parte, datorită faptului că materialul de fricțiune este mai dur, discurile de frână se pot uza mai repede [45].

Plăcuțele de frână metalice au în componența lor materiale dure, oțel, cupru, grafit, în proporție de 65 % care în combinație cu alte materiale permit un transfer termic eficient. Acestea dezvoltă zgomot mare, se uzează mai repede, rezultând o mare cantitate de particule de praf fin, care sunt atrase de metalul din jantă și din ansamblul sistemului de frânare. Rezultă astfel o depunere de culoare neagră pe interiorul jantei și a etrierului. Ele funcționează optim atât la o temperatură joasă, cât și la una înaltă [45].

Plăcuțele ceramice sunt realizate din fibre ceramice și cupru care are caracteristici foarte bune în ceea ce privește transferul termic. Avantajele sunt multiple și se referă la durata de utilizare îndelungată, greutate redusă, răcire eficientă și rapidă, produc mai puțin praf, au o funcționare silențioasă, dar dezavantajul major este reprezentat de prețul de cost ridicat. Nu se utilizează la autovehiculelor medii și grele, ele fiind folosite intens în domenii în care frânarea este bruscă și generează temperaturi extreme (în special mașinile pentru Formula 1) [45].

Observație: Pentru autoturismele ușoare, cu performanțe mici, specialiștii recomandă plăcuțele de frână din materiale organice.

3.3.3. Conceptul de material compozit. Clasificare

Evoluția tehnicii în domeniul ingineriei autovehiculelor a fost și este posibilă concomitent cu apariția de materiale și tehnologii moderne, și cu capacitatea de utilizare a procedeelelor complexe de analiză și calcul analitic, materialele compozite reprezentând viitorul în acest domeniu [6].

Materialele compozite sunt materiale a căror dispunere structurală internă, atât în ceea ce privește înlănțuirea lor moleculară, cât și prin direcții preferențiale, o conține omul, luând în considerație destinația acestora. Concepția acestora conferă rezistență superioară componentelor care sunt realizate din aceste materiale [43].

Obținerea materialelor compozite s-a impus pe baza a numeroase considerente tehnice și economice [43]:

- **necesitatea realizării unor materiale cu proprietăți superioare materialelor tradiționale;**
- **necesitatea creșterii siguranței și a fiabilității în exploatarea a reperelor din componența autovehiculelor;**
- **posibilitatea reducerii consumurilor de manoperă și a reducerii duratelor tehnologice de fabricație.**

Din punct de vedere tehnic, noțiunea de materiale compozite se referă la materialele care posedă următoarele proprietăți [43]:

- *sunt create sintetic, prin combinarea diferitelor componente;*
- *reprezintă o combinație a cel puțin două materiale diferite din punct de vedere chimic, cu proprietăți anizotrope, între care există o suprafață de separație distinctă, numită interfață;*
- *prezintă proprietăți pe care nici un component luat separat, nu le poate avea.*

Avantajul major al compozitelor constă în posibilitatea modelării proprietăților și obținerea unei game foarte variate de materiale, a căror utilizare se poate extinde în aproape toate domeniile de activitate.

Structura materialelor compozite este schematizată în fig.3.11 [2]. **Materialul de bază** se numește **matrice** și reprezintă faza continuă a materialului compozit. Celălalt constituent poartă numele de **armătură** (ramforsare) și se adaugă pentru a-i îmbunătăți sau modifica proprietățile. Armătura poate fi sub formă de fibre sau particule și reprezintă faza discontinuă, distribuită uniform în întregul volum al matricei. Pe lângă aceste componente de bază, în materialul compozit găsim și **adaosuri tehnologice** [2].

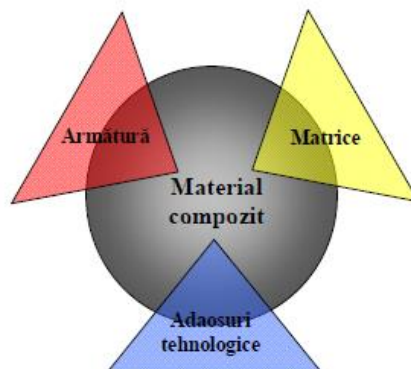


Fig.3.11 Structura materialelor compozite [2]

Funcția matricei este de a asigura un mediu relativ rigid care să fie capabil să transfere efortul spre componentii fibroși ai materialului. Matricea înglobează armătura. Funcția armăturii dintr-un material compozit este de a prelua efortul încărcării transferat prin matrice. Atât matricea cât și armătura, pot fi obținute din diferite tipuri de materiale [6]. În formularea materialelor compozite, un aspect important în combinarea matricei cu armătura este realizarea între acestea a unei legături chimice. Adaosurile tehnologice au rol de catalizator și de protecție împotriva razelor ultravioletole [1], [2], [4].

Materialele compozite fac parte din categoria „materialelor noi” și sunt create pentru a răspunde unor exigențe în ceea ce privește [2]:

- rezistența la acțiunea agenților chimici;
- rezistența la coroziune;
- rezistența mecanică și rigiditatea;
- rezistența la solicitări variabile;
- rezistența la șoc și la uzură;
- stabilitatea dimensională;
- greutatea scăzută.

Clasificarea materialelor compozite se poate face în funcție de mai multe criterii.

a. Din punctul de vedere al tipului materialul matricei, se disting [6]:

- materiale compozite cu matrice polimerică - Polymer Matrix Composites (PMC);
 - compozite cu matrici polimerice termoplastice (polietilenă, polisulfati, policarbonati, poliamide), termorigide (rășini fenolice, epoxidice, poliesterice nesaturate) și elastomeri (etilenă, propilenă, silicon);
 - compozite cu matrice carbonice obținute din carbon și grafit.

- *materiale compozite cu matrice metalică* -Metal Matrix Composites (MMC);
- *materiale compozite cu matrice ceramică* - Ceramic Matrix Composites (CMC) ;
- *materiale compozite cu matrice carbon -carbon* - Carbon-Carbon Composit (CC).

Compozitele cu matrice polimerică sunt folosite mai ales în aplicații care implică temperaturi relativ joase de lucru (ajungând, în mod excepțional, pentru termoplastice fabricate prin injecție, la nivelul maxim de 400 °C) [44].

Compozitele cu matrice metalică – cel mai frecvent se bazează pe aliaje de aluminiu, magneziu, titan, nichel sau cupru, în care se introduc fibre de bor, de carbon (grafit) sau ceramice (de obicei de alumină sau carbură de siliciu). Temperatura de lucru a unui astfel de compozit este limitată de nivelul punctului de înmuiere sau de topire care caracterizează materialul matricei. Dacă aplicația avută în vedere implică temperaturi mari, atunci se recomandă folosirea ca matrice a unor aliaje pe bază de nichel. Dezavantajul acestora este faptul că au greutatea specifică mari, ducând la creșterea masivității structurii finale [44].

Compozitele cu matrice ceramică – au fost dezvoltate în mod special pentru aplicațiile cu temperaturi foarte ridicate de lucru (peste 1000 °C); cele mai utilizate materiale de bază sunt carbura de siliciu (SiC), alumină (Al₂O₃) și sticla, iar fibrele de armare uzuale sunt tot de natură ceramică (de obicei sub formă de fibre discontinue, foarte scurte) [44].

Compozitele "carbon-carbon" – cu matrice de carbon sau de grafit și armare cu fibre sau țesături de fibre de grafit; sunt foarte scumpe, dar și incomparabile cu alte materiale datorită rezistenței la temperaturi înalte, prezintă o densitate mică și coeficient mic de dilatare termică. Cele mai răspândite sunt compozitele armate cu fibra de carbon, fibra de sticlă și Kevlar-ul. Se utilizează în industria aerospațială și la mașinile de Formula 1 [44].

b. Din punctul de vedere al tipul materialului de armare [6]:

- *materiale compozite armate cu particule* – la care dimensiunea principală a componentei de armare este mică în comparație cu dimensiunile structurii;
- *materiale compozite armate cu fibre*–la care dimensiunea principală a componentei de armare este de același ordin de mărime cu dimensiunile structurii.

c. După tipul, geometria și orientarea fazei de ranforsare [6].

- cu întărire particulară;
- cu fibre discontinue și whiskers;
- cu fibre continue.

3.3.4. Proprietățile materialelor compozite

Materialele compozite nu există în stare naturală, ci sunt produse sintetic pentru a răspunde unor exigențe bine definite. **Printr-o alegere corespunzătoare, atât calitativ, cât și cantitativ a materialelor componente se pot realiza materiale compozite cu proprietăți superioare materialelor tradiționale** [1], [2].

Materialele compozite sunt realizate prin combinarea, la scară microscopică, a cel puțin doi constituenți. Legăturile mecanice și chimice, care apar între matricea și armătura compozitului dau naștere unui material al cărui ansamblu de proprietăți este superior constituenților luați separat. Din acest motiv, *proprietățile materialelor*

compozite sunt influențate de proprietățile materialelor constituate, de fracțiunea volumică a componentei de armare, de orientarea armăturii în compozit, etc. [46].

Din punct de vedere fizic și geometric aceste materiale pot fi [46]:

- *omogene* - proprietățile sunt aceleași în orice punct din volumul materialului și sunt independente de poziția față de axele tensiunilor principale;
- *eterogene* - proprietățile acestuia variază de la un punct la altul sau depind de poziția punctului analizat;
- *izotrope* - proprietățile sunt aceleași în toate direcțiile sau sunt independente de orientarea axelor de referință;
- *anizotrope/ortotrope* - proprietățile sale variază cu direcția sau depind de orientarea axelor de referință. Dacă proprietățile materialului de-a lungul oricărei direcții sunt aceleași ca și cele de-a lungul direcției simetrice față de un plan, atunci planul se numește planul de simetrie al materialului. Un material fără nici un plan de simetrie se numește *anizotrop*.

Performanța structurală a materialelor compozite se prezintă în tabelul 3.6

[46].

Tabelul 3.6. Performanța structurală a materialelor compozite [46]

Proprietate	Material			
	Metal	Ceramic		Polimeric
		Volumic	Fibră	
Rezistență la rupere	+	-	V	+
Rigiditate	++	V	++	-
Rezistență la șoc	+	-	V	+
Alungire	+	-	++	V
Duritate	+	+	+	-
Stabilitate dimensională	+	V	+	-
Stabilitate termică	V	+	++	-
Densitate	-	+	+	++
Rezistență la coroziune	-	V	V	+
Rezistență la eroziune	+	+	+	-
Higroscopie	V	V	V	+

++ superior, + bună, - slabă, v -variabilă.

Cele mai multe termoplaste posedă proprietăți bune la compresiune, ceea ce face ca limitările impuse în utilizarea lor, să fie rare [46]. În tabelul 3.7 se prezintă rezistențele la compresiune a unor termoplaste [46].

În conceperea unui material compozit se urmărește obținerea unei rezistențe și a unei rigidități mari, raportate la unitatea de greutate, parametrii exprimați prin două caracteristici: rezistența specifică și modulul specific [46]. Rezistența specifică este raportul dintre rezistența la tracțiune și densitate, iar modulul specific reprezintă raportul dintre modulul de elasticitate și densitate. Modulul specific cel mai mare îl au materialele care au un număr atomic mic și legături atomice covalente în structură, așa cum este cazul grafitului și al borului.

Tablul 3.7. Valorile rezistențelor la compresiune pentru unele materiale compozite [46]

Tipul rășinii	Rezistența la compresiune [MPa]
Acrilonitril-butadien-stiren (ABS)	48
ABS armat cu 20% fibre de sticlă	62
Poliamidă PA 6/6	34
Policarbonat (PC)	86
Policarbonat (PC) armat cu 10% fibre de sticlă	96
Polipropilenă (PP)	21
Polieterul de fenilen (PPE) modificat ptr. impact	110
Polistiren (PS) de uz general	83
Polistiren (PS) modificat ptr. impact	44

Lungimea fibrei influențează proprietățile mecanice ale compozitelor cu fibre. În vederea obținerii unei durificări și a unei rigidizări efective a materialului compozit este necesară o lungime critică a fibrelor, aceasta fiind de 1mm. Pe de altă parte, **orientarea fibrelor** în materialul compozit influențează durtitatea și proprietățile mecanice. Alinierea fibrelor poate fi paralelă cu axele lungi ale fibrelor într-o singură direcție sau acestea pot avea o aliniere total dezordonată. *Alinierea fibrelor duce la obținerea unor proprietăți puternic anizotrope în compozit, ele depinzând de direcția în care sunt măsurate.*

O **cerință esențială la utilizarea fibrelor în materialele compozite** este ca **matricea să adere cât mai bine la suprafața fibrelor, fără să apară procese puternice de interacțiune** [46].

Integritatea structurală a materialului compozit asigură performanțe ridicate pieselor realizate din aceste materiale. Caracteristicile materialelor compozite se reduc din cauza concentratorilor de tensiuni, ca și în cazul metalelor, dar și din cauza unor deteriorări. Deteriorările materialelor compozite sunt numeroase, dar diferite față de cele ale metalelor și pot fi [2]:

- **deteriorări proprii compozitului**, apărute în timpul realizării acestuia;
- **deteriorări dobândite**, cauzate de solicitările la care sunt supuse reperele realizate din aceste materiale.

Deteriorările proprii, apărute în timpul realizării compozitului, sunt legate de defecțiunile materialelor constituente, dar și de tehnologia de fabricație. Aceste deteriorări sunt produse de neomogenitatea constituenților, cantitate insuficientă de liant, goluri (pungi de aer) sau alte imperfecțiuni în structură, dar și din cauza sculelor neadecvate sau incorect folosite [2].

Deteriorările dobândite sunt produse de sarcinile care acționează asupra pieselor realizate din materialele compozite sau de acțiunea factorilor de mediu. Aceste deteriorări se datorează solicitărilor statice, care pot fi: întindere–compresiune, încovoiere, forfecare sau torsiune, dar și din cauza oboselii structurii. Ele pot apărea instantaneu sau pot fi rezultatul cedării progresive a materialului [2].

Calitatea pieselor din materiale compozite se apreciază după următoarele criterii [43]:

- *reproductibilitatea raportului volumetric dintre matricea polimerică și agentul de ranforsare;*
- *omogenitatea materialului apreciată prin lipsa incluziunilor gazoase;*

- *starea suprafeței;*
- *stabilitatea și precizia dimensională;*
- *rezistența mecanică și termică a materialului.*

3.3.5. Efectul materialelor compozite asupra mediului

Tehnologia materialelor joacă un rol important în dezvoltarea domeniului autovehiculelor. Numeroase exemple arată că ***tehnologiile îndreptate în sensul reducerii greutății, a creșterii confortului și a gradului de reciclabilitate, pot fi atinse folosind soluții bazate pe materiale avansate.*** În prezent, autovehiculele moderne trebuie să vină în întâmpinarea unei largi varietăți de cerințe adiționale, dintre care cele mai importante sunt: siguranța, impactul automobilului asupra mediului înconjurător, conservarea resurselor, confortul și prețul de cost [6].

Alegerea materialelor din care sunt realizate piesele din componența autovehiculelor reprezintă o etapă importantă pentru obținerea performanțelor autovehiculului. Alegerea are la bază promovarea de materiale ieftine și ușor de achiziționat, precum și valorificarea optimă a proprietăților tehnologice [2].

În componența unui autovehicul intră multe tipuri de materiale: metalice, plastice, textile, compozite etc. Procentele sunt variate în funcție de tipul autovehiculului, destinația acestuia, zona climatică în care va fi exploatat, performanțelor pe care le dezvoltă sau a clasei sociale căreia i se adresează. În lume sunt fabricate anual peste 50 milioane de autoturisme, pentru care se consumă peste 50 milioane tone de resurse. Având în vedere faptul că materiile prime sunt totuși limitate, se preconizează că rezervele actuale ar mai ajunge pentru 45 de ani, în cazul petrolului, 120 de ani pentru cele de fier, 30 de ani pentru cupru, 21 de ani pentru rezervele de plumb [4].

Pe fondul necesității unei resurse sustenabile de materii prime, precum și a problemelor de mediu cauzate de materialele plastice și cele metalice, greu degradabile, producătorii de automobile sunt mereu în căutarea unor materiale noi, în special cele compozite, cu impact redus asupra mediului, care după încheierea ciclului de viață să fie ușor reciclabile și biodegradabile, care să asigure aceleași performanțe, dar să fie produse într-un mod cât mai ecologic posibil [2].

Mediul înconjurător ocupă un loc foarte important în societate. Simultan, catastrofe ecologice și constatări, cum ar fi: epuizarea resurselor naturale au condus la sensibilizarea populației cu privire la amprenta produselor și serviciilor asupra mediului. ***În vederea proiectării produselor cu impact redus asupra mediului, dar cu menținerea unui nivel de performanță și a unor funcționalități similare, un rol important îl are proiectarea ecologică.*** Aceasta poate fi definită prin considerarea mediului înconjurător în etapa de proiectare a unui produs, pentru a-i reduce amprenta asupra acestuia pe întreaga durată a ciclului său de viață, cu păstrarea identică a performanțelor calitative și funcțiilor produsului respectiv [6].

Evoluția și standardizarea metodologiei de analiză a ciclului de viață a unui produs sunt factorii care contribuie la dezvoltarea proiectării ecologice. Impactul asupra mediului înconjurător poate fi clasificat în trei categorii principale [6]:

- *epuizarea resurselor, atât materialele regenerabile cât și cele neregenerabile și energiile neregenerabile, obținute cu ajutorul combustibililor fosili;*

- *poluarea datorită activităților umane; aceasta poluare generează diferite impacturi care se pot identifica și măsura la scară locală și globală;*
- *toxicitate și riscuri cu privire la sănătatea umană, ce se pot datora accidentelor sau folosirii unor substanțe periculoase (chimice).*

Principiile dezvoltării durabile, adoptate în 2005 în cadrul strategiei Lisabona revizuite sunt: energia curată, transportul sustenabil, producția și consumul sustenabil, sănătatea publică, managementul îmbunătățit al resurselor naturale, incluziunea socială, lupta împotriva sărăciei globale [47]. Conform acestor principii, orice produs ar trebui să fie fabricat, consumat și transportat în mod durabil, în scopul protejării mediului și asigurării prosperității societății pe termen lung [6].

3.3.6. Evoluția cercetărilor în domeniul materialelor destinate realizării plăcuțelor de frână

3.3.6.1 Categorii de materiale

În literatura de specialitate, principalele categorii de materiale care intră în compoziția plăcuțelor de frână sunt [48]:

- **materiale abrazive;**
- **modificatori de frecare;**
- **material de umplură și întărire;**
- **liant.**

Există însă o oarecare ambiguitate în această clasificare, deoarece unele componente pot fi încadrate în mai multe categorii datorită faptului că îndeplinesc mai multe funcții. Pentru a analiza rolul acestora în frecare și uzare este insuficientă doar cunoașterea compoziției lor, deoarece atât comportamentul la frecare, cât și cel de uzare sunt influențate de forma, distribuția și dimensiunea particulelor care le alcătuiesc [48].

a. Materialul abraziv - are rolul de curățare a suprafeței de frecare, contribuind la formarea unui film la suprafața de contact dintre plăcuță și disc, precum și la creșterea coeficientului de frecare al plăcuței de frână. Dacă materialul de frecare este adăugat în cantitate prea mare șterge discul de frână, iar dacă este în cantitate prea mică, are efect de lustruire a acestuia [48].

În literatura de specialitate se prezintă principalele materiale care apar încadrate în această categorie, tabelul 3.8 [48].

Tabelul 3.8. Principalele materiale abrazive utilizate în fabricarea plăcuțelor de frână [48]

Material	Descriere	Referință
Oxid de aluminiu	(1) Forma hidratantă, adăugat ca agent de lustruire și pentru rezistență la uzură (2) Forma anhidră abraziv (3) Topit este foarte greu de utilizat, dar este forma cea mai abrazivă	[49]
Oxizi de fier	-hematitul (Fe_2O_3) și magnetita (Fe_3O_4)- abrazivi ușori;	[49]
Cuart	-particule minerale zdrobite (SiO_2)	[50]
Dioxid de siliciu	-pot fi naturale sau produse sintetic-(SiO_2)	[51]
Silicat de zirconiu	(ZrSiO_4)	[52]

b. Modificatorii de frecare - controlează frecarea dintre plăcuță și disc și ajustează coeficientul de frecare. În tabelul 3.9 se prezintă principalele materiale care pot fi încadrate în această categorie, prezentate în literatura de specialitate [48].

Tabelul 3.9. Principalele materiale utilizate ca modificatori de frecare în fabricarea plăcuțelor de frână [48]

Material	Descriere	Referință
Trisulfuri de stibiu	- lubrifiant solid adăugat pentru a crește stabilitatea la fricțiune; - lubrificază la temperaturi > 450°C; - Sb ₂ S ₃ - potențial toxic	[49], [52]
Alama	- proporții: 62% Cu - 38% Zn; - utilizată uneori sub formă de așchii sau șpan - îmbunătățește frecarea umedă - aditiv comun	[49]
Carbon(grafit)	- utilizat pe scară largă, datorită prețului mic; - arde în aer la temperaturi > 700°C, - nivelul de frecare este afectat de umiditate și de structură	[49], [53]
Microsfere ceramice	- produs special format din alumină-dioxid de siliciu cu adaos mic de oxizi de fier sau titan; - dimensiune de 10-350 μm , densitate mică; - reduce uzura discului și controlează frecarea și reprezintă -5-10% din volumul compozitului	[54]
Cupru	- utilizat sub formă de pudră pentru a controla transferul termic - poate provoca uzura excesivă	[49]
Praf de frecare	- cauciuc dizolvat în diverși aditivi	[49]
Pulbere de frecare	- poate consta din pilitură de Fe și se recomandă pentru plăcuțele de frână semimetalice;	[55]
Oxid de plumb	- toxicitate	[49]
Metale	- Pb, Sb, Bi, Mo, cu rolul de a absorbi oxigenul pentru a stabiliza particulele induse de frecare și de a ajuta la păstrarea lor pentru a nu devenii prea groase	[56]
Oxizi metalici	- Magnetită (Fe ₃ O ₄) îmbunătățește frecarea la rece; - Oxid de zinc (ZnO) poate provoca lustruirea discului; - Oxid de crom (Cr ₂ O ₃) intensifică frecarea	[49]
Sulfurilor metalice	- PbS în proporție de 2-8%, efect de lubrificare, reduce uzura și zgomotul - ZnS în proporție de 5-10%, efect de lubrificare, preș de cost mic - modifică și stabilizează coeficientul de frecare; - cel mai mare coeficient la Sb ₂ S ₃ , (0,47-0,49), urmat de PbS (0,40-0,47), cel mai variat pentru Cu ₂ S, (0,36-0,52)- uzură foarte mare	[53]
Umpluturi minerale	- coeficientul de frânare este aproximativ proporțional cu scala de duritatea Mohs;	[51]
Disulfură de molibden	-MoS ₂ , o rețea stratificată tipică de ungere	[53]
Cocs de petrol	- costuri reduse, pot reduce frecarea, nivel scăzut de cenușă	[49]

c. Materialele de umplură și întărire sunt folosite pentru a menține compoziția totală a materialului de fricțiune, iar unele au și altele funcții. Ele pot fi metale, aliaje, ceramică sau materiale organice. În tabelul 3.10 se prezintă principalele materiale care pot fi încadrate în această categorie, prezentate în literatura de specialitate [48].

Tabelul 3.10. Principalele materiale utilizate în fabricarea plăcuțelor de frână ca materiale de umplură și întărire [48]

Material	Descriere	Referință
Antioxidanți	- ajută la menținerea grosimii de oxid corespunzătoare particulelor pentru frânele aeronavelor - prea mult oxid duce la instabilitatea frecării (ridicat la viteze mici) și particule groase, care se pot uza prea ușor; grafitul este comun în frânele cu compozite metal-ceramice.	[51]
Azbestul	- cel mai frecvent material de umplură până în momentul depistării lui ca fiind cancerigen	[49], [53], [57]
Sulfat de bariu (baritină)	-BaSO ₄ practic este inert, dar duce la creșterea densității și poate îmbunătăți rezistența la uzură este stabil la temperatură ridicată	[49]
Carbonat de calciu	-CaCO ₃ este o alternativă mai ieftină a baritinei BaSO ₄ , dar mai instabilă la temperaturi ridicate	[49]
Ulei de coajă de nuci de caju¹	- îmbunătățește rezistența și reduce zgomotul în timpul frânării	[49]
Bumbacu	- cu rol de fibra de armare pentru matricea compozitului	[53]
Fibre de armare	- fibre de armare produse dintr-o zgură sub formă de vată minerală care pot conține: un amestec de siliciu (40-50%), alumină (5-15%), oxid de calciu (34-42%), magneziu (3-10%) și alte substanțe anorganice între limitele (0-7%); au funcția de a crește efectul de frânare	[58]
Hidoxid de calciu	- este utilizat pentru a evita coroziunea	[49]
Titanatul de potasiu	- material de umplură inert; - izolator și component menit să înlocuiască rolul azbestului	[52]
Cauciuc - dienă, nitril	- materiale utilizate ca stabilizatori pentru legăturile chimice stabilite între lanțurile moleculelor polimerilor și pentru a crește rezistența la uzură - modifică, compresibilitate (modulul/rigiditate)	[59]
Resturi de cauciuc	- obținut din pneuri uzate, nu trebuie să conțină impurități din rulare - preț de cost scăzut	[49]
Cărbune de mare	- particule de umplură ieftine, dar care emană cenușă toxică, nu e indicat la temperaturi ridicate	[49]
Oxidul de zinc	- oferă o oarecare rezistență la uzură, dar poate uza pneurile	[49]

1- Nuca de caju, folosită la plăcuțele de frână, are capacitatea de a absorbi căldura creată prin frecare păstrând în același timp eficiența frânării. Acesta este un produs din India și Asia Subcontinentală. Principalul avantaj al rășinii de caju, în comparație cu rășina fenolică simplă, este că aceasta produce un material mai moale, care este mai eficient pentru uzură atunci când frânele sunt relativ reci, fenomen întâlnit la

automobile de viteză mai mica. Praful de caju este sub forma granulata, sau rășina cu curgere liberă polimerizata. Componenta principală în uleiul de coajă de nucă de caju este cardanolul, un substituit meta-fenol alchenil în mod natural similar cu nonilfenol. Cardanol este hidrofob în natură și rămâne flexibil și lichid la temperaturi foarte scăzute.

d. Materialele liante au rol de legare a componentelor și totodată realizează controlul frecării. Excesul de liant duce la reducerea rezistenței la temperaturi înalte. În tabelul 3.11 se prezintă principalele materiale care pot fi încadrate în această categorie, prezentate în literatura de specialitate [44].

Tabelul 3.11. Materiale liante utilizate la fabricarea plăcuțelor de frână [48]

Material	Descriere	Referință
Rășină fenolică	un liant comun cu o porozitate scăzută; gradul polimerilor reticulari ii afectează comportamentul	[53]
Aliaje metalice de Cu, Fe, Ni	- utilizate la aeronave	[51], [60]
Rășini modificate	- crezol, rășini epoxi, caju, PVB,cauciuc, ulei de in, bor	[61]

Procentul exact al componentelor din plăcuțele de frână constituie în permanență un obiectiv important de cercetare pentru firmele producătoare de plăcuțe de frână, dar și unul dintre importantele secrete comerciale.

3.3.6.2. Coduri și coeficienți de frecare recomandați de SAE

În anul 1980 Anderson în lucrarea [62] prezintă din punct de vedere teoretic, coeficienții de frecare pentru diferite cuple de frecare disc-plăcuță de frână, valorile acestora fiind cuprinse între 0,3-0,7. Din punct de vedere practic, cele mai multe autovehicule au un interval mult mai îngust pentru aceste valori, respectiv 0,3-0,5.

Societatea Inginerilor Auto (SAE) a dezvoltat un sistem de identificare pentru coeficienții de frecare a plăcuțelor de frână și a saboților de frână cu rol de ghid pentru atelierele de întreținere și reparații pentru autovehicule. SAE J866a enumeră următoarele coduri și coeficienții de frecare asociați, prezentați în tabelul 3.12 [48], [63].

Tabel 3.12. Sistem de identificare a pentru coeficienții de frecare a plăcuțelor de frână și a saboți de frână [48], [63]

Cod	Coeficient frecare
C	0,15
D	0,15 – 0,25
E	0,25 – 0,35
F	0,35 – 0,45
G	0,45 – 0,55
H	>0,55
Z	neclasificat

În ultimii ani, valoarea codurilor limită a devenit controversată din punct de vedere al răspunsului frânei și a coeficientului de frecare aparent, deoarece s-a constatat că, **valorile coeficienților de frecare sunt dependente nu numai de compoziția materialului, dar, și de mediul în care rulează autovehiculul, mecanica sistemului de frânare, ciclurile de funcționare la care sunt supuse frânele [48].**

Conform literaturii comerciale, **există limitări semnificative în ceea ce privește utilizarea codurilor și a coeficienților de frecare limită impuse de SAE și anume [48]:**

- 1) La testarea materialului din care se realizează plăcuțele de frână, probele pentru testare de pe mașina de încercat sunt de formă pătrată și nu au dimensiunile plăcuțelor de frână;
- 2) Codul limită nu oferă nici o indicație asupra rezistenței la uzură;
- 3) Aceste coduri nu pot și nu ar trebui să fie utilizate drept criteriu de selecție unic pentru alegerea materialului folosit la fabricarea plăcuțelor de frână.

În mod tipic plăcuțele de frână pentru traficul urban au un coeficient mediu de frecare între 0,25-0,35. Plăcuțe de frână cu caracteristici îmbunătățite au un coeficient de frecare de aproximativ 0,46 ceea ce presupune un efect de frânare îmbunătățit [48].

3.4. Defecte ale discurilor și a plăcuțelor de frână

În procesul frânării, **tensiunile mecanice și termice care acționează asupra discului și a plăcuțelor de frână sunt foarte mari. De asemenea, condițiile atmosferice și tipul suprafeței pe care rulează autovehiculul influențează funcționarea ansamblului disc-plăcuțe de frână.** Toate acestea pot duce la uzuri intense, modificări de formă sau deteriorări ale acestora. În măsura în care discurile și plăcuțele de frână sunt considerate elemente esențiale co-funcționale în cadrul procesului de frânare, acest lucru presupune [12], [16]:

- stabilitate la fricțiune de-a lungul unui interval foarte larg de temperatură;
- dependență scăzută a coeficientului de frecare față de presiunea din timpul contactului, de viteză și mediul de frânare;
- rezistență la deformare;
- stare de uzură cuprinsă între anumite valori limită specificate;
- toleranțele componentelor cuprinse între anumite valorile limită;
- comportament adecvat la uzură al discurilor și a plăcuțelor de frână.

Pe de altă parte, elementele de fricțiune utilizate la sistemele de frânare ale autovehiculelor prezintă nivele de frecare care descresc semnificativ începând de la aproximativ 300°C. În acest sens, se urmărește limitarea temperaturilor atinse în cazul frânărilor succesive, în special în ceea ce privește creșterea capacității de transfer termic a discurilor de frână [12].

În afară de proprietățile termice, se urmărește dezvoltarea numeroaselor calități pentru ansamblul disc-plăcuțe de frână, acestea fiind adesea contradictorii [12]:

- repartiția omogenă a presiunii pe plăcuțele de frână;
- uzura redusă a discului și a plăcuțelor de frână;
- rigiditate mare a etrierului, un joc mic între plăcuță și discul de frână, un cuplu rezidual redus în fazele din afara frânării;
- calitatea plăcuțelor de a neutraliza defectele geometrice prezente la rotația discului;

- funcționarea silențioasă, fără vibrații.

În condițiile respectării acestor cerințe, **riscurile legate de siguranță, pierderea confortului și reducerea duratei de viață pot fi evitate prin:**

- **utilizarea unor materiale adecvate care să satisfacă multitudinea de cerințe impuse ansamblului disc-plăcuță de frână, pentru ambele componente co-funcționale;**
- **utilizarea unor tehnologii moderne de fabricație;**
- **întreținerea corectă a ansamblului disc-plăcuță de frână.**

Concluzie: Discurile și plăcuțele de frână sunt cele mai solicitate componente pentru siguranța sistemului de frânare, care funcționează împreună. În acest sens, acestora li se impun anumite cerințe care trebuie îndeplinite de fiecare element în parte.

Defectele specifice discurilor și plăcuțelor de frână pot să apară la fabricație, la montaj sau în exploatarea autovehiculului [12].

Defectele discurilor de frână sunt cauzate de o multitudine de factori, cum ar fi [12]:

- **trepidația frânei;**
- **zgomot în funcționare;**
- **fisuri și zgârieturi.**

Trepidația frânei se referă la fluctuațiile forței de frânare în timpul unei rotații complete a discului de frână și poate fi:

- **trepidație termică,** care apare în timpul decelerării de la viteze mari;
- **trepidație la rece,** care se poate manifesta la orice viteză.

Trepidația termică poate fi identificată printr-o dispunere circulară a unor puncte de material de pe suprafața plăcuței de frână pe cea a discului de frână cauzate de supraîncălzirea locală din timpul frânării.

Factorii care provoacă formarea punctelor de transfer de material de pe plăcuța de frână pe disc sunt [12]:

- **deformarea discului în momentul frânării puternice, care poate produce o deformare permanentă;**
- **uzura discului de frână sub grosimea minimă specificată de producător, fapt care reduce capacitatea discului de a disipa căldura;**
- **uzura excesivă a plăcuțelor de frână cu disc;**
- **materialul discului de frână și toleranțele acestuia nu sunt în conformitate cu specificațiile producătorului;**
- **plăcuțele de frână nu sunt adecvate utilizării și/sau nu sunt în conformitate cu echipamentul original sau orice alt standard de calitate similar;**
- **sistemul de frânare nu funcționează corect sau unele dintre componentele sale nu sunt dimensionate corect.**

Trepidația la rece apare în timpul frânării obișnuite și poate fi provocată în principal de variația grosimii discului de frână datorită contactului neuniform dintre disc și plăcuță. Acest contact neuniform se datorează bătăilor radiale ale discului provocate de toleranțele de fabricație și asamblare [12].

Factorii care influențează variația grosimii discului de frână sunt [12]:

- **bătăile radiale ale discului de frână în stare montată;**
- **frecarea plăcuțelor de frână pe disc, în timp ce frâna nu este acționată;**
- **capacitatea plăcuțelor de frână de a reduce sau elimina variațiile de grosime ale discului în timpul frânării obișnuite;**
- **acționarea incorectă a etrierului;**
- **condițiile carosabilului, condițiile de mediu și stilul de condus al conducătorului auto.**

Zgomotele din timpul frânării, apar datorită frecării uscate dintre disc și plăcuțele de frână care sunt descrise în funcție de frecvența lor. Din acest motiv, la elaborarea de materiale noi destinate realizării plăcuțelor de frână, trebuie apreciat comportamentul la vibrație al acestora, cât și proprietățile lor de absorbție a zgomotului. Astfel, trebuie evaluat comportamentul la zgomot al vehiculelor echipate cu astfel de plăcuțe [12].

Zgârieturile discurilor de frână pot fi de la foarte fine la foarte accentuate, fapt care face dificilă definirea unor reguli clare privind măsura în care zgârieturile pe suprafața acestora sunt acceptabile. Până la un anumit nivel, zgârieturile nu afectează efectul de frânare, dat în cazul în care acestea există, la înlocuirea plăcuțelor trebuie înlocuite sau rectificate și discurile [12].

Fisurile de pe suprafața discului de frână pot fi cauzate de [12] :

- materialul plăcuțelor, respectiv al discurilor de frână este necorespunzător;

- îmbâcsirea severă a discurilor sau a plăcuțelor de frână;

- coroziune;

- supraîncălcarea sistemului de frânare.

Toate defectele anterior prezentate conduc la reducerea coeficientului de frecare, la diminuarea eficacității sistemului de frânare și în consecință la micșorarea siguranței circulației.

Factorii care influențează durata de viață a unui disc de frână, [12]:

stilul de condus, condițiile carosabilului și ale traficului, condițiile topografice și climatice, nivelul de contaminare al discului de frână, materialul și structura discului de frână, gradul de agresivitate al plăcuțelor de frână.

Principalele defecte ale plăcuțelor de frână sunt [12]:

a. Desprinderea materialului de fricțiune

- provocată de coroziune, descompunerea termică, influențele mecanice, fabricarea necorespunzătoare (presare cu forța necorespunzătoare, stabilitatea inadecvată a materialului de fricțiune, neomogenitatea materialului) și de desprinderea materialului de fricțiune de pe placa de fixare.

b. Defecte legate de utilizare

- fisuri la nivelul suprafeței - dacă acestea sunt superficiale pot fi ignorate deoarece nu constituie un risc pentru siguranță;
- rupturi ale muchiilor - acestea sunt permise până la o valoare maximă de 10% din întreaga suprafață de fricțiune;
- exfoliere/deteriorarea muchiilor - fisurile sau deteriorările din zona unde este încorporat materialul de fricțiune nu sunt permise;
- structură de contact defectuoasă.

c. Defecte de montaj - manipulare necorespunzătoare înainte de montaj sau în timpul montajului, plăcuța de frână montată necorespunzător, suportul metalic este supus uzurii, abatere dimensională a plăcii de fixare, deformare inadmisibilă în timpul montării, așezarea incorectă a plăcuței de frână în etrier.

d. Avarii provocate de influențele mediului - structura suprafeței de contact inadecvată, utilizarea discului de frână zgâriat, pătrunderea corpurilor străine în zona de contact disc-plăcuță, distribuția inadecvată a particulelor de fricțiune în materialul de fricțiune, transferul de material de pe discul de frână spre plăcuța de frână din cauza: sarcinii diferite, incompatibilității de climat și/sau materiale.

În cazul plăcuțelor de frână trebuie să se găsească întotdeauna un compromis între siguranță, confort și eficiență economică. În acest context, *alegerea*

corectă a materialelor pentru plăcuțele de frână este la fel de importantă ca și evaluarea condițiilor generale ale întregului sistem de frânare .

Punerea în valoare a performanțelor de viteză și de accelerație ale autovehiculelor în condiții de siguranță depind de capacitatea de frânare a acestuia. Cu cât sistemul de frânare este mai eficace, cu atât vitezele medii de deplasare cresc, iar performanțele autovehiculului au valori mai ridicate [5], [11]. De asemenea, calitățile bune de frânare asigură evitarea unor accidente care se pot produce chiar în cazul vitezelor relativ mici, sau în cazul apariției unor obstacole neprevăzute. Astfel, **obținerea și conservarea calităților de frânare se poate realiza cu ajutorul unor componente ale sistemelor de frânare care să nu prezinte defecte.**

Utilizarea mai frecventă a frânelor are loc în condițiile de circulație din orașe. Astfel, în condițiile de circulație ale unui oraș de mărime medie, aproximativ 30-40 % din timpul total de mers, autovehiculul este frânat sau rulează liber. Bilanțul energetic al procesului de frânare arată că aproape toată energia cinetică a autovehiculului se transformă în energie termică [5]. La o frânare intensivă puterea care trebuie absorbită de către frâne depășește adesea puterea motorului. **Cantitatea mare de căldură care se degajă în timpul frânării contribuie la înrăutățirea calităților de frânare ale autovehiculului și grăbește uzarea plăcuțelor de frână, respectiv a discurilor de frânare [5], [9], [10].**

3.5. Concluzii și contribuții originale

Se observă că în ciuda evoluției care au avut loc în timpul secolului al-XX-lea, discurile de frână ale autovehiculelor sunt încă produse din fontă, care este cel mai eficient material din punct de vedere tehnologic și economic, care satisface toate proprietățile necesare acestui component al sistemului de frânare.

În condiții reale de funcționare, discul de frână este expus la o solicitare de oboseală termomecanică din acest motiv, materialele utilizate la realizarea discurilor de frână trebuie să prezinte: capacitate termică și difuzivitate termică ridicată, să aibă o densitate scăzută, să asigure un coeficient bun de frecare, caracteristici mecanice stabile la temperaturi ridicate în mediu umed, rezistență ridicată la uzură, rezistență la coroziune, stabilitate la frecare, greutate și zgomot scăzut, durabilitate în funcționare și nu în ultimul rând preț de cost cât mai scăzut.

De-a lungul timpului, proprietățile fontelor destinate realizării discurilor de frână au fost îmbunătățite prin adăugarea unor elemente de aliere, cum ar fi: mangan, vanadiu, molibden, crom, cupru, etc.

În procesul de turnare al fontelor destinate realizării discurilor de frână trebuie riguros controlată atât compoziția chimică, cât și factorii care influențează procesul de răcire. În acest sens, principalul parametru este viteza de răcire care depinde de: grosimea peretelui piesei, proprietățile termo-fizice ale formei de turnare, caracteristicile tehnologiei de turnare (temperatura, viteza de turnare, temperatura formei de turnare).

Cele mai utilizate fonte utilizate la fabricarea discurilor de frână sunt fontele cenușii cu grafit lamelar, nodular și vermicular, iar microstructurile care oferă cea mai bună comportare în exploatare a discurilor de frână sunt cele ferito-perlitice și perlitice.

În compoziția fontelor, grafitul asigură o bună prelucrabilitate prin așchiere, capacitate mare de amortizare a vibrațiilor, proprietăți lubrifiante în condiții de frecare uscată, insensibilitate la creștături, rezistență la coroziune în mediile corozive obișnuite.

Principalii factori care influențează transferul de căldură din fontă sunt distribuția, mărimea și morfologia tipului de grafit.

Difuzivitatea termică a fontei cenușii este influențată de carbonul echivalent. Datorită forțelor mecanice exercitate asupra lor de către plăcuțele de frână, discurile de frână trebuie fabricate din materiale cu duritate mare, iar din punct de vedere al grosimii, ele trebuie să aibă o grosime constantă.

Discurile de frână pot avea un efect direct asupra duratei de viață a plăcuțelor de frână, motiv pentru care la ora actuală, o mare atenție se acordă îmbunătățirii performanței discurilor de frână cu privire la comportamentul lor în momentul frecării cu plăcuțele de frână.

Alegerea plăcuțelor de frână se face în funcție de: tipul autovehiculului, tipul motorului și caracteristicile generale prevăzute în standardele aflate în vigoare.

Tipologia plăcuțelor de frână depinde de materialul din care acestea sunt realizate și pot fi:

organice; semi-metalice (sinterizate); metalice și ceramice.

Materialele compozite nu există în stare naturală, ci sunt create sintetic având proprietăți superioare materialelor tradiționale.

În conceperea unui material compozit se urmărește obținerea unei rezistențe și a unei rigidități mari raportate la unitatea de greutate, parametrii exprimați prin două caracteristici: rezistența specifică și modulul specific.

Caracteristicile materialelor compozite se reduc din cauza deteriorărilor care pot apărea în timpul realizării acestora sau pot fi cauzate de solicitările la care sunt supuse reperatele realizate din aceste materiale.

Calitatea pieselor din materiale compozite se apreciază după: omogenitatea materialului apreciată prin lipsa incluziunilor poroase, starea suprafeței, stabilitatea și precizia dimensională, rezistența mecanică și termică a materialului.

Principalele categorii de materiale care intră în compoziția plăcuțelor de frână organice sunt: materiale abrazive, modificatori de frecare, material de umplutură și liant.

Coeficienții de frecare pentru cuplele de frecare disc-plăcuță de frână sunt cuprinse între 0,3-0,7, dar plăcuțele de frână pentru traficul urban au un coeficient mediu de frecare cuprins între 0,25-0,35.

Principalele defecte ale discurilor de frână sunt: trepidația frânei, zgomotul în funcționare, fisuri și zgârieturi, iar în ceea ce privește plăcuțele de frână defectele se referă la: desprinderea materialului de fricțiune, defecte legate de utilizare, defecte de montaj, avarii provocate de influențe ale mediului. Obținerea și conservarea calităților de frânare se poate realiza cu ajutorul unor componente ale sistemelor de frânare care să nu prezinte defecte.

Realizările obținute în domeniul autovehiculelor se obțin prin luarea în considerare în cadrul tehnologiilor de fabricație și a aspectelor economice și ecologice. Realizările obținute până la ora actuală folosind materiale și tehnologii avansate, se referă la:

- reducerea consumului de combustibil, prin reducerea greutateii pieselor componente;
- creșterea performanțelor de confort și maniabilitate, prin folosirea materialelor ușoare pentru elementele care alcătuiesc masa nesuspendată a autovehiculului;
- mărirea puterii efective a motorului prin folosirea materialelor ușoare pentru elementele care alcătuiesc masa aflată în mișcare de rotație;
- reducerea costurilor de întreținere prin introducerea materialelor durabile.

Ca urmare a studiului efectuat asupra evoluției materialelor și a tehnologiilor în industria autovehiculelor se desprind următoarele concluzii:

- *competitivitatea în domeniul industriei autovehiculelor, impune obținerea de produse noi, care să ofere parametri ridicați în exploatare, având ca rezultat obținerea unui autovehicul mai performant și mai fiabil;*
- *industria auto generează un impuls de dezvoltare pentru alte industrii;*
- *materialele compozite nu există în stare naturală, ci sunt create sintetic pentru a răspunde unor exigențe bine definite;*
- *printr-o alegere corespunzătoare, atât calitativ, cât și cantitativ a materialelor constituente, se pot realiza materiale compozite cu proprietăți superioare materialelor tradiționale;*
- *ponderea în industria constructoare de autovehicule a materialelor metalice, dar prognozele arată că aceste materiale vor fi înlocuite treptat de materialele compozite;*
- *discurile de frână pentru autovehicule sunt produse încă din fontă cenușie care oferă cel mai bun raport preț.*

Prioritățile de cercetare din domeniul materialelor compozite sunt:

- reducerea consumului de energie pentru tehnologiile de fabricație;
- minimizarea impactului asupra mediului;
- asigurarea necesarului de materiale pentru o populație în curs de dezvoltare.

În concluzie, materialele compozite datorită calităților pe care le au se impun în fața materialelor clasice. În industria autovehiculelor, folosirea acestor materiale duce la creșterea rezistenței componentelor, concomitent cu scăderea greutății acestora, ceea ce presupune reducerea consumului de combustibil și creșterea performanțelor.

La ora actuală analizele, studiile și cercetările experimentale sunt îndreptate spre dezvoltarea materialelor și a tehnologiilor utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână.

În cadrul acestui capitol **contribuțiile originale** constau în sinteza bibliografică cu privire la:

- *analiza compoziției chimice a fontelor destinate realizării discurilor de frână cu precizarea influenței elementelor de aliere și a factorilor care influențează turnarea acestora;*
- *evidențierea proprietăților fizico-mecanice ale fontelor și a rolului acestora în asigurarea durabilității în exploatare a discurilor de frână;*
- *elaborarea fontelor pentru discurile de frână în cuptoare cu inducție;*
- *tipologia și elementele componente ale plăcuțelor de frână cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor specifice acestora;*
- *conceptul de material compozit cu evidențierea considerentelor tehnice și economice care stau la baza obținerii acestora;*
- *structura, proprietățile, deteriorările posibile, criteriile de apreciere a materialelor compozite și impactul acestora asupra mediului înconjurător;*
- *defecte posibile ale discurilor și a plăcuțelor de frână;*
- *evoluția materialelor destinate fabricării discurilor și plăcuțelor de frână.*

Partea a-II-a

**Cercetări și experimentări proprii privind
obținerea, caracterizarea și testarea
materialelor compozite destinate
sistemelor de frânare ale autovehiculelor**

CAPITOLUL 4

EXPERIMENTĂRI ȘI ANALIZE TEHNOLOGICE PRIVIND OBTINEREA ȘI CARACTERIZAREA MATERIALELOR COMPOZITE

În cadrul acestui capitol se vor produce, analiza, optimiza și caracteriza mai multe rețete de materiale compozite destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii.

În prima parte a programului de cercetare experimentală s-au conceput și realizat două matrițe în vederea producerii probelor necesare determinării caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice ale materialelor compozite. De asemenea s-au conceput și realizat 20 de rețete și s-a stabilit din aproape în aproape tehnologia de sinterizare pe baza analizelor tehnologice efectuate la fiecare rețetă. Dintre acestea au fost selectate un număr de 8 rețete din care s-au realizat probe disc și cilindrice (pini) din care au fost prelevate epruvete în vederea determinării caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice.

În a doua parte a programului de cercetare experimentală s-au caracterizat materialele produse prin determinarea experimentală a caracteristicilor fizico-mecanice și s-a realizat optimizarea rețetelor prin calcul statistico-matematic.

În partea a treia s-au produs materialele compozite după rețetele optimizate pentru care s-au determinat experimental caracteristicile fizico-mecanice și s-a efectuat studiul morfologiei suprafețelor.

4.1. Proceduri experimentale

4.1.1. Realizarea matrițelor pentru producerea probelor din material compozit

În vederea caracterizării materialelor compozite s-au produs epruvete, în funcție de caracteristicile instalațiilor experimentale în care vor fi testate materialele compozite concepute. În acest sens, s-au proiectat și executat două matrițe, una pentru producerea probelor disc și cealaltă pentru producerea probelor cilindrice. În fig.4.1 se prezintă modelul 3D al matriței proiectate [64], iar în fig.4.2 matrița realizată după modelul proiectat.

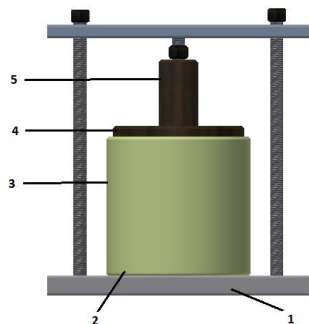


Fig.4.1 Ansamblul matriței pentru realizarea probelor disc [64]



Fig.4.2 Matriță executată după modelul proiectat [24], [65]

Principalele elemente componente ale matriței proiectate sunt: 1 - placa de bază; 2 - disc pentru extragerea probei; 3 - corp cilindric; 4 - disc pentru presarea materialului; 5-tijă pentru ghidare. Aceasta permite realizarea unor probe cu diametrul de 95 mm, grosimea lor depinzând de cantitatea de material introdusă în matriță [64].

În vederea obținerii probelor cilindrice din material compozit, necesare efectuării testelor privind aprecierea comportării la uzare a acestor materiale s-a realizat o altă matriță a cărei model 3D este prezentat în fig.4.3, iar în fig.4.4 a și b se prezintă matrița realizată din oțel.



Fig. 4.3 Modelul 3D al matriței pentru realizarea epruvetelor de tip cilindru [66]



a-matriță asamblată



b-matriță dezasamblată

Fig. 4.4 Matrița realizată în vederea obținerii probelor cilindrice [24]

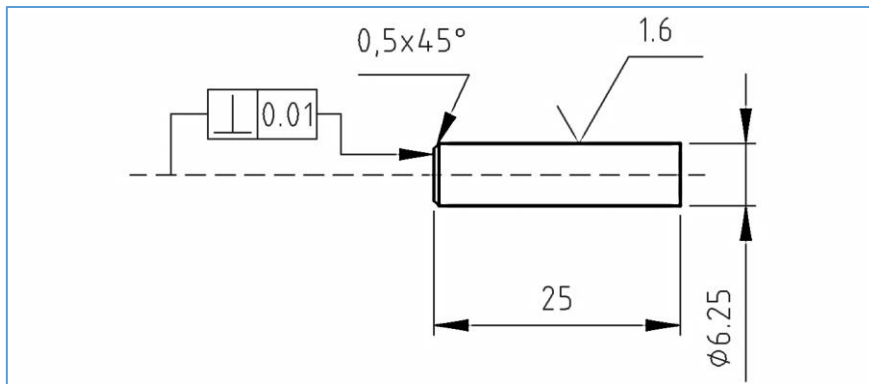


Fig.4.5 Dimensiunile epruvetelor cilindrice realizate cu ajutorul matriței [24], [66]

Dimensiunile probelor cilindrice, precum și condițiile tehnice impuse acestora la extragerea din matriță se prezintă în fig.4.5.

4.1.2. Stabilirea rețetelor

De-a lungul timpului, cele mai utilizate fibre pentru realizarea plăcuțelor de frână au fost fibrele de azbest [48]. Acestea au proprietăți mecanice ridicate și rezistență la temperaturi înalte. La o temperatură de 400°C, rezistența fibrei de azbest scade cu 20 %, iar în jurul temperaturii de 700...800° C, are loc distrugerea

completă a acesteia. De asemenea, azbestul asigură un coeficient de frecare mare, de aproximativ 0,8.

Studiile și cercetările au arătat că fibra de azbest are efecte nocive atât asupra mediului, cât și asupra sănătății umane [48], [66]. Din acest motiv UNESCO a decis interzicerea acestei fibre de armare în materialele de fricțiune destinate realizării plăcuțelor de frână. Interzicerea fibrelor de azbest a început încă din anul 1986, piața pieselor de schimb specifice autovehiculelor având la dispoziție zece ani pentru a-și converti aceste piese la materiale care să nu conțină această fibră nocivă mediului înconjurător și sănătății umane [48], [67], dar cu toate acestea în 1996, cercetarea MarketScope (divizie a Babcox Publications, Inc.) a dezvăluit că plăcuțele de frână cu azbest au fost încă utilizate pe aproximativ 9,5% dintre vehiculele deservite [67]. Acest lucru a creat o problemă științifică și tehnică, care a determinat înlocuirea azbestului din materialele de fricțiune cu alte materiale ecologice [50], [57], [68]. În lucrarea [49] se enumeră mai multe materiale care pot înlocui azbestul, însă nici unul nu are aceleași proprietăți ca acesta, dar oferă unele caracteristici cu performanțe similare. Tendința actuală în cercetarea științifică din domeniul autovehiculelor este de utilizare a materialelor compozite ramforsate cu fibre naturale, acestea oferind numeroase beneficii economice și ecologice [6], [66], [68].

Fibrele organice fără azbest ramforsate în materialul compozit sunt utilizate pentru plăcuțele de frână ale autovehiculelor, tampoane specifice materialului rulant, saboți de frână, în primul rând datorită gradului de conștientizare a pericolelor pentru sănătate cauzate de azbest, [68]. Deși fibrele naturale au proprietăți mecanice mai scăzute decât fibrele sintetice, acestea prezintă unele avantaje [69]:

- densitate scăzută;
- prețul mic al materiei prime;
- biodegradabilitatea.

Datorită acestor avantaje, materialele compozite armate cu fibre naturale sunt apreciate în domeniile în care greutatea joacă un rol important, cum este cel al componentelor pentru autovehicule. Folosirea acestor materiale duce la creșterea rezistenței pieselor, concomitent cu scăderea greutății vehiculelor, ceea ce se traduce prin reducerea consumului de combustibil și creșterea performanțelor acestora [69].

Fibrele organice utilizate pentru ranforsarea materialelor compozite pot fi obținute dintr-o mare varietate de plante [69], [70]:

- tulpinile păioase ale cerealelor (grâu, orz, orez, secară);
- plantele textile (în, cânepă, rafie, bumbac);
- alte plante cu utilizări industriale, cu fibre dure (trestia de zahăr, trestia, papura, rapița, nucile de cocos, bambusul, bananier, sisal etc.)

Acestea au un conținut ridicat de celuloză, lignină, pectine și alte substanțe [70].

Un mare dezavantaj al fibrelor organice îl reprezintă diferențele de structură anatomică și chimică, care determină proprietăți fizico-chimice cu variații mari de la o specie la alta, uneori chiar și în cadrul aceleiași specii, datorate condițiilor de vegetație și microclimat [70].

Principalele avantaje ale materialelor compozite față de metale, din punctul de vedere al proceselor industriale de producție, sunt reprezentate de manevrabilitatea superioară, care reduce considerabil timpii de fabricație. Pe de altă parte, piesele realizate din materiale compozite au posibilități mici de recondiționare, dar sunt mai ecologice și reciclabile într-o proporție semnificativă. În

zilele noastre există peste 2000 de tipuri de materiale utilizate la fabricarea plăcuțelor de frână [48], [69].

La ora actuală în realizarea plăcuțelor de frână se folosesc diferite categorii de fibre, cum ar fi: silicat de calciu, fibre minerale, ceramice, de carbon, celuloză, fibră de sticlă, vermiculit (calciu hidratat silicat de aluminiu), mică (silicat de aluminiu), fibre de bazalt, fibre de oțel sau de cupru poliacrilonitrilul fibre de poliester, etc., [48],[49],[68],[70],[71]. Fiecare dintre acestea au avantaje și dezavantaje legate de: capacitatea de frânare și de a disipa căldura în exterior, comportarea în procesul de frânare, zgomot și vibrații, însă proprietățile finale ale fiecărui tip de plăcuță de frână depinde în mare măsură de materialul abraziv utilizat în componența lor [68], [70]. În funcție de materialele din care sunt fabricate plăcuțele de frână, acestea pot fi: metalice, semi-metalice, organice și ceramice [45], [66].

În literatura de specialitate, principalele categorii de materiale care intră în compoziția plăcuțelor de frână din materiale compozite sunt [48]:

- **materiale abrazive;**
- **modificatori de frecare;**
- **material de umplură și întărire;**
- **liant.**

După cum am arătat în cap.3, atât discurile de frână, cât și plăcuțele de frână trebuie să posede o capacitate termică bună, o difuzivitate termică ridicată, o densitate scăzută, un coeficient bun de frecare, caracteristici mecanice stabile la temperaturi ridicate în mediu umed, rezistență ridicată la uzură, rezistență la coroziune, stabilitate la frecare, greutate mică și zgomot redus, durabilitate în funcționare și un preț de cost cât mai mic [48], [49], [65]. Pentru a satisface toate aceste proprietăți, în realizarea plăcuțelor de frână trebuie combinate mai multe tipuri de materiale și în proporții diferite. Din punct de vedere teoretic, mai multe materiale întrunesc separat multe din proprietățile anterior amintite, însă în combinație unele cu celelalte, unele proprietăți se pot înrăutăți [48], [65], [72], chiar și o diferență de un procent (1%) între concentrațiile constituenților poate afecta performanța plăcuțelor de frână [48]. Astfel, la conceperea materialelor compozite, combinarea materialelor și stabilirea proporțiilor din rețete este o activitate greu de realizat, deoarece o modificare foarte mică a proporției unui constituenț poate duce la modificări majore ale proprietăților materialului în ansamblu [71], [72], [73], [74], [75].

În vederea stabilirii rețetelor prezentate în acest capitol s-a plecat de la un amestec de materii prime, care cuprinde: **aluminiu, grafit, oxid de zirconiu, carbură de siliciu, oxid de titan, oxid de aluminiu, sulf, rășină fenolică (de tip Râșnov) și fibră de nucă de cocos**. Alegerea acestora s-a făcut având în vedere destinația plăcuțelor de frână (pentru autovehiculele cu dimensiuni mici și performanțe medii) în conformitate cu literatura de specialitate cu privire la componența plăcuțelor de frână organice.

Proprietățile pe care le are fiecare material independent din rețetă sunt [4], [74]:

- **aluminiul** formează aliaje ușoare cu o mare plasticitate și o greutate specifică la 200⁰ C, de 2,7 kg/dm³. Datorită densității sale reduse și a rezistenței mari la oxidare progresivă este utilizat ca matrice a materialelor destinate realizării componentelor autovehiculelor rutiere. Aluminiul prezintă conductibilitate termică și electrică, rezistență la tracțiune cuprinsă între 70-700MPa, nu devine casant la temperaturi joase, iar la temperaturi ridicate rezistența acestuia scade [4], [74].

- **oxidul de zirconiu** este un material ceramic, utilizat la realizarea componentelor rezistente la solicitări termomecanice, prezintă o foarte bună rezistență la abraziune și impact, are rezistență la compresiune mare și poate fi folosit la temperaturi de proces înalte, prezintă densitate mică și porozitate scăzută [4], [74].
- **carbura de siliciu** are o structură cristalină care îi conferă o rigiditate mare, rezistență la rupere și duritate ridicată. Adăugată în aliajele de aluminiu contribuie la creșterea rezistenței la uzură, în special la uzură abrazivă, dar la prelucrările mecanice va conduce la o uzură intensă a sculelor așchietoare. Densitatea carbunii de siliciu este de $3,17 \text{ g/cm}^3$, iar duritatea între 3000-3500 HV, duritate care conferă compozitului o comportare corespunzătoare în condiții de uzură prin frecare sau în condiții de abraziune [4], [74].
- **grafitul** adăugat în compozitele în care există carbură de siliciu ameliorează proprietățile de antifricțiune, ducând la scăderea coeficientului de frecare. Datorită diferenței de greutate specifică dintre matrice și grafit (grafitul fiind mai ușor) pentru obținerea unui amestec omogen este necesară o agitare mecanică [4], [74].
- **oxidul de titan** este rezistent, non-magnetic și are o densitate mică. Titanul conferă o rezistență mecanică superioară, rezistență la coroziune în medii marine, acizi, substanțe alcaline, apă naturală și produse chimice industriale. De asemenea, prezintă o eficiență ridicată a transferului termic în condiții de exploatare, are o rezistență la oxidare superioară la temperatura mediului ambiant datorită formării unui strat de oxid pasiv și protector. Titanul poate fi aliat cu aluminiu, vanadiu, molibden, precum și alte elemente, pentru a produce aliaje ușoare și cu rezistență mecanică ridicată [4], [74];
- **oxidul de aluminiu** este un compus anorganic care are capacitatea de a reacționa atât cu acizii, cât și cu bazele. Are o conductivitate termică relativ mare, iar duritatea sa ridicată îl face corespunzător pentru a fi utilizat ca abraziv în materialele de fricțiune. Densitatea acestuia la punctul de topire este $2,93 \text{ g/cm}^3$ și asigură rezistența la coroziune atmosferică [76].
- **sulfur** este o substanță solidă, de culoare galbenă, insolubilă în apă, dar solubilă în sulfura de carbon, benzen, toluen sau petrol; acesta are densitate mai mare decât a apei, este un bun izolator electric și are duritate mică. La încălzire, sulfurul se topește ușor și devine vâscos, iar turnat în apă rece se transformă într-o masă elastică de culoare brună. Din punct de vedere chimic, reacționează cu toate elementele, mai puțin cu aurul, platina, iridiul, azotul, telurul, iodul și gazele nobile [77].
- **rășina fenolică** are proprietăți fizico-chimice bune și poate forma legături carbon-carbon care dezvoltă rezistență la temperaturi înalte. Aceasta este termorigidă și oferă materialelor compozite proprietăți unice de rezistență chimică și caracteristici mecanice superioare. Se utilizează în aplicațiile care suportă temperaturi ridicate în funcționare [24].

Pe de altă parte, materialele în componența cărora se găsește aluminiu și carbură de siliciu au o rigiditate mare, rezistența mare la uzură și temperaturi înalte, fiind aplicabile în realizarea unor componente pentru sistemele de frânare ale autovehiculelor [74], [78].

Aluminiul utilizat în elaborarea compozitelor a fost obținut din bare, fig.4.6a, prin așchiere, fig.4.6b, rășina fenolică de tip Rășnov este lichidă, fig.4.7, iar fibra de nucă de cocos s-a obținut prin pilire din învelișul fructului, fig.4.8 [74]. Celelalte materiale selectate în vederea obținerii compozitelor destinate realizării plăcuțelor

de frână se prezintă în fig.4.9 oxidul de aluminiu, fig.4.10 sulful și în fig.4.11a,b,c,d,e, ceilalți componenți [74].



a-bucăți de aluminiu pregătit în vederea pilirii



b- aluminiu obținut prin pilire

Fig. 4.6 Aluminiul utilizat la fabricarea materialelor compozite



Fig.4.7 Rășină fenolică tip Râșnov



Fig. 4.8 Fibră de nucă de cocos



Fig.4.9 Oxid de aluminiu



Fig.4.10 Sulf



a-Grafit



b-Oxid de zirconiu



c-Carbură de siliciu



d-Oxid de titan



e-Hexametyl-tetramina

Fig.4.11 Materiale folosite în obținerea materialelor compozite destinate realizării plăcuțelor de frână

Pentru experimentări s-au produs în laborator epruvete după un număr de 20 de rețete, în tabelele 4.1 și 4.2 fiind prezentată componența acestora.

După stabilirea rețetelor s-a trecut la pregătirea materiei prime în vederea producerii probelor cilindrice și a celor sub formă de disc. Instalațiile utilizate în acest sens sunt prezentate în paragraful 4.1.3.

Tablul 4.1. Componența rețetelor probelor din materiale compozite (P1-P10)

Nr. crt.	Componenți, [%]	Probe									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Aluminiu	45	40	20	15	20	20	25	20	15	10
2	Grafit	8	8	10	8	8	10	10	10	10	10
3	Oxid de zirconiu	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	Carbură de siliciu	15	15	15	15	10	13	10	10	10	10
5	Oxid de titan	13	13	14	13	10	10	13	13	13	13
6	Rășină fenolică	15	20	40	40	45	40	40	40	40	40
7.	Nucă de cocos	2	2	-	2	2	5	-	5	10	15
Total [%]		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tablul 4.2. Componența rețetelor probelor din materiale compozite (P11-P20)

Nr. crt.	Componenți, [%]	Probe									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Aluminiu	20	20	25	20	15	10	25	20	15	10
2	Grafit	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	Oxid de zirconiu	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	Carbură de siliciu	5	5	10	10	10	10	10	10	10	10
5	Oxid de titan	9	4	13	13	13	13	-	-	-	-
6	Rășină fenolică	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
7	Oxid de aluminiu	4	13	-	-	-	-	13	13	13	13
8	Sulf	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Hexametyltetramină	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6
10.	Nucă de cocos	5	5	0	5	10	15	0	5	10	15
Total [%]		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

4.1.3. Instalații experimentale utilizate în obținerea epruvetelor din material compozit

Producerea materialelor compozite organice destinate realizării plăcuțelor de frână are la bază metalurgia pulberilor [64],[65],[66],[68],[71]. Principalul motiv pentru care se face uz de metalurgia pulberilor fiind obținerea unei omogenități crescute a componentelor [64]. Materiile prime utilizate în rețete au fost măcinate, sortate pe clase granulometrice, cântărite, compactate și apoi supuse procesului de sinterizare. Astfel, toate materialele prevăzute în rețete au fost pregătite sub formă de pulbere, în acest scop ele sunt măcinate într-o moară cu bile, tip PM100, la turația de 200 rot/min [64], [65]. În fig.4.12 se prezintă moara cu bile cu ajutorul căreia au fost măcinate componentele rețetelor, precum și caracteristicile tehnice ale acesteia. După măcinare, componentele rețetelor au fost cântărite conform proporțiilor stabilite pentru fiecare component. Cântărirea acestora s-a realizat cu o balanță Sartorius CP2202S-OCE cu capacitatea maximă de măsurare de 2200g și precizia de 0,01g. În vederea omogenizării componentelor rețetelor, aceștia au fost

amestecați cu ajutorul unui amestecător cu puterea de 500W și turația de 2800 rot/min.

Caracteristici

tehnice:

Dimensiunea bilelelor de 8 mm
 Mărime inițială particula: < 10 mm;
 Mărime finală particula: < 40 μm;
 Volum probă: 300 ml cu caseta standard;
 Turație rotor: 6.000 – 18.000 rot/min,
 Viteza periferică rotor: 31 – 93 m/s;
 Diametrul rotorului: 99 mm;
 Capacitate: 900 ml cu caseta



Fig.4.12 Moara cu bile tip PM 100

După omogenizare, amestecul s-a introdus în cele două matrițe proiectate și realizate, ansamblul probă-matriță fiind introdus într-un cuptor cu rezistență, marca Nabertherm, model L15/12/B180, care are puterea de 3,6 KW și temperatura maximă de încălzire de 1200°C. Cuptorul se află în dotarea laboratorului de Topituri metalice din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara.

Caracteristici tehnice

Forța maximă de presare: 100KN
 Distanța maximă dintre masă și berbec: 750 mm
 Dimensiunea suprafeței mesei: 700 x 600 mm
 Înălțimea mesei: 700 mm
 Tensiunea de alimentare: 380 V
 Putere: 9,7 KW



Fig.4.13 Presă electro-hidraulică tip PH 40

Pe parcursul derulării experimentelor, unele probe au fost supuse unei presări pe o presă hidraulică tip PH 40, prezentată în fig.4.13.

4.1.4 Tehnologia de obținere a materialelor compozite

Materialele compozite nou create au fost obținute în laborator după un număr de 20 de rețete, cu compoziția prezentată în tabelele 4.1 și 4.2. Realizarea acestora a avut la bază o documentare temeinică în literatura de specialitate și numeroase încercări/experimentări. Tehnologia de obținere a fost îmbunătățită din aproape în aproape, de la o probă la alta, încercându-se rezolvarea neajunsurilor și depistarea cauzelor care au dus la obținerea unor probe necorespunzătoare [24].

În tabelul 4.3 se prezintă tehnologia de obținere pentru fiecare probă, respectiv analiza tehnologică privind rezultatul obținut din punct de vedere al compactității, integrității, elasticității și aspectului eșantionului [24].

Tabelul 4.3. Tehnologia de obținere în laborator a materialului compozit pentru probe
Proba 1

Parametrii:

Temperatura de încălzire = 220 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 15 min

Răcire: apă, timp de 15 minute, apoi în aer la temperatura camerei până la răcirea completă.



În realizarea probelor s-a efectuat o amestecare a componentilor măcinați peste care s-a adăugat rășina fenolică, compoziția fiind omogenizată manual. Amestecul a fost introdus în matrice, unde s-a realizat strângerea pistonului acesteia și presarea materialului. Ansamblul probă-matrice a fost introdus în cuptor unde s-a menținut timp de 15 minute, după care proba a fost extrasă din matrice, introdusă în apă timp de 15 min și apoi menținută în aer până la răcirea completă.

Observații: Proba obținută este casantă și s-a distrus la extragerea din matrice din cauza tendinței de lipire de partea inferioară a matricei, ceea ce impune căutarea unei soluții pentru protejarea probei. O altă cauză care a dus la obținerea unei probe casante a fost și regimul de încălzire-menținere-răcire necorespunzător, astfel: se va micșora temperatura de încălzire, se va mării timpul de menținere în cuptor și se va renunța la răcirea probei în apă. De asemenea, proba este necorespunzătoare atât ca aspect, cât și ca structură. Explicația constă în cantitatea prea mică de rășină fenolică comparativ cu ceilalți componente și ca urmare se va mări cantitatea de rășină.

Proba 2

La realizarea celei de a doua probe (P2) s-au realizat anumite corecții impuse de neconformitățile sesizate la proba anterioară. În vederea obținerii unei legări mai bune a componentelor rețetei, s-a mărit cantitatea de rășină fenolică, reducându-se cantitatea de aluminiu. Pentru extragerea probei din matrice s-au luat măsuri împotriva lipirii materialului compozit de partea inferioară a matricei și suprafața activă a pistonului acesteia. Astfel, pe aceste suprafețe se va așeza un strat de folie de aluminiu. Se mărește și timpul de menținere în cuptor.

Parametri:

Temperatura de
încalzire = 200 °C
Timp de încălzire =
15 min
Timp menținere = 25
min
Răcire: aer
Timp de răcire =10
ore



Observații: Probă necorespunzătoare atât ca aspect cât și ca structură. Aceasta prezintă zone cu tendință de dezmembrare în structură, care se datorează existenței unei cantități prea mici de rășină fenolică comparativ cu ceilalți constituenți din rețetă. Omogenizarea componentelor nu s-a realizat corespunzător, în structura probei observându-se urme de grafit neomogenizat, astfel se propune efectuarea unei amestecări mai energice a constituenților, un timp mai îndelungat. S-a observat că prin utilizarea staniolului s-a rezolvat problema lipirii probei de suprafața activă a pistonului și doar parțial s-a produs lipirea acesteia de partea inferioară a matriței. Se vor căuta în continuare soluții pentru evitarea lipirii materialului de baza matriței.

Proba 3

La realizarea celei de-a treia probe (P3) s-a menținut același regim de încălzire-menținere-răcire stabilit la proba anterioară și aceleași operații în obținerea probei, dar s-a mărit cantitatea de rășină fenolică și s-a redus cantitatea de aluminiu. S-a efectuat o amestecare mai energică a componentilor și un timp mai îndelungat, în vederea obținerii unui amestec mai omogen. Pentru evitarea lipirii probei de baza matriței se va presăra pe aceasta un strat subțire de grafit.

Parametri:

Temperatura de încălzire =
200 °C
Timp de încălzire = 15 min
Timp de menținere = 25 min
Răcire: aer
Timp de răcire =10 ore



Observații: Proba a fost extrasă din matriță fără probleme, ceea ce presupune că adoptarea soluției de protejare a părții inferioare a matriței cu folie și un strat de grafit este corespunzătoare. Proba este necorespunzătoare, atât ca formă, cât și ca structură. Aceasta prezintă mici zone cu cratere datorită neomogenizării rășinii, ceea ce impune ca măsură de remediere o omogenizare a componentilor din rețetă cu ajutorul unui mini-amestecător. Proba obținută nu are o grosime constantă, acestea se datorează forței de strângere a matriței care nu a fost aplicată constant și uniform. Există în probă zone în care pulberea metalică din rețetă este uscată

deoarece nu a fost umectată de rășină, motiv pentru care se va mări cantitatea de rășină.

Proba 4

La realizarea celei de-a patra probe (P4) s-a menținut același regim de încălzire-menținere-răcire stabilit la proba P2. Pentru obținerea unei omogenizări corespunzătoare a constituenților, amestecarea acestora se va face cu un mini-amestecător. Se vor păstra soluțiile de protejare a părții inferioare a matriței și a suprafeței părții active a pistonului, cu folie de aluminiu, respectiv cu un strat subțire de grafit.

Parametrii:

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 25 min

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba a fost extrasă din matriță fără probleme. În imagine se observă o probă bine întărită care pe alocuri prezintă zone în care există o cantitate mai mică de rășină. Ca măsură de remediere se va suplimenta cantitatea de rășină. De asemenea, se observă în structura acesteia zone de culoare argintie, semn că aluminiul nu a fost complet și uniform încorporat în ceilalți componenți. Se impune amestecarea cu o viteză mai mare și un timp mai îndelungat.

Proba 5

La realizarea probei P5 s-a mărit cantitatea de rășină fenolică, s-a micșorat temperatura de încălzire și s-a mărit timpul de menținere în cuptor. S-a realizat o amestecare mecanică energetică a componenților rețetei înainte de introducerea rășinii fenolice, iar după adăugarea acesteia s-a continuat amestecarea.

Parametrii:

Temperatura de încălzire = 180 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 30 min

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută are un aspect bun ca formă și structură. Legătura dintre constituenți este bună. Se observă o omogenizare corespunzătoare, ceea ce

presupune că adoptarea soluției de amestecare mecanică a constituenților solizi este corespunzătoare. Există totuși mici zone cu cratere care se datorează curgerii rășinii la baza matriței, ca măsură de remediere se va reduce puțin cantitatea de rășină.

Proba 6

La realizarea probei P6 s-a redus cantitatea de rășină fenolică cu 5 g, s-au păstrat parametrii regimului de încălzire-menținere-răcire, precum și ordinea de realizare a operațiilor de la proba precedentă. Soluții de protejare a matriței și a pistonului se păstrează, iar în ceea ce privește amestecarea aceasta se va realiza mecanic, atât înaintea introducerii rășinii, cât și după aceasta.

Parametri:

Temperatura de încălzire = 180 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 30 min

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută are un aspect bun ca formă și structură. Legătura dintre constituenți este bună. Există totuși mici zone cu cratere datorită neomogenizării amestecului în matriță, ca măsură de remediere se va încerca o modificare a ordinii de efectuare a operațiilor. Se vor introduce pe rând toți constituenții, în rășina fenolică și se va efectua o amestecare energetică. Proba este sfărâmicioasă, duritatea nefiind corespunzătoare. Se va încerca o presare a amestecului pe o presă hidraulică și se va reveni la temperatura de încălzire în cuptor de 200° C și se va mări timpul de menținere în cuptor.

Proba 7

La realizarea probei (P7) se omogenizează componentele pulverulente și se introduc apoi în rășină omogenizându-se energetic și un timp mai îndelungat compoziția, după care se efectuează o presare la rece, pe o presă hidraulică, tip PH 40 cu caracteristici tehnice prezentate în fig.4.13. Se va mări și temperatura de încălzire în cuptor și timpul de menținere al probei în interiorul cuptorului.

Parametri:

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 15 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută are un aspect bun ca formă geometrică, dar este lipsită de duritate. Se observă că aceasta are o fisură care se datorează unei forțe prea mari de presare și a unei structuri cu o porozitate mare. Omogenizarea constituenților s-a realizat corespunzător, dar de probă s-a lipit staniolul alimentar ca urmare a stratului de grafit prea subțire. Ca măsură de remediere se va încerca o presare cu o forță mai mică și se vor căuta soluții pentru creșterea durității.

Proba 8

În realizarea probei (P8) se va reduce forța de presare și se vor menține parametrii tehnologici de la proba anterioară.

Parametrii:

Temperatura de încălzire =
200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 10 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută are porozitate mai mică, dar are marginile rupte. Datorită forței de presare mult prea mari s-a pierdut o cantitate considerabilă de rășină, constituenții solizi rămânând fără legătură în structură, datorită acestui fapt, proba s-a crăpat la extragerea din matriță. Se va urmări reducerea forței de presare.

Proba 9

La realizarea probei (P9) se reduce forța de presare la 5 KN. De asemenea, se va încerca o presare la rece a amestecului după introducerea în matriță și o presare la cald, după 15 minute de la introducerea probei în cuptor, cu o forță de 5 KN, în vederea obținerii unei porozități mai mici și a unei durități mai mari.

Parametri:

Temperatura de încălzire =
200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 5 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută are porozitate mai mică, dar este sfărâncioasă. Parte superioară a probei se desface în straturi deoarece la eliberarea probei din matriță s-au aplicat lovituri multiple la baza matriței. Lipirea probei s-a datorat unui strat insuficient de grafit ca element de protecție la lipire. La următoarele probe se va

aplica mai mult grafit la baza matriței. O altă cauză datorită căreia proba se desface în straturi este și faptul că prin încălzire puternică și presare, proba prezintă tendința de dezmembrare în straturi. Se caută soluții de realizare a unei presări la cald, precum și soluții de mărire a durtății.

Proba 10

La realizarea probei (P10) se păstrează parametrii tehnologici anterior stabiliți s-a mărit cantitatea de fibră de nucă de cocos. De asemenea s-a efectuat o presare la cald la 15 min după introducerea ansamblului probă-matriță în cuptor.

Parametrii:

Temperatura de încălzire = 200 °C
 Timp de încălzire = 15 min
 Timp menținere = 45 min
 Forța de presare la rece 5 KN
 Forța de presare la cald 5 KN
 Răcire: aer
 Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută este corespunzătoare ca formă geometrică și structură, porozitatea este mică, dar duritatea nu este corespunzătoare. Ca măsură de remediere se va introduce hexametyltetramină care are rolul de a transforma rășina din termoplastă în termorigid. Se observă lipirea staniolului alimentar de probă, motiv pentru care, la proba următoare se va suplimenta stratul de grafit. Proba prezintă neomogenități datorită faptului că amestecarea s-a realizat cu dificultate, aceasta datorită faptului că fibra de nucă de cocos este mai ușoară și se amestecă mai greu cu celelalte materiale pulverulente.

Proba 11

La realizarea probei (P11) s-au introdus constituenți noi în rețetă: oxid de aluminiu, sulf și hexametyltetramină. S-a încercat realizarea a două presări cu reintroducerea probei în cuptor.

Parametrii:

Temperatura de încălzire = 200 °C
 Timp de încălzire = 15 min
 Timp menținere = 45 min
 Forța de presare la rece 5 KN
 Forța de presare la cald 5 KN
 Răcire: aer
 Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba are consistență corespunzătoare și este satisfăcătoare atât ca formă, cât și ca structură. Porozitatea este bună, iar duritatea s-a îmbunătățit, introducerea hexametyltetraminei este o soluție corespunzătoare. Pentru obținerea unei durtăți mai mari se va încerca mărirea cantității de hexametyltetramină. În partea centrală a probei rezultate se observă existența unui crater. Acesta nu se datorează lipirii materialului de pistonul matriței, deoarece la desprindere suprafața acestuia nu prezintă urme de material. Cauza formării craterului se datorează

acumulării de gaze rezultate în urma procesului de sinterizare. Din cauza presării excesive gazele nu au putut fi eliberate în exterior. La atingere se desprinde un praf fin de culoare neagră care se datorează grafitului din compoziție. Se va micșora cantitatea de grafit din rețetă.

Proba 12

La realizarea probei (P12) se vor menține aceiași componenți, doar că se reduce cantitatea de oxid de titan, se mărește în compensație cantitatea de oxid de aluminiu și se reduce la jumătate cantitatea de grafit.

Parametri:

Temperatura de încălzire = 200 °C
 Timp de încălzire = 15 min
 Timp menținere = 45 min
 Forța de presare la rece 5 KN
 Forța de presare la cald 5 KN
 Răcire: aer
 Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba are formă, consistență și structură corespunzătoare, iar în ceea ce privește porozitatea și densitatea sunt mult mai bune decât cele obținute la proba precedentă. În partea centrală a probei rezultate se observă existența unui crater mai mic decât în cazul anterior. Cauza formării craterului se datorează tot prezenței sulfului din rețetă, din acest motiv se va renunța la acest constituent.

Proba 13

La realizarea probei P13 se va încerca o amestecare diferită a constituenților solizi. Prima dată se va amesteca aluminiul și oxidul de titan, după care se adaugă oxid de zirconiu și carbură de siliciu, iar la final grafitul. Separat se amestecă rășina și hexametyltetramina și se schimbă ordinea de amestecare, în sensul că materialele pulverulente amestecate se vor introduce în amestecul de rășina și hexametyltetramină.

Parametri:

Temperatura de încălzire = 200 °C
 Timp de încălzire = 15 min
 Timp menținere = 45 min
 Forța de presare la rece 5 KN
 Forța de presare la cald 5 KN
 Răcire: aer
 Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută arată bine ca formă și structură și are o duritate satisfăcătoare. Se observă o omogenizare corespunzătoare a constituenților și o solidificare corespunzătoare a acestora, ceea ce arată că ordinea operațiilor în obținerea materialului compozit este corespunzătoare, regimul de încălzire-menținere-răcire este corespunzător, presarea aplicată, atât la cald, cât și la rece realizează o compactare eficientă a materialului. Pe suprafața probei au rămas zone cu staniol alimentar. Suprafața probei este netedă, această probă fiind considerată bună din punct de vedere calitativ.

Proba 14

La realizarea probei P14 se mențin parametrii tehnologici anteriori, precum și succesiunea operațiilor realizate la proba P13.

Parametri :

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 5 KN

Forța de presare la cald 5 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută are un aspect bun ca formă geometrică, are o consistență bună, legătura dintre constituenți s-a realizat corespunzător, iar duritatea este corespunzătoare. Se consideră o probă bună care poate fi luată în considerare pentru determinarea experimentală a caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice.

Proba 15

Parametri :

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 5 KN

Forța de presare la cald 5 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Aceasta se consideră o probă reușită și poate fi folosită pentru prelevarea epruvetelor necesare efectuării experimentelor pentru caracterizarea materialului compozit.

Proba 16**Parametrii:**

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 5 KN

Forța de presare la cald 5 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Probă bună ca și consistență, formă și structură, cu o duritate corespunzătoare. Se observă o lipire a staniolului alimentar pe alocuri de suprafața probei care este destul de netedă. Există zone cu aderențe, dar proba este considerată bună și poate fi folosită în experimentările următoare.

Proba 17

La realizarea probei P17, se păstrează aceiași constituenți, doar că cele 13 g de oxid de titan sunt înlocuite cu aceeași cantitate de oxid de aluminiu.

Parametri:

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 5 KN

Forța de presare la cald 5 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: Probă dură, cu o formă geometrică bună și o consistență corespunzătoare. Proba va fi utilizată la prelevarea epruvetelor pentru testele următoare.

Proba 18**Parametri :**

Temperatura de încălzire = 200 °C

Timp de încălzire = 15 min

Timp menținere = 45 min

Forța de presare la rece 5 KN

Forța de presare la cald 5 KN

Răcire: aer

Timp de răcire = 10 ore



Observații: La extragerea din matriță proba și-a păstrat integritatea. Forma s-a geometrică este bună, porozitatea și duritatea sunt corespunzătoare. Proba este selectată în vederea efectuării testelor următoare.

Proba 19**Parametri :**

Temperatura de încălzire = 200 °C
 Timp de încălzire = 15 min
 Timp menținere = 45 min
 Forța de presare la rece 5 KN
 Forța de presare la cald 5 KN
 Răcire: aer
 Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba dură, cu suprafață netedă și forma geometrică complet circulară. Nu există zgârieturi și aderențe pe suprafața acesteia. Suprafețele probei sunt netede, această probă fiind considerată bună din punct de vedere calitativ.

Proba 20**Parametrii:**

Temperatura de încălzire = 200 °C
 Timp de încălzire = 15 min
 Timp menținere = 45 min
 Forța de presare la rece 5 KN
 Forța de presare la cald 5 KN
 Răcire: aer
 Timp de răcire = 10 ore



Observații: Proba obținută arată bine ca formă și structură și are o duritate satisfăcătoare. Se observă o omogenizare corespunzătoare a constituenților și o solidificare corespunzătoare, ceea ce arată că ordinea operațiilor în obținerea materialului compozit este corespunzătoare, regimul de încălzire-menținere-răcire este corespunzător, presarea aplicată, atât la cald, cât și la rece realizează o compactare eficientă a materialului. Există mici aderențe în partea centrală a probei, dar proba poate fi folosită pentru prelevarea epruvetelor necesare efectuării experimentelor următoare.

La presarea probei P7 s-a distrus matrița, din acest motiv s-a realizat o altă matriță mai solidă cu posibilități de presare și strângere uniformă a probei. Presarea s-a realizat prin intermediul unui dorn, poziționat pe pistonul matriței, iar strângerea s-a realizat prin intermediul a două șuruburi. În fig.4.14 se prezintă elementele componente ale noii matrițe. În fig.4.15 se prezintă soluția îmbunătățită a ansamblului noii matrițe realizate.



Fig.4.14 Elemente componente ale matriței nou concepute



Fig.4.15 Soluția îmbunătățită a ansamblului matriței

În fig.4.16 se prezintă strângerea pistonului matriței pentru presarea materialului compozit, iar în fig.4.17 se prezintă presarea ansamblului probă-matriță cu ajutorul presei hidraulice PH 40.



Fig.4.16 Strângerea pistonului matriței



Fig.4.17 Presarea ansamblului probă-matriță cu ajutorul presei hidraulice PH 40

Realizarea experimentărilor au avut la bază o documentare temeinică din literatura de specialitate și o multitudine de încercări până la stabilirea proporției componentelor din rețete. Din cadrul lucrării au fost excluse experimentările care nu au adus o evoluție în realizarea rețetelor destinate dezvoltării noilor materiale compozite. În acest sens, experimentările s-au efectuat succesiv, îndepărtându-se marea majoritate a problemelor apărute prin luarea unor decizii în direcția obținerii unor probe corespunzătoare din punct de vedere al formei geometrice, al integrității, al structurii, al compactității, al durității eșantionului, precum și a porozității.

Din multitudine de rețete elaborate s-au selectat opt, acestea fiind utilizate în cadrul experimentelor următoare, acestea sunt cele realizate după rețetele P13-P20 (tabelul 4.2).

Analizând cele opt rețete selectate se observă că acestea pot fi împărțite în două familii de materiale compozite datorită compoziției similare a componentelor. Astfel rețetele P13, P14, P15 și P16 păstrează aceeași cantitate de grafit, oxid de zirconiu, carbură de siliciu, rășină fenolică și hexametiltetramină. Toate cele patru rețete conțin câte 13 g de TiO_2 (13%), în timp ce cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos variază cu ± 5 grame ($\pm 5\%$) de la o rețetă la alta. Aceste rețete formează familia F1 de materiale compozite.

Rețetele din care s-au realizat probele P17, P18, P19 și P20, păstrează aceeași cantitate de grafit, oxid de zirconiu, carbură de siliciu, rășină fenolică și

hexametyltetramină. Toate cele patru rețete conțin câte 13 g de oxid de aluminiu, în timp ce cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos variază cu ± 5 grame ($\pm 5\%$) de la o rețetă la alta. Aceste rețete formează familia F2 de materiale compozite care vor fi analizate în continuare.

În tabelul 4.4 se prezintă compoziția chimică a familiilor F1, respectiv F2 de materiale compozite, dezvoltate în cadrul acestei lucrări.

Tabelul 4.4. Compoziția chimică a celor două familii de materiale compozite care vor constitui obiectul studiilor experimentale următoare

Familia de compozite F1									
Proba	Aluminiu [%]	Graphite [%]	Oxid de zirconiu [%]	Carbură de siliciu [%]	Oxid de titan [%]	Hexam. [%]	Reșină fenolică [%]	Cocos [%]	Total [%]
P13	25	4	2	10	13	6	40	0	100
P14	20	4	2	10	13	6	40	5	100
P15	15	4	2	10	13	6	40	10	100
P16	10	4	2	10	13	6	40	15	100
Familia de compozite F2									
Proba	Aluminiu [%]	Graphite [%]	Oxid de zirconiu [%]	Carbură de siliciu [%]	Oxid de aluminiu [%]	Hexam. [%]	Reșină fenolică [%]	Cocos [%]	Total [%]
P17	25	4	2	10	13	6	40	0	100
P18	20	4	2	10	13	6	40	5	100
P19	15	4	2	10	13	6	40	10	100
P20	10	4	2	10	13	6	40	15	100

Cele două familii de materiale compozite vor fi analizate din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice, în vederea luării unor decizii cu privire la selectarea unor rețete care să întrunească caracteristicile corespunzătoare realizării plăcuțelor de frână.

În funcție de rezultatele obținute, dacă este cazul se vor produce probe la care proporția de aluminiu și fibră de nucă de cocos variază cu $\pm 1-2$ grame (1-2%) [48], [65], [72].

Analizând tabelul 4.4 se observă că, în cadrul aceleiași familii de compozite, aproximativ 75% dintre constituenți au fost menținuți la aceeași proporție și s-a modificat cu câte ± 5 g proporția de aluminiu și fibră de nucă de cocos. Diferența de la o familie de compozite la cealaltă constă în faptul că, prima familie are în compoziție oxid de titan, iar cea de a doua oxid de aluminiu, ambele componente având proporții identice.

Efectuând o analiză critică a rețetelor specifice celor două familii de materiale compozite se observă că, acestea sunt alcătuite dintr-un număr relativ mic de componente comparativ cu alte rețete analizate în literatura de specialitate. O rețetă similară a fost studiată în lucrarea [79], diferența dintre aceasta și familia F2 constă, pe de o parte, în proporția diferită a constituenților, iar pe de altă parte, în adăugarea de elemente noi, cum ar fi hexametyltetramina. În ceea ce privește familia F1 de material compozite produse, diferența constă în înlocuirea oxidului de titan cu oxid de aluminiu, pe lângă proporția diferită a componentelor rețetelor și adăugarea hexametyltetraminei.

Analizând inconvenientele care există în ceea ce privește compozitele produse, acestea constau în faptul că, fibra de nucă de cocos are un preț relativ

mare, fructul fiind unul exotic, iar prețul oxidului de titan este mai mare decât al oxidului de aluminiu.

Din probele disc realizate din fiecare rețetă de material compozit (P13-P20) s-au executat epruvete destinate determinării caracteristicilor fizico-mecanice. Astfel, din fiecare probă se vor preleva epruvete pentru determinarea durtății, a densității, a porozității, epruvete pentru analiza morfologiei suprafețelor, precum și pentru efectuarea încercărilor mecanice. În fig.4.18 se prezintă un set complet de probe realizate din cele opt rețete de materiale compozite din care s-au obținut probe bune în urma procesului de sinterizare.

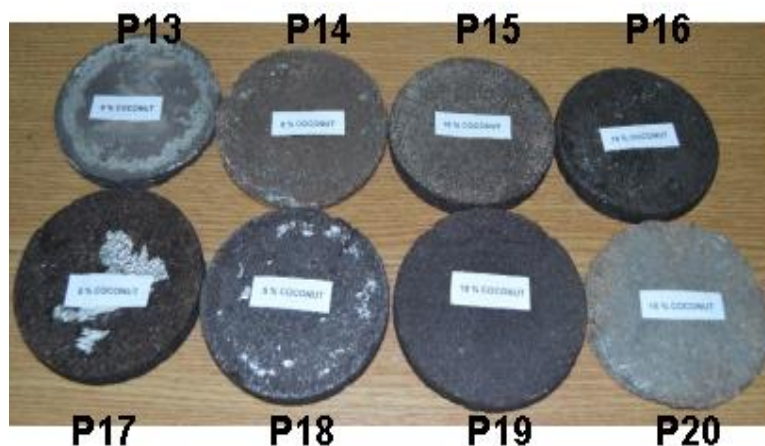


Fig.4.18 Probe selectate în vederea determinării caracteristicilor fizico-mecanice

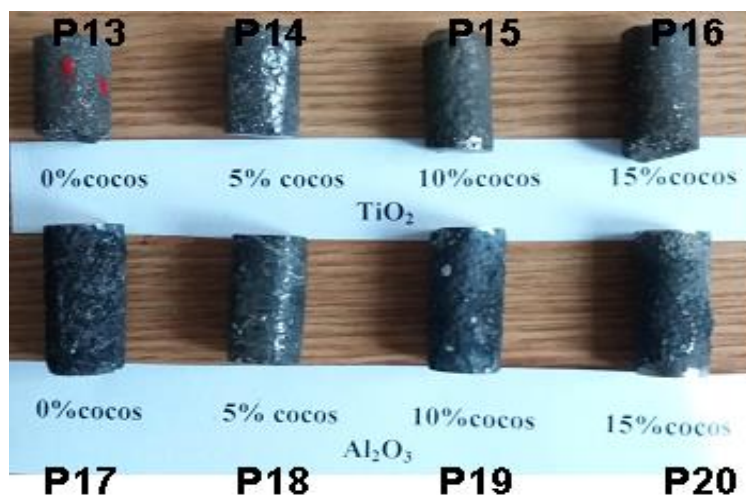


Fig.4.19 Pini realizați în vederea efectuării testelor tribologice

Pentru determinarea caracteristicilor tribologice ale materialelor compozite organice, s-au executat și probe cilindrice, utilizând matrița prezentată în fig.4.4. În fig.4.19 se prezintă un set de probe cilindrice realizate din cele opt rețete din care

se vor preleva pini cu dimensiunile în conformitate cu instalațiile tribologice pe care se vor testa materialele compozite.

La obținerea în laborator a probelor din materialele compozite s-au întâmpinat o serie de dificultăți cum ar fi:

- omogenizarea componentelor din rețete [24];
- corelarea raportului material pulverulent/ rășină fenolică [24];
- corelarea raportului material pulverulent/hexametyltetramină:
- stabilirea dozajului constituenților rețetelor [24];
- lipirea probelor de pereții matriței și de pistonul acesteia [24];
- obținerea unei forme geometrice complet circulară și a unei suprafețe netede;
- stabilirea forței de presare, a timpului de menținere în cuptor și a temperaturii cuptorului pentru ca procesul de sinterizare să se desfășoare corespunzător

Rezolvarea acestor neajunsuri s-a realizat prin:

- folosirea unui amestecător mecanic pentru obținerea unui amestec omogen;
- mărirea cantității de rășină fenolică pentru a realiza legătura dintre constituenți;
- utilizarea foliei de aluminiu și a stratului de grafit pentru rezolvarea problemei lipirii probei de matriță și de suprafața activă a pistonului acesteia [24];
- stabilirea ordinii de amestecare a constituenților;
- realizarea unei presări la rece și a unei presări la cald.

În timpul amestecării componentelor s-a observat că factorii care influențează obținerea unui amestec omogen sunt:

- viteza de amestecare;
- cantitatea de rășină fenolică;
- ordinea de amestecare a componentelor.

În ceea ce privește, ordinea de amestecare a componentelor se poate generaliza după cum urmează: mai întâi se amestecă materialele cu greutate specifică mică, utilizând o viteză de amestecare mai mică. Acestea se vor introduce peste cele cu greutate specifică mai mare, care se vor amesteca cu o viteză mai mare, iar la final, întregul amestec solid se va introduce peste rășina fenolică amestecată cu hexametyltetramina, ambele lichide, continuându-se omogenizarea mecanic.

Obținerea unei probe compacte este influențată de:

- regimul de încălzire-menținere-răcire;
- omogenitatea componentelor;
- forța de presare.

Pe parcursul experimentărilor au rezultat următoarele observații:

- dacă timpul în care se realizează amestecarea constituenților din rețetă este mic există posibilitatea să nu se realizeze o omogenizare corespunzătoare a acestora;
- creșterea exagerată a timpului de amestecare nu duce la îmbunătățirea continuă a omogenității constituenților;
- strângerea și presarea exagerată a probelor în matriță duce la acumularea gazelor în centrul probei, aceasta solidificându-se cu un gol de contracție.

Inconvenientul major la producerea materialelor compozite este prețul ridicat al materiei prime, nuca de cocos fiind un fruct exotic.

4.2. Caracterizarea materialelor compozite

În acest capitol se prezintă rezultatele obținute în urma efectuării cercetărilor experimentale cu privire la determinarea caracteristicilor fizico-mecanice ale celor două familii de materiale compozite produse după rețete proprii, în vederea stabilirii compatibilității lor cu destinația pentru care au fost realizate și anume fabricarea plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii.

Programul cercetărilor experimentale privind caracterizarea materialelor compozite cuprinde:

- **determinarea densității, a porozității și a durtății;**
- **determinarea rezistenței mecanice la compresiune;**
- **analiza morfologiei suprafețelor;**
- **optimizarea rețetelor prin calcul statistico-matematic;**
- **analize tehnologice și îmbunătățirea tehnologiei de sinterizare;**
- **producerea materialelor compozite după rețetele optimizate;**
- **determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și analiza morfologiei suprafețelor pentru materialele compozite produse după rețetele optimizate.**

În acest sens, s-au executat mai multe probe disc din fiecare rețetă selectată (P13-P20) în paragraful 4.1.4, tabelul 4.4 din care s-au prelevat epruvete având dimensiunile în concordanță cu standardele în vigoare. După determinarea caracteristicilor fizico-mecanice, acestea au fost comparate cu caracteristicile altor materiale compozite cu destinație similară existente în literatura de specialitate.

4.2.1. Determinarea densității, a porozității și a durtății

Densitatea este o mărime fizică care caracterizează materialele (masa și volumul acestora) și este definită ca fiind masa unității de volum [80].

Determinarea densității celor două familii de materiale compozite produse după rețete proprii, s-a realizat pe epruvete cu dimensiunile (25x25x7)mm, prelevate din probe disc, utilizând metoda volumului de lichid dezlocuit [79],[81],[82],[83],[84]. În acest scop, s-a realizat cântărirea epruvetelor cu o balanță analitică, tip Sortorius având precizia de 0,0001g. Densitatea fiecărei probe de material compozit s-a determinat cu relația [79], [82], [83]:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

În care: m- masa probei din material compozit, [g];

V – volumul de lichid dezlocuit de probă, [cm³];

Determinarea densității s-a realizat pentru cinci epruvete realizate din fiecare probă realizată după rețetele P13-P20 cu compoziția chimică prezentată în tabelul 4.4. În determinarea densității finale a fiecărui material s-a utilizat estimatorul valorii reale, determinat cu relația [85], [86]:

$$x_{med.} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{5}, \quad (4.2)$$

Abaterile absolute sunt abaterile valorilor particulare de la valoarea medie [85], [86]:

$$\Delta x_i = x_{\text{med.}} - x_i \quad ; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4.3)$$

În continuare s-a calculat abaterea medie pătratică sub formă corectată cu relația [85], [86]:

$$\Delta x_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}} \quad (4.4)$$

Forma finală a unui rezultat obținut în urma măsurărilor, în cazul unei serii cu puține măsurători, cum este cazul de față, s-a determinat cu relația [85], [86]:

$$x_{\text{real}} = x_{\text{med.}} \pm \Delta x_c \quad (4.5)$$

Rezultatele obținute pentru densitățile materialelor compozite organice se prezintă în tabelul 4.5.

Porozitatea este o caracteristică brută a structurii porilor existenți într-un material. Rolul porozității este de a absorbi energia și căldura rezultată din procesul de frânare [68],[79],[82], [83]. Principiul de determinare a porozității constă în parcurgerea următoarelor etape [68], [79], [82], [83]:

- din probele disc realizate din fiecare rețetă de material compozit aferentă probelor selectate în capitolul anterior (P13-P20) s-au debitat epruvete cu dimensiunile de (25x25x7)mm, fig.4.20;

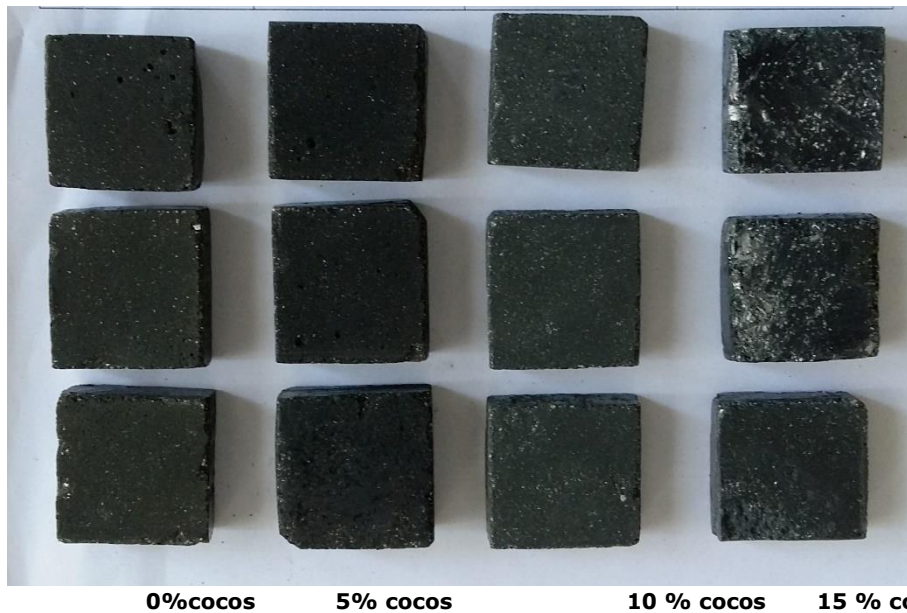


Fig.4.20 Eșantion de epruvete din familia F1 (TiO_2) pregătite în vederea determinării porozității

- Epruvetele au fost introduse într-un desicator la temperatura camerei în vederea uscării;
- După uscare s-a realizat cântărirea epruvetelor, notându-se masa acestora, M_0 ;

- S-au introdus epruvetele într-un vas cu ulei încălzit la temperatura 94°C (90 ± 10°C) și s-au menținut la această temperatură timp de 8 ore;
- S-a scos vasul din cuptor și s-a lăsat să se răcească timp de 12 ore la temperatura ambiantă;
- S-au scos probele din ulei și au fost rulate pe o lavetă, în vederea îndepărtării surplusului de ulei;
- După efectuarea acestei proceduri, epruvetele a fost cântărite din nou, notându-se masa acestora, M_f ;
- Ținând cont de valorile inițiale și finale ale maselor înregistrate pentru fiecare probă se va determina porozitatea, cu relația [82]:

$$\text{Porozitate (\%)} = \frac{M_f - M_i}{M_i} \cdot 100$$

(4.6)

- Valorile porozității în ulei pentru fiecare probă sunt prezentate în tabelul 4.5. Pentru fiecare probă s-au efectuat trei determinări, valoarea porozității finale fiind media aritmetică a valorilor obținute.

Duritatea este o caracteristică a rezistenței materialelor la deformarea plastică [87]. În vederea caracterizării materialelor compozite produse după rețete proprii s-a determinat duritatea prin metoda Rockwell. Determinarea durității s-a efectuat pe aparatura existentă în dotarea Laboratorului de Rezistența materialelor din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara. În ceea ce privește încercarea de duritate Rockwell, aceasta s-a efectuat pe o mașină de încercat tip PC-C-01/02 în concordanță cu standardul EN ISO 6508:2002 [87], [88], pe probe disc a căror suprafețe sunt plane, lipsite de oxizi și impurități, realizate din probele P13-P20.

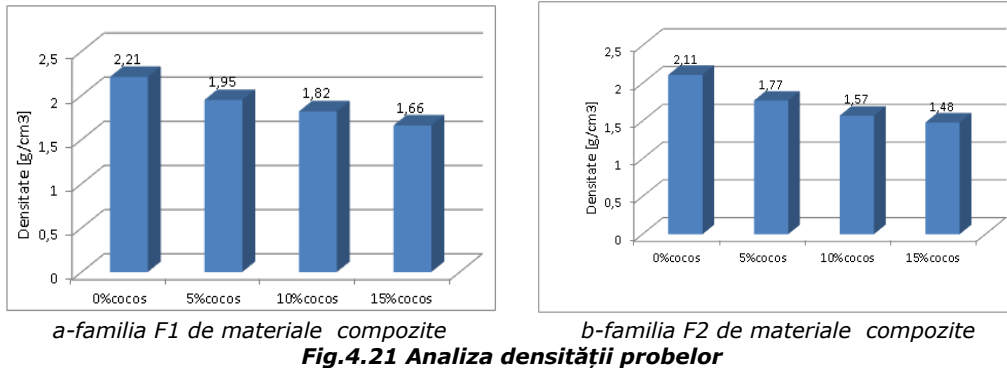
Măsurătorile au fost conduse după scara B, sub o sarcină de 980,6 N, folosind o bilă de oțel cu diametrul de 1,58 mm. Viteza de efectuare a încercărilor a fost de 0,8 m/s, iar timpul de așteptare a fost de 10s [87]. Valoarea durității pentru fiecare probă de material compozit se prezintă în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5. Valorile caracteristicilor fizico-mecanice pentru cele două familii de materiale compozite

Nr. crt.	Familia de compozite	Proba	Densitate [g/cm ³]	Porozitate [%]	Duritate HRB
1	F1 (TiO ₂)	P13	2,21	18,31	51
2		P14	1,95	16,33	60
3		P15	1,82	15,25	66
4		P16	1,66	17,61	63
5	F2 (Al ₂ O ₃)	P17	2,11	23,82	55
6		P18	1,77	16,73	59
7		P19	1,57	14,23	61
8		P20	1,48	19,66	49

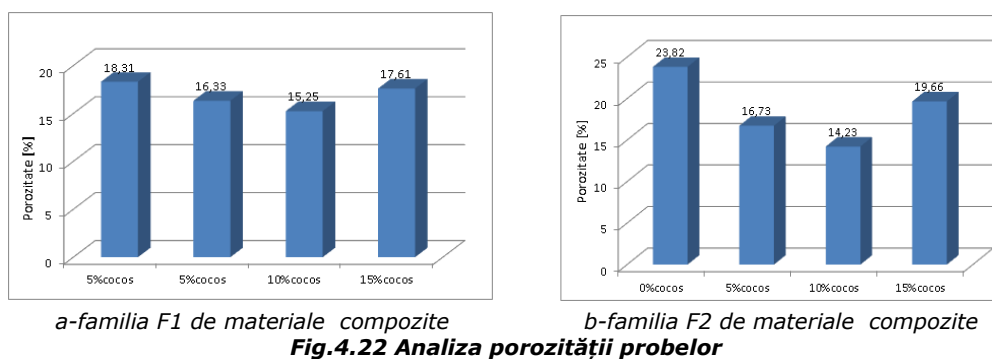
Rezultatele prezentate în tabelul 4.5 sunt analizate grafic în fig.4.21 – 4.23.

În fig.5.8a se prezintă rezultatele obținute pentru densitățile probelor P13-P16 aparținând familiei F1 de materiale compozite produse după rețete proprii, iar în fig.5.8b se prezintă grafic rezultatele obținute pentru densitățile probelor P17-P20 aparținând celei de a doua familii de materiale compozite.



Analizând rezultatele din aceste figuri se observă că valorile densităților pentru cele două familii de compozite produse sunt relativ scăzute comparativ cu densitățile metalelor. În fiecare din cele două familii, cea mai mare densitate o au epruvetele produse după rețetele fără fibră de nucă de cocos (P13, P17), aceasta datorită faptului că în aceste rețete există cea mai mare cantitate de metal. Acestea sunt urmate de probele realizate cu 5 % fibră organică (P14, respectiv P18), apoi de cele cu 10 % fibră de nucă de cocos (P15, P19) și în final de cele cu 15 % fibră organică (P16-P20), în acestea existând și cea mai mică cantitate de metal. Densitatea depinde de procentul componentelor introduse în rețete [68], [72], [80]. Având în vedere faptul că un element metalic are o densitate mai mare decât un element organic [64], [65], [79], [90], acest fapt justifică valorile obținute pentru densitățile materialelor compozite. Pe de altă parte, densitatea probei P13 (familia F1 realizată cu TiO_2) este mai mare decât a probei P17 (familia F2 realizată cu Al_2O_3), deși în ambele rețete procentele lor sunt identice, diferența contând doar în faptul că în proba P13 există oxid de titan, iar în proba P17 conține oxid de aluminiu. Valoarea diferită a densității celor două probe se explică prin faptul că densitatea titanului este mai mare decât cea a aluminiului [76], [78], [80].

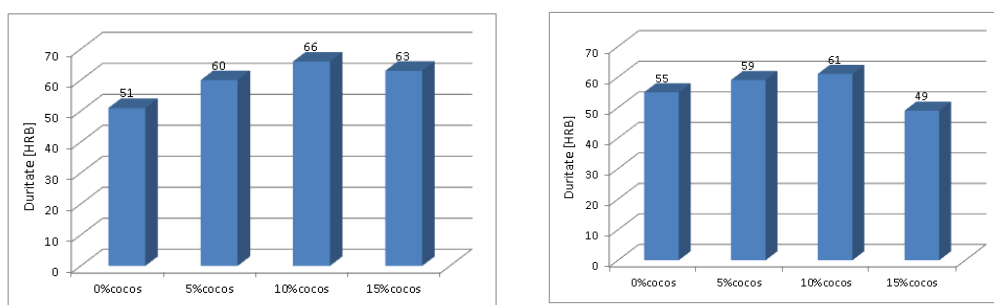
În fig.4.22a și b se prezintă graficele porozității în ulei pentru probele P13-P20 aparținând celor două familii de materiale compozite produse în laborator după rețete proprii.



Porozitatea este o caracteristică brută a structurii porilor și oferă informații asupra fracțiunii din volumul total de material care nu este umplută [68], [79], [82], [83]. Din fig.4.22a și b se observă că, pentru familia F1, cea mai mică valoare a

porozității s-a obținut pentru proba P15, iar pentru familia F2, cea mai mică porozitate o are proba P19, ambele probe fiind realizate cu 10% fibră organică. Pe de altă parte, plăcuțele de frână trebuie să aibă o anumită porozitate pentru a minimiza efectul apei și a uleiului asupra coeficientul de frecare și pentru a reduce zgomotul din timpul frânării [79].

În fig.4.23a și b se prezintă graficul durității probelor P13-P16, respectiv P17-P20.



a-familia F1 de materiale compozite

b-familia F2 de materiale compozite

Fig.4.23 Analiza durității probelor

Analizând fig.4.23a,b se observă că:

- **Pentru familia F1 de materiale compozite produse**, valoarea cea mai mare a durității este de 66 HRB pentru proba P15 și, iar cea mai mică valoare este înregistrată pentru proba P13 și este de 51 HRB;
- **Pentru familia F2 de materiale compozite**, cea mai mică valoare a durității este de 49HRB obținută pentru proba P20, iar cea mai mare valoare este de 61HRB obținută pentru proba P19.

După datele din literatura de specialitate, atunci când componenta metalică are procent mai mare, duritatea va fi mai mare, iar când aceasta este mai mică, duritatea va fi mai mică [73]. Această teorie nu se confirmă în cazul materialelor compozite produse, deoarece cele mai mari densități le au probele P13, respectiv P17 care au cea mai mare cantitate de metal în rețetă, dar nu au și cea mai mare duritate. Acestea se datorează pe de o parte tehnologiei de sinterizare, iar pe de altă parte procentului de componenți din rețetă [73].

În general, pentru plăcuțele de frână se urmărește obținerea unui coeficient de frecare mare și a unei rate de uzură mici, acestea presupunând existența unei porozități mici [68],[83]. Literatura de specialitate arată că, în vederea creșterii stabilității la frânare, duritatea trebuie să fie relativ scăzută, dar dacă porozitatea este prea mare, duritatea va fi redusă, rezultând o creștere a uzurii prin frecare a materialului [73], [83]. *Aceasta impune realizarea unor studii asupra parametrilor de uzare pentru materialele studiate în vederea luării unei decizii cu privire la utilizarea lor în producerea plăcuțelor de frână.*

4.2.2. Determinarea rezistenței mecanice la compresiune

Caracteristicile mecanice ale materialelor compozite, trebuie determinate experimental, în acest sens fiind necesare un număr minim de încercări pe baza cărora să poată fi caracterizat satisfăcător materialul respectiv [89]. Metodele de

Încercare mecanică pentru materialele compozite trebuie să fie adecvate tipului de material analizat, dar și destinației produsului ce urmează a se realiza din materialul respectiv [1], [2], [89]. În cazul de față, *materialele compozite produse după rețete proprii sunt destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii, principala solicitare la care sunt supuse acestea în ansamblul sistemului de frânare fiind compresiunea.*

În vederea efectuării unei analize calitative a rețetelor produse pe baza tehnologiei de obținere stabilită în subcapitolul 4.1, paragraful 4.1.4 și având în vedere destinația acestor materiale, s-a determinat rezistența la compresiune.

Inițial s-au realizat experimentări preliminare pentru rețetele P5, P6, P11 și P12, probele obținute după aceste rețete fiind considerate mai puțin reușite. Astfel, din fiecare probă disc s-au realizat câte două epruvete paralelipipedice care au fost supuse încercării mecanice de compresiune, rezultatele dependențelor forță-deformație fiind prezentate în Anexa 1 după cum urmează: fig.A1.1-A1.2-proba realizată după rețeta P5 din tabelul 4.1, fig.A1.3-A1.4 proba realizată după rețeta P6 din tabelul 4.1, fig.A5-A6- proba realizată după rețeta P11 din tabelul 4.2, fig.A1.7-A1.8- proba realizată după rețeta P12 din tabelul 4.2. Aceste încercări s-au realizat cu scopul cunoașterii valorii forței de rupere maxime pentru aceste probe considerate nereușite. Se observă că, forțele de rupere au valori relativ scăzute, în majoritatea cazurilor sub 1000N, dar pentru unele rețete, cum este cea după care a fost realizată proba P6, forța de rupere maximă a atins valoarea de 5000N, ceea ce arată că există rezerve de rezistență pentru unele rețete de materialele compozite.

În continuare s-a determinat rezistența mecanică la compresiune pentru probele P13-P20, (compoziția chimică prezentată în tabelul 4.4) care sunt considerate probe reușite ca urmare a tehnologiei de sinterizare. Încercarea la compresiune s-a efectuat în Laboratorul de Rezistența Materialelor din cadrul Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor de la Universitatea „Politehnica” din Timișoara, pe un echipament de încercare de tip Zwick/Roell Z005 care are caracteristicile tehnice prezentate în fig.4.24 [90].

Caracteristici tehnice

Forța maximă de testare: 5 kN
 Viteza maximă de încercare: 3000 mm/min
 Temperatura de încercare: 0-250 °C
 Presiune max. în zona ariei de contact: 300 N/mm²



Fig.4.24 Echipamentul pentru efectuarea încercărilor mecanice, tip Zwick/Roell Z005 aflat în dotarea laboratorului de Rezistența materialelor de la Facultatea de Mecanică, Timișoara

Echipamentul de încercare lucrează cu softul testXpert II, care utilizează un limbaj de programare specific încercărilor fizico-mecanice- ZIMT (Zwick Interpreter for Materials Testing). Acest limbaj de programare oferă operatorului o mare flexibilitate, permițând accesarea celor mai avansate funcții, parametrii și date de testare pentru încercările mecanice. Acesta are o interfață specifică exportului de date către cele mai cunoscute sisteme sau programe de profil, cum ar fi: Word, Excel, Adobe, Access, Oracle, SAP, MySQL, etc. Softul este gândit în sistem modular, putând fi utilizat pentru mai multe instrumente de testare Zwick/Roell [90].

Încercarea la compresiune s-a efectuat pe un eșantion de opt epruvete paralelipipedice realizate din probe disc cu diametrul de 95 mm, probe disc realizate din fiecare rețetă de material compozit (P13-P20). Înainte de efectuarea testului de încercare mecanică la compresiune s-au măsurat cu precizie dimensiunile epruvetelor (Lxlxh) acestea fiind prezentate în Anexa 2 (pentru familia F1 de materiale compozite în tabelul A2.1, iar pentru familia F2 de materiale compozite în tabelul A2.2). Dimensiunile probelor s-au introdus ca date de intrare în calculatorul conectat la echipamentul de încercare. În vederea efectuării determinărilor experimentale, s-a urmărit ca epruvetele să nu prezinte urme de incluziuni metalice, retasuri sau alte defecte. Acestea au fost supuse unei forțe de compresiune, aplicată continuu până la producerea ruperii. Sarcina maximă la care s-a produs ruperea a fost înregistrată de softul corespunzător, care a preluat datele experimentale de la echipamentul de încercare și le-a prelucrat statistic [90].

În fig.4.25 se prezintă un eșantion de epruvete, aparținând familiei F1 de materiale compozite, pregătite în vederea efectuării încercării mecanice la compresiune.



Fig.4.25 Eșantion de probe aparținând familiei de compozite F1, pregătite pentru efectuarea încercării mecanice de compresiune

În vederea efectuării încercării mecanice la compresiune, probele au fost poziționate pe rând pe masa echipamentului de încercare, asupra lor acționându-se cu o forță până la apariția primei fisuri care inițiază ruperea [81]. Se menționează că experimentările au fost efectuate cu o viteză de încărcare de 20mm/min, la temperatura de 28°C. În urma efectuării încercării mecanice de compresiune,

rezultatele experimentale se prezintă sub formă de grafice și tabele. În fig.4.26 se prezintă un exemplu de vizualizare a parametrilor înregistrați de softul echipamentului de încercare Zwick-Roell.

În fig.4.27-4.30 se prezintă graficele dependențelor forță-deformație înregistrate de softul echipamentului de încercare pentru opt epruvete realizate din fiecare rețetă de material compozit aparținând familiei F1 (P13-P16). Pentru probele P17-P20, rezultatele se prezintă în fig.4.31-4.34.

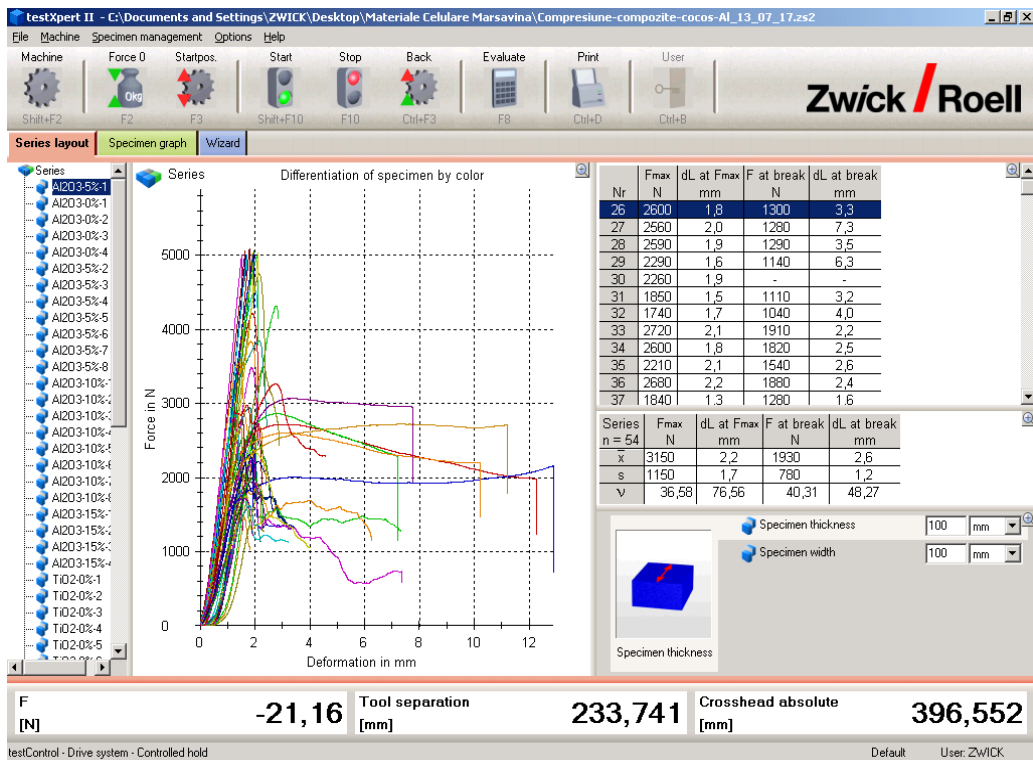
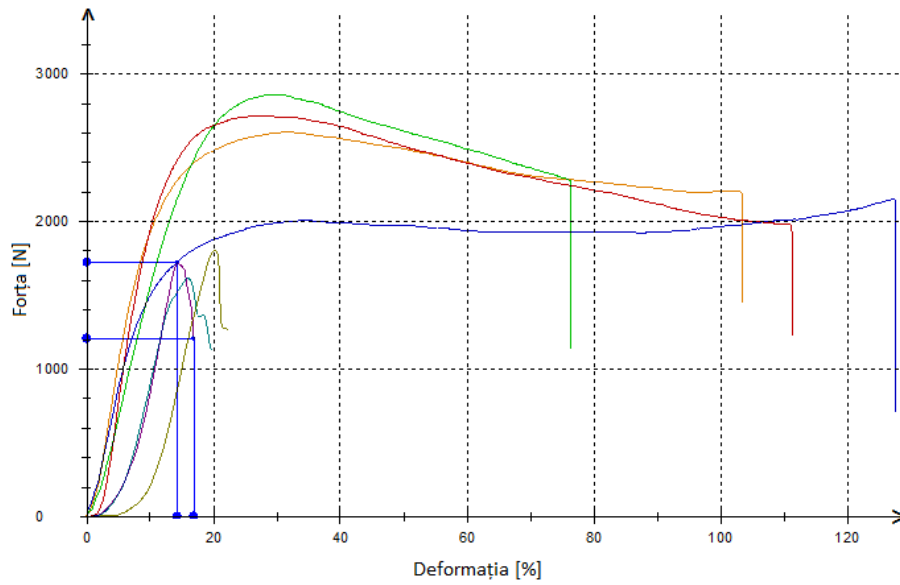
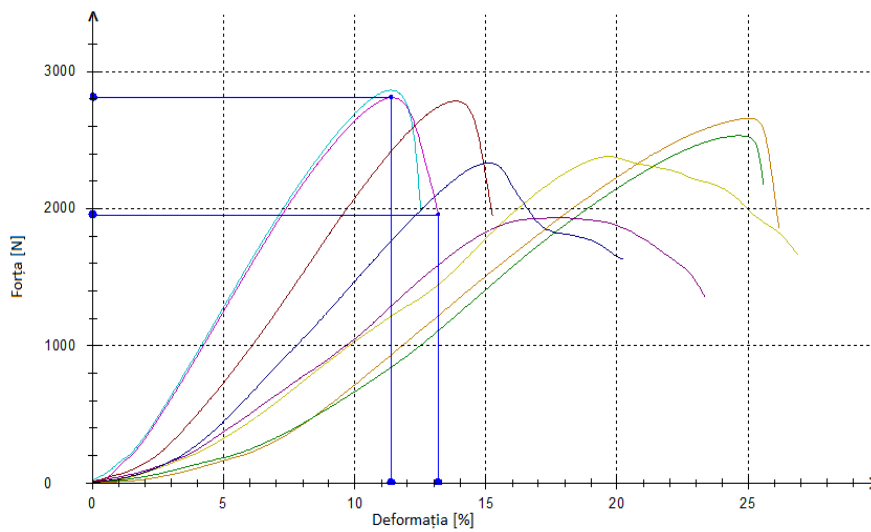


Fig.4.26 Parametrii măsurați în timpul încercării de compresie și modul de vizualizare pe monitorul echipamentului

a. Familia F1 de materiale compozite (P13-P16)**Fig.4.27 Dependența forță –deformație pentru P13****Fig.4.28 Dependența forță –deformație pentru P14**

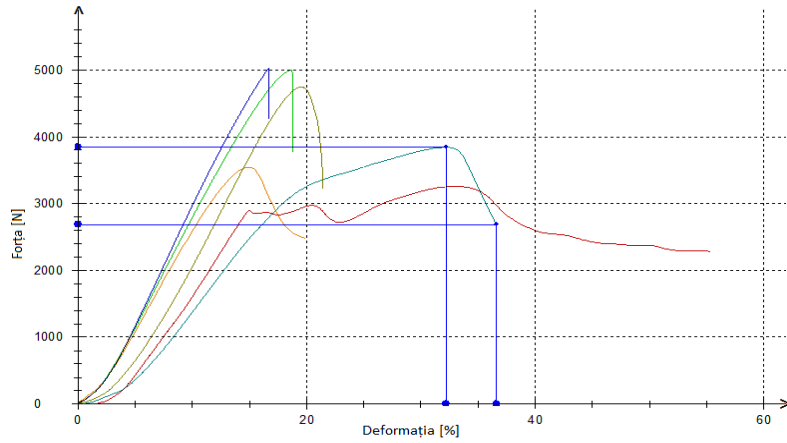
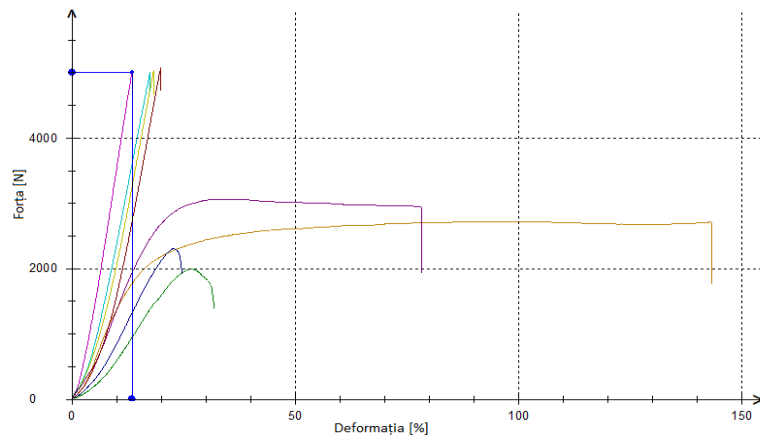


Fig.4.29 Dependenta forță -deformație pentru P15



**Fig.4.30 Dependenta forță -deformație pentru P16
b. Familia F2 de materiale compozite (P17-P20)**

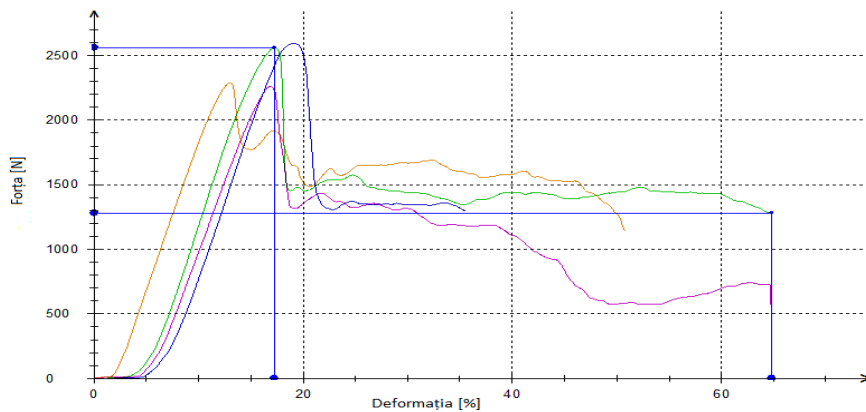


Fig.4.31 Dependenta forță -deformație pentru P17

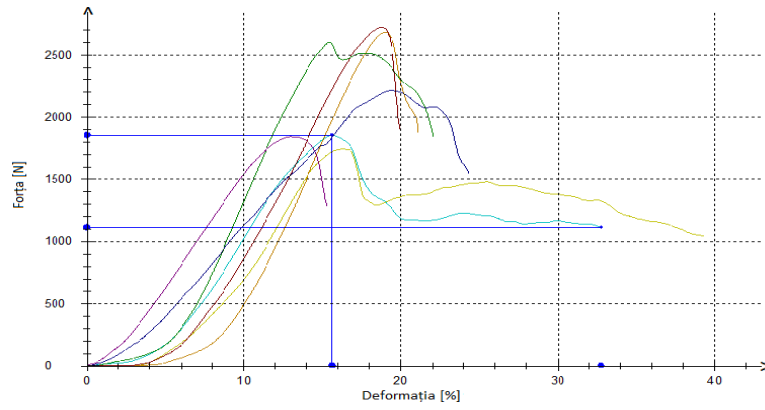


Fig.4.32 Dependența forță –deformație pentru P18

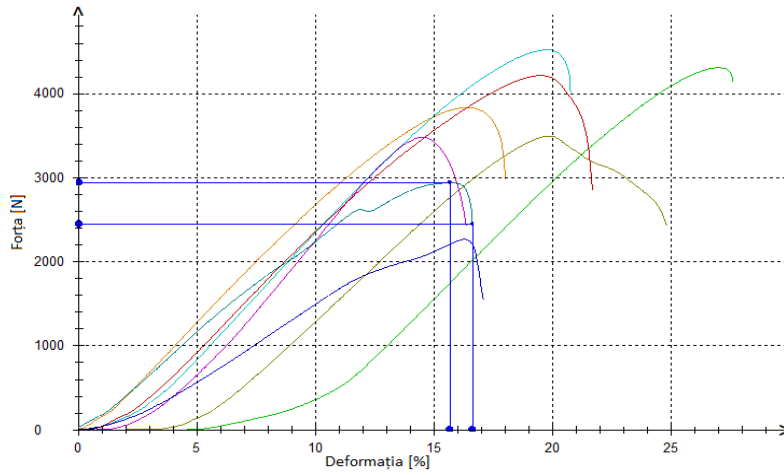


Fig.4.33 Dependența forță –deformație pentru P19

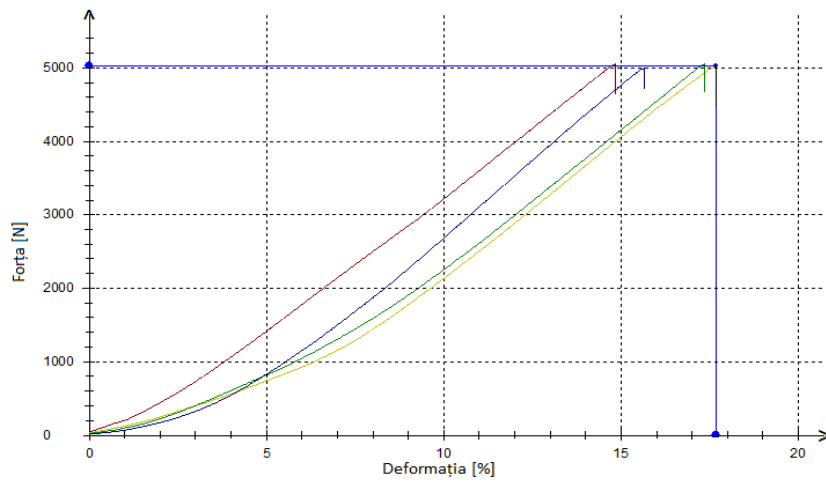


Fig.4.34 Dependența forță –deformație pentru P20

Softul echipamentului de încercare a permis vizualizarea valorilor maxime ale forțelor de rupere și ale scurtării epruvetelor supuse încercării mecanice la compresiune, rezultatele fiind prezentate în Anexa 3, tabelul A3.1 pentru familia F1 de materiale compozite, respectiv tabelul A3.2 pentru familia F2 de materiale compozite. De asemenea, acesta a permis efectuarea unui calcul statistic a valorilor medii pentru: forța maximă de rupere, tensiunea normală maximă, scurtarea epruvetei, deformația maximă la forța maximă de încărcare și modulul de elasticitate longitudinal, rezultatele fiind prezentate în tabelul 4.6 pentru materialele compozite din familia F1, respectiv în tabelul 4.7 pentru materialele compozite aparținând familiei F2.

Tabelul 4.6. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice de compresiune pentru materialele compozite cu din familia F1 (TiO₂) și concentrații diferite de fibră de nucă de cocos

Denumirea caracteristicii	Familia de compozite F1 (TiO ₂)			
	P13 (0 % cocos)	P14 (5 % cocos)	P15 (10 % cocos)	P16 (15 % cocos)
Forța la rupere [N]	2165	2604	4038	3795
Tensiunea normală maximă [N/mm ²]	4,85	6,1403	8,2310	8,9399
Scurtarea epruvetei [mm]	0,22	0,16	0,13	0,16
Deformația maximă la forța maximă de încărcare [%]	1,38	1,06	0,74	1,05
Modulul de elasticitate longitudinal E [N/mm ²]	351,44	579,273	1112,29	946,657

Analizând rezultatele din tabelul 4.6 se observă că valoarea maximă a forței de rupere s-a înregistrat pentru P15 (4038 N), iar valoarea minimă pentru proba P13 (2165 N). Tensiunea la rupere are valoarea cea mai mare pentru proba P16 (8,9399 N/mm²). Valoare apropiată acesteia, de 8,2310 N/mm² s-a obținut pentru proba P15. Cea mai mare valoare a modulului de elasticitate longitudinal s-a obținut pentru P15 și este de 1112,29 N/mm². Valoare apropiată de aceasta s-a obținut pentru proba P19 (955,55 N/mm²) care aparține familiei F2 de materiale compozite. Se observă că, atât proba P15, cât și proba P19 sunt realizate cu un procent de 10 % fibră de nucă de cocos. Valoare cea mai mică a modulului de elasticitate longitudinal s-a obținut pentru probele P13 și P17, acestea fiind probe care nu au în rețetă fibră de nucă de cocos. Aceasta se explică prin faptul că fibrele de nucă de cocos oferă o anumită elasticitate materialului compozit care datorită porilor din structură poate prelua forța de presare [91].

Tabelul 4.7. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice de compresiune pentru materialele compozite cu Al₂O₃ și concentrații diferite de fibră de nucă de cocos

Denumirea caracteristicii	Familia de compozite F2 (Al ₂ O ₃)			
	P17 (0 % cocos)	P18 (5 % cocos)	P19 (10 % cocos)	P20 (15 % cocos)
Forța la rupere N	2208	2273	3649	3885
Tensiunea la rupere [N/mm ²]	4,69	5,0588	8,686	8,943
Scurtarea epruvetei	0,16	0,16	0,13	0,15
Deformația maximă la forța maximă de încărcare [%]	0,98	1,02	0,909	1,0
Modulul de elasticitate longitudinal E [N/mm ²]	415,204	495,96	955,55	894,3

Pentru materialele compozite din cele două familii rezultatele încercărilor la compresiune depind esențial de dimensiunile epruvetei.

Analizând graficele forță-deformație prezentate în fig.4.27-4.34, s-a constatat că există diferențe între valorile rezultate pentru fiecare epruvetă în parte. De exemplu, în fig.4.27 se observă că pentru patru probe ruperea s-a produs sub 2000N, pentru proba a cincea ruperea s-a produs la 2000 N, iar pentru ultimele trei probe ruperea s-a produs aproape de 3000N. Situații similare se observă și în cazul altor eșantioane, prezentate în fig.4.30, 4.32 și 4.33. Aceste limite largi între care se produce ruperea epruvetelor din același eșantion realizate după aceeași rețetă, se explică prin diferențele existente între proprietățile mecanice ale probelor, în funcție de structură anatomică a fibrei de nucă de cocos care are proprietăți diferite de la o specie la alta, uneori chiar în cadrul aceleiași specii, datorate condițiilor de vegetație și microclimat [65], [66].

Rezultatele obținute la încercarea celor două familii de compozite concepute au o împrăștiere destul de largă, fapt ce impune un număr relativ mare de încercări pentru caracterizarea acestora.

Se observă că există o tendință de creștere a rezistenței la compresiune cu creșterea proporției de fibră de nucă de cocos. Pe de altă parte, utilizarea unor materiale metalice în compoziția plăcuțelor de frână duce la creșterea performanțelor în funcționare [92].

În ceea ce privește scurtarea, acestea sunt cuprinse între limitele 0,13-0,22 mm pentru materialele compozite din prima familie și între 0,13 și 0,16 pentru cea de a doua familie.

Analizând rezultatele obținute cu cercetările prezentate în alte lucrări [81],[82],[83],[84],[92] s-a observat că valorile obținute pentru forța de rupere prin compresiune, tensiunea la rupere și modulul de elasticitate longitudinal au valori mai mici. Analizând graficele din fig.5.19, 5.20 care reprezintă dependențele forță-deformație pentru eșantioanele corespunzătoare realizării probelor P15 și P16, se poate observa că pentru unele probe din eșantioanele respective ruperea nu s-a produs la valoarea maximă a forței disponibilă la echipamentului de încercare care este de 5000N. Deci, aceste probe prezintă rezerve de rezistență. Situații similare s-au întâlnit și în fig.5.23 și 5.24 care prezintă dependențele forță-deformație pentru eșantioanele corespunzătoare rețetelor P19 și P20. Deci și **aceste probe prezintă rezerve de rezistență, ceea ce impune repetarea încercărilor pe un echipament de încercare care să permită o forță de rupere mai mare.**

4.2.3. Analiza tehnologică a rezultatelor

În vederea optimizării proporției componentilor din rețetele anterioare s-au produs 15 probe la care proporția de aluminiu a variat între 6 - 25(%), iar proporția de nucă de cocos între 0 - 19 (%). Pentru familia F1 de materiale compozite s-au introdus 13 g de oxid de titan, iar pentru familia F2 s-au introdus 13g de oxid de aluminiu. Compoziția chimică a celor 15 rețete pentru familia F1 de materiale compozite se prezintă în tabelul 4.8, iar pentru familia F2, în tabelul 4.9.

Rezistența la compresiune a probelor a fost determinată în laboratorul de Rezistența Materialelor de la Facultatea de mecanică din Timișoara, utilizând instalația din fig.4.24. În vederea determinării rezistenței la compresiune pentru fiecare din cele 15 rețete aparținând fiecărei familii s-au realizat câte trei epruvete paralelepipedice care au fost supuse încercării mecanice la compresiune.

Tabelul 4.8. Compoziția chimică a celor 15 rețete pentru familia F1 de materiale compozite

Componența rețetei	Rețete produse pentru familia F1 de materiale compozite														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Al	25	24	23	22	20	18	17	16	16	15	13	11	10	8	6
Grafit	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ZrO ₂	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SiC	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
TiO ₂	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rășină fenolică	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Hexametilte-tramină	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Fibră nucă de cocs	0	1	2	3	5	7	8	9	10	10	12	14	15	17	19
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Rezistența la compresiune [N/mm ²]	7,31	8,35	8,43	9,76	9,98	10,31	9,78	10,11	9,31	14,95	14,64	15,39	15,11	12,93	13,01

În Anexa 4 se prezintă graficele dependențelor forță-deformație înregistrate de softul echipamentului de încercare pentru fiecare epruvetă, realizată din fiecare rețetă de material compozit. Astfel pentru cele 15 rețete din familia F1, dependențele forță-deformație se prezintă în fig.A.4.1-A4.45, iar pentru materialele compozite din familia F2, dependențele aferente se prezintă în fig.A4.46-A4.90. Valorile rezistenței la compresiune sunt prezentate în tabelul 4.8 pentru familia F1 de materiale compozite și în tabelul 4.9 pentru familia F2. Aceste rezultate au fost prelucrate în programele de calcul Excel și Matlab, în vederea obținerii unor corelații între rezistența la compresiune și proporția de componente din rețetă, pe baza cărora se pot stabili rețetele optime de producere a materialelor compozite.

Tabelul 4.9. Compoziția chimică a celor 15 rețete pentru familia F2 de materiale compozite

Componența rețetei	Rețete produse pentru familia F2 de materiale compozite														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Al	25	24	23	22	20	18	17	16	16	15	13	11	10	8	6
Grafit	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ZrO ₂	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SiC	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Al ₂ O ₃	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rășină fenolică	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Hexamiltetramină	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Fibră nucă de cocs	0	1	2	3	5	7	8	9	10	10	12	14	15	17	19
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Rezistența la compresiune [N/mm ²]	6,41	6,91	7,11	7,31	8,91	7,31	8,57	9,11	12,11	11,97	12,98	13,41	10,27	11,47	13,24

La prelucrarea datelor experimentale în Excel s-a avut în vedere obținerea unor corelații exprimate prin funcții polinomiale de gradul 2 și 3.

La prelucrarea datelor experimentale în Matlab, a fost efectuat un calcul statistico- matematic în vederea analizei influenței elementelor componente ale rețetelor asupra rezistenței la compresiune [93]. Astfel, s-au stabilit **ecuații de corelație dublă între factorii tehnologici și rezistența la compresiune** a celor două familii de materiale compozite produse în această lucrare, rezultatele fiind prezentate atât sub formă analitică, cât și sub formă grafică.

În cadrul experimentărilor, prin analiza de regresie, s-a urmărit determinarea formei funcțiilor matematice care leagă variabilele dependente ale procesului tehnologic de variabilele independente, pe baza unor determinări experimentale. Corelațiile obținute în urma rulării programului de calcul sunt prezentate sub formă grafică prin suprafețe de regresie, care prezintă puncte de extrem sau puncte staționare, pe baza cărora se pot determina **limitele de variație a parametrilor independenți (factori de influență) asupra parametrului dependent, în cazul nostru rezistența la compresiune a materialelor compozite.**

În programul Excel s-au obținut corelații între rezistența la compresiune în funcție de conținutul de aluminiu pentru diferite adaosuri de fibră de nucă de cocos. Prin prelucrarea datelor s-au obținut corelații exprimate prin funcții polinomiale de gradul 2 și 3, acestea fiind prezentate atât sub formă grafică cât și analitică. Aceste corelații permit o bună estimare a caracteristicilor mecanice la conceperea rețetelor în funcție de compoziția chimică, precum și o corecție a acesteia, în vederea obținerii unor rezultate bune în exploatare.

În fig.4.35 variația rezistenței la compresiune a materialelor compozite din ambele familii de materiale compozite în funcție de conținutul de fibră de nucă de cocos, iar în fig.4.36 variația rezistenței la compresiune în funcție de conținutul de aluminiu.

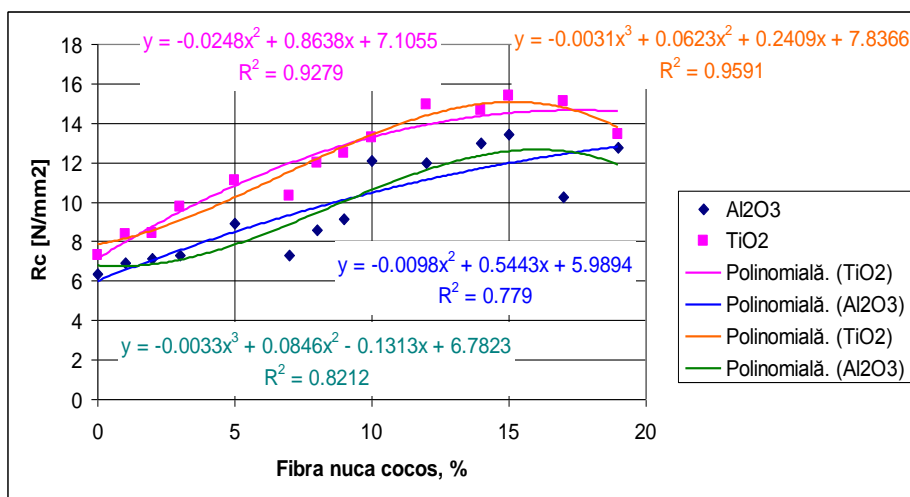


Fig. 4.35 Variația rezistenței la compresiune a materialelor compozite din familia F1 (TiO_2) în funcție de conținutul de fibră de nucă de cocos

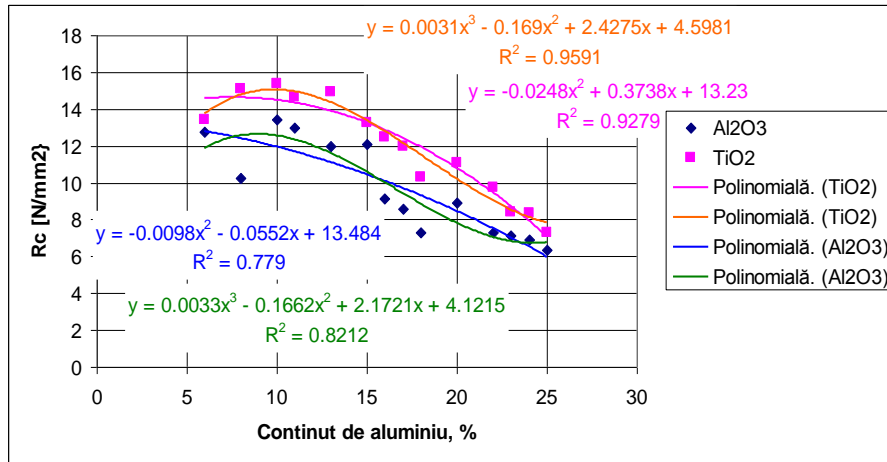


Fig. 4.36 Variația rezistenței la compresiune a materialelor compozite din familia F2 (Al_2O_3) în funcție de conținutul de aluminiu și fibră de nucă de cocos

Analizând fig.4.35 și 4.36 se observă că:

- **rezistența la compresiune crește odată cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos și scăderea cantității de aluminiu;**
- **valoarea maximă a rezistenței la compresiune se obține pentru un conținut de fibră de nucă de cocos cuprinsă între limitele 12 - 18% (în medie 15 %);**
- **rezistența la compresiune scade cu creșterea conținutului de aluminiu, valoarea maximă obținându-se pentru un procent de aluminiu cuprins între 6-14(%), în medie 10 %;**
- **rezistența la compresiune a probelor din familia F1 este mai mare decât a celor din familia F2.**

În vederea optimizării constituenților rețetelor s-a efectuat un calcul statistico-matematic, folosind programul de calcul Matlab, pentru analiza influenței elementelor componente ale rețetelor asupra rezistenței la compresiune [93], [94]. Pentru fiecare familie de compozite, s-au obținut ecuații de corelație între **rezistența la compresiune, care este parametrul dependent, conținutul de aluminiu și fibră de nucă de cocos, oxidul de titan și oxidul de aluminiu care au fost menținuți în ambele rețete la valoare constantă (13g) reprezintă parametrii independenți.**

În fig.4.37a,b,c se prezintă variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos pentru familia F1 (TiO_2) de materiale compozite.

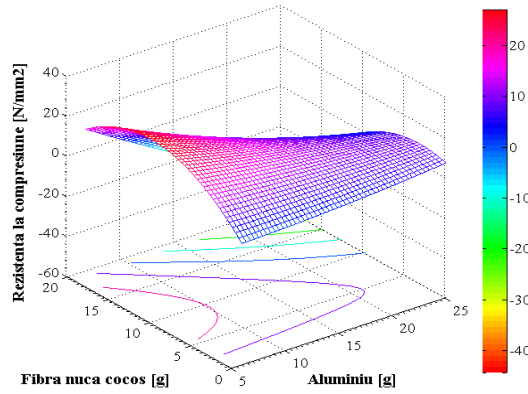
În fig.4.38a,b,c se prezintă variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos pentru familia F2 (Al_2O_3) de materiale compozite.

În cazul ambelor modelări forma ecuație de regresie este de forma [94]:

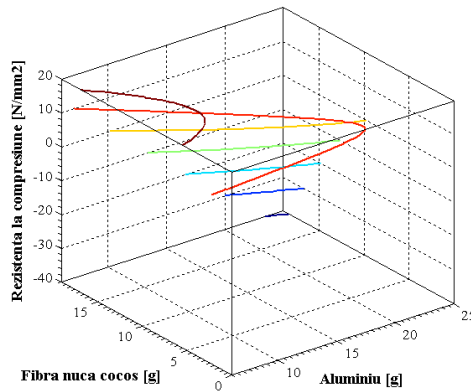
$$z = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 \quad (4.7)$$

În care: z-parametru dependent;
x,y – parametrii independenți;
 $a_{1,..,6}$ – coeficienți.

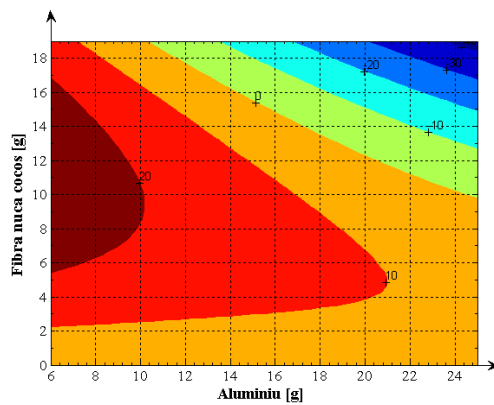
În fig.4.37 este reprezentată variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos.



a- reprezentarea spațială



b-curbe de nivel spațiale



c-curbe de nivel proiecție în plan orizontal

Fig.4.37 Variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos pentru familia F1 de materiale compozite

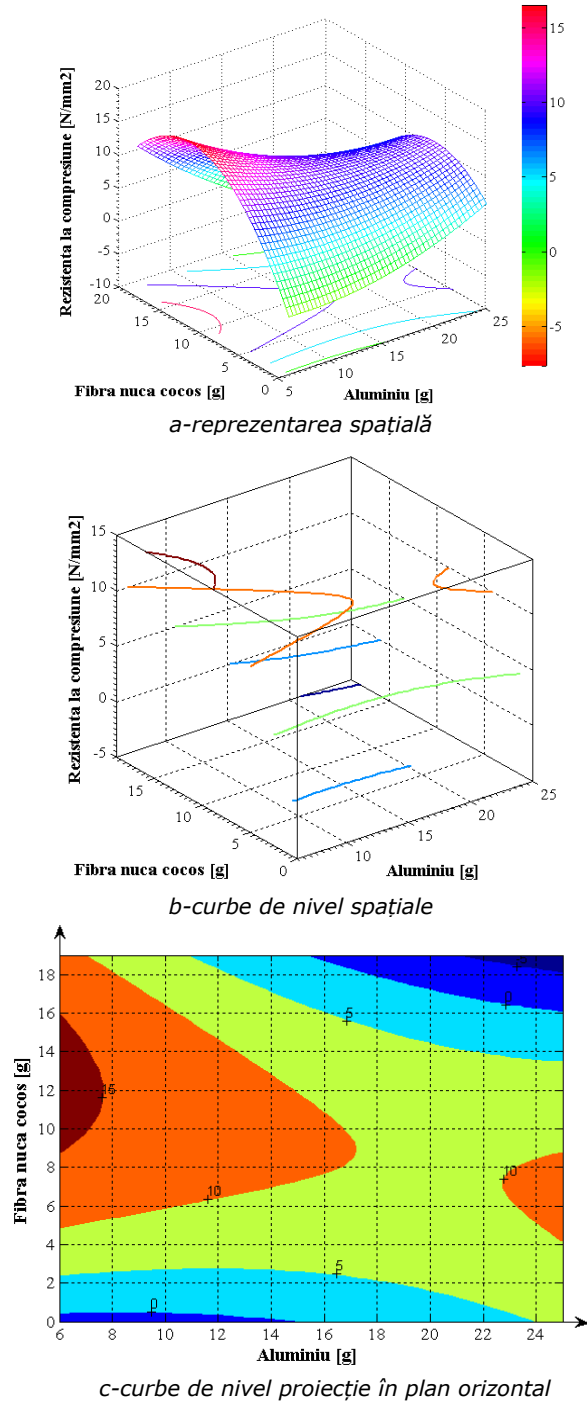


Fig.4.38 Variația rezistenței la compresie în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos pentru familia F2 de materiale compozite

Menținându-se cantitatea de oxid de titan constantă la 13 g, a fost trasată variația rezistenței la compresiune în funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos, iar ecuația suprafeței de regresie are forma:

$$z = 0,012 \cdot x^2 + (-0,214) \cdot x^2 + (-0,179) \cdot x \cdot y + (-0,014) \cdot x + 5,848 \cdot y \quad (4.8)$$

În care: z = rezistența la compresiune;
x = cantitatea de aluminiu din rețetă;
y = cantitatea de fibră de nucă de cocos.

Pentru această ecuație coeficientul de corelație este $R^2 = 0,83$.

Ținându-se cont de influența aluminiului și a fibrei de nucă de cocos asupra rezistenței la compresiune, se poate preciza că:

- **valoarea maximă a rezistenței la compresiune s-a înregistrat pentru o cantitate de aproximativ 11g fibră de nucă de cocos, la o cantitate de aproximativ 7g aluminiu introdus în rețetă, ceea ce corespunde compozitului P15;**
- **odată cu creșterea cantității de aluminiu, până la valori de aproximativ 20g, are loc o creștere a rezistenței la compresiune, pentru o cantitate de aproximativ 5g fibră de nucă de cocos;**
- **pe măsură ce cantitatea de fibră de nucă de cocos crește (11-15g) are loc o scădere a rezistenței la compresiune, situație similară și pentru cantități mai mici de 5g de fibră**

În fig.4.38 este reprezentată variația rezistenței la compresiune funcție de cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos, pentru familia F2 de compozite, pentru care cantitatea de oxid de aluminiu este menținută constantă la 13g, iar ecuația suprafeței de regresie are forma:

$$z = 0,024 \cdot x^2 + (-0,116) \cdot x^2 + (-0,072) \cdot x \cdot y + (-0,358) \cdot x + 3,313 \cdot y + 0 \quad (4.9)$$

În care: z = rezistența la compresiune;
x = cantitatea de aluminiu din rețetă;
y = cantitatea de fibră de nucă de cocos.

Pentru această ecuație coeficientul de corelație este $R^2 = 0,84$.

Ținându-se cont de influența elementelor aluminiu și fibră de nucă de cocos asupra rezistenței la compresiune, se poate preciza că:

- **valoarea maximă a rezistenței la compresiune se obține pentru o cantitate de aproximativ 11 g fibră de nucă de cocos și 7g de aluminiu;**
- **odată cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos peste 12g are loc o scădere a rezistenței la compresiune, situația fiind similară pentru cantități cuprinse între 9 și 11 g fibră;**
- **o valoare de aproximativ 10N/mm², pentru rezistența la compresiune se obține pentru o cantitate de 17g aluminiu și 8 g fibră de nucă de cocos;**
- **odată cu creșterea cantității de aluminiu (la 23g) și pentru o cantitate de 5g fibră organică, se obține o rezistență la compresiune de 10N/mm².**

În urma analizei suprafețelor prezentate se poate concluziona că **din punct de vedere al rezistenței la compresiune rețetele optime pentru materialele compozite produse** sunt:

- *din familia F1, rețetele după care au fost realizate probele P14 și P15 (cu un conținut de 5%, respectiv 10% fibră organică) ;*

- din familia F2, rețetele P17 și P18 care au tot 5 % , respectiv 10% fibră de nucă de cocos;
- analizând comparativ cele două familii de compozite, se observă că la același conținut de fibră de nucă de cocos și aproximativ aceeași cantitate de aluminiu, valoarea rezistenței la compresiune este mai mare pentru prima familie F1 de materiale compozite.

Domeniul tehnologic pentru conținutul de aluminiu este cuprinsă între 10g și 20g, iar pentru fibra de nucă de cocos între 6-14g și 12-18g, acesta asigurând cele mai bune caracteristici mecanice la compresiune pentru materialele compozite.

4.2.4. Studiul morfologiei suprafețelor

Studiul morfologiei suprafețelor probelor P13-P20 s-a realizat prin microscopie electronică de tip SEM și analiză EDX (Energy Dispersive X-Ray Microanalysis) calitativă și cantitativă.

Microscopul electronic utilizat este de tip Inspec S și are următoarele caracteristici tehnice:

- sursă: filament wolfram;
- tensiune 200 V la 30 kV;
- curent fascicul $\geq 2 \mu A$;
- domeniu de focalizare 3-99 mm;
- mărire 6x la $\geq 1\ 000\ 000$ x, câmp de focalizare 18 mm la cea mai mare distanță de lucru.

Analiza EDX s-a realizat cu un spectrometru cu rezoluția de 135 eV. Utilizarea microscopiei electronice SEM a permis analiza morfologiei suprafețelor probelor, compoziția materialelor după procesul de sinterizare, precum și evaluarea distribuției la suprafață a particulelor din materialele analizate. Analizele EDX calitative și cantitative au avut rolul de a evidenția similaritatea elementelor materialelor compozite produse cu componentele inițiale care au fost introduse în rețetă.

Pentru efectuarea analizelor SEM, din probele disc s-au realizat epruvete paralelipipedice care au fost supuse procesului de șlefuire cu discuri de diferite granulații, au fost dezinfectate cu etanol și apoi uscate. Acestea au fost introduse în microscopul electronic cuplat cu un spectrometru cu dispersie după energii de tip EDX.

Imaginile SEM pentru materialele compozite din familia F1 realizate cu cantități variabile de fibră de nucă de cocos se prezintă în fig.4.39 la o mărire de 1000 x.

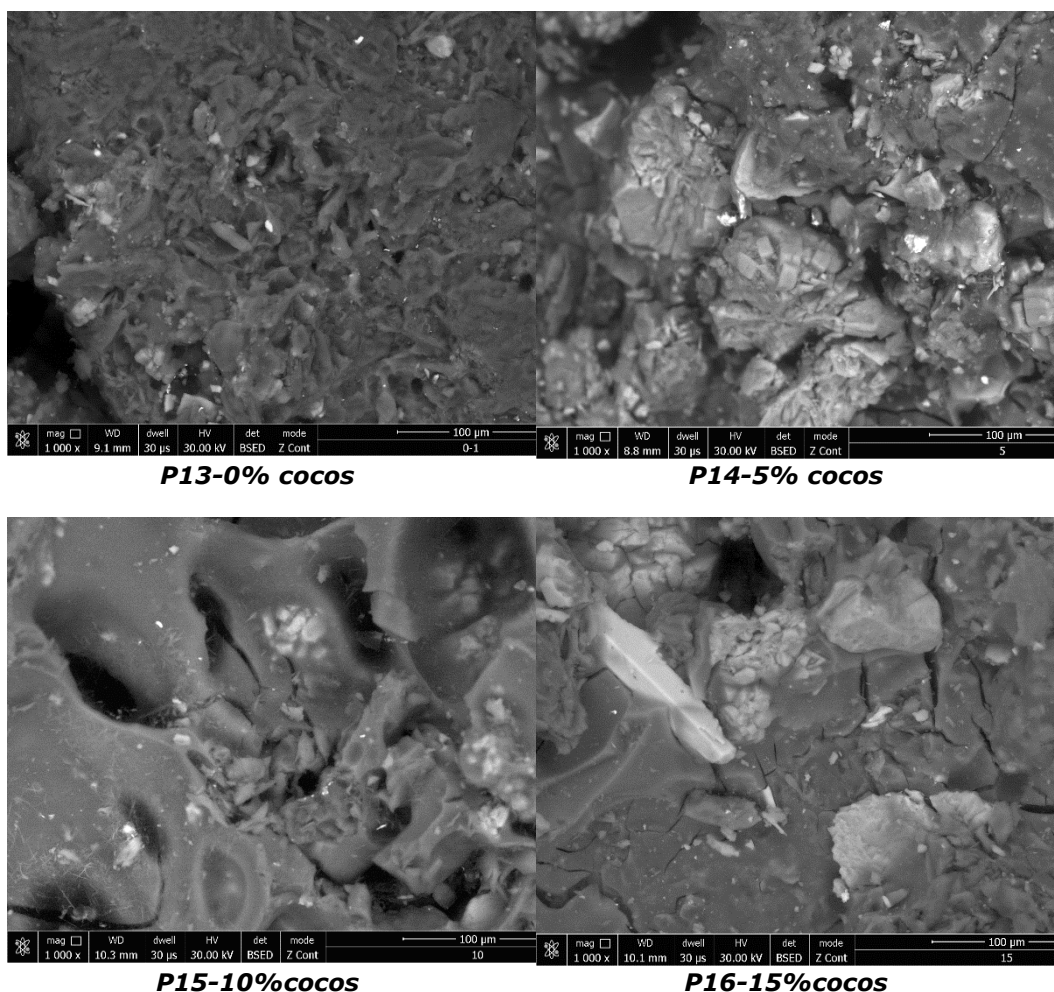


Fig.4.39 Imagini SEM pentru Familia 1 de materiale compozite (TiO_2)

Din fig.5.29 s-a observat că distribuția particulelor în materialul de fricțiune este diferită de la o probă la alta. Dispersia liantului s-a realizat cel mai bine în proba P15, comparativ cu celelalte trei probe. Particulele de material au dimensiuni diferite și sunt neuniform dispersate în matrice. Probele nu prezintă omogenitatea constituenților.

Rezultatele analizei EDX sunt prezentate în tabelul 4.10 și arată o combinație relativ bună a componentelor. Carbonul este prezent în toate probele, procentul minim fiind de 40,89 % în proba P13, iar cel maxim de 48,36 % în proba P15. Cea mai mare cantitate de aluminiu este prezentă în proba P15 care nu are fibră de nucă de cocos, aceasta se explică prin faptul că proporția constituenților nu s-a modificat după sinterizare. Aluminiul și titanul sunt elemente prezente în toate probele. Se observă existența unui procent mare de oxizi, care variază între limitele 20,04% (P14) și 23,18 % (P16), care poate duce la reducerea legăturilor interatomice dintre elemente, aceasta având ca efect reducerea rezistenței mecanice a materialelor compozite. Metalele dominante în probele examinate sunt: carbonul, aluminiul și titanul.

Utilizarea ingredientelor metalice în rețete duce la îmbunătățirea proprietăților materialelor de fricțiune organică [91],[95],[96],[97]. Fibra de nucă de cocos s-a distribuit bine în matricea compozitului și acționează ca material de umplură [79].

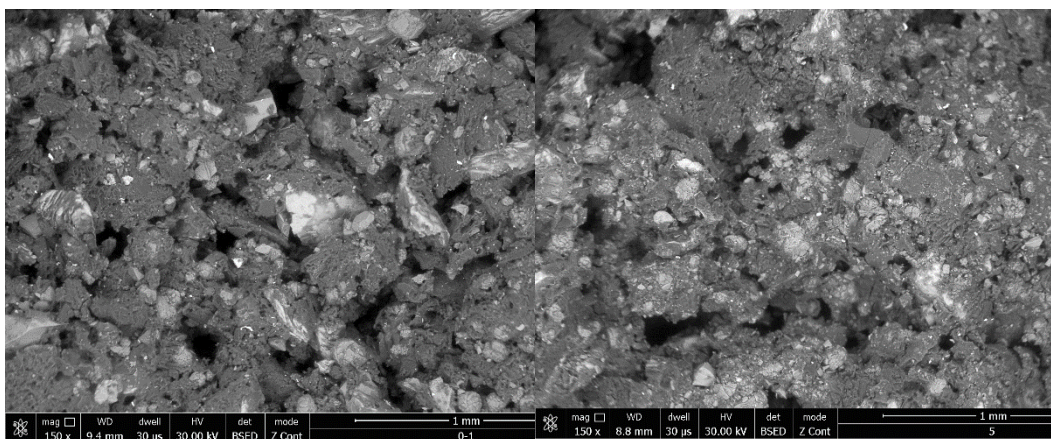
Tabelul 4.10. Compoziția materialelor din familia F1 (TiO_2) după sinterizare

Element	P13	P14	P15	P16
	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)
C	40,89	45,68	48,36	44,30
Ti	10,21	10,78	10,53	10,79
O	22,76	20,04	21,29	23,18
Na	0,92	0,84	0,62	0,51
Al	19,84	16,38	13,88	13,25
Si	1,73	1,64	1,17	1,09
Fe	2,90	4,16	3,88	5,18
Zr	0,75	0,78	0,74	0,70
Total	100,00	100,00	100,00	100,0

În fig.4.40 se prezintă imaginile SEM pentru materialele compozite aparținând familiei F2 de materiale compozite produse.

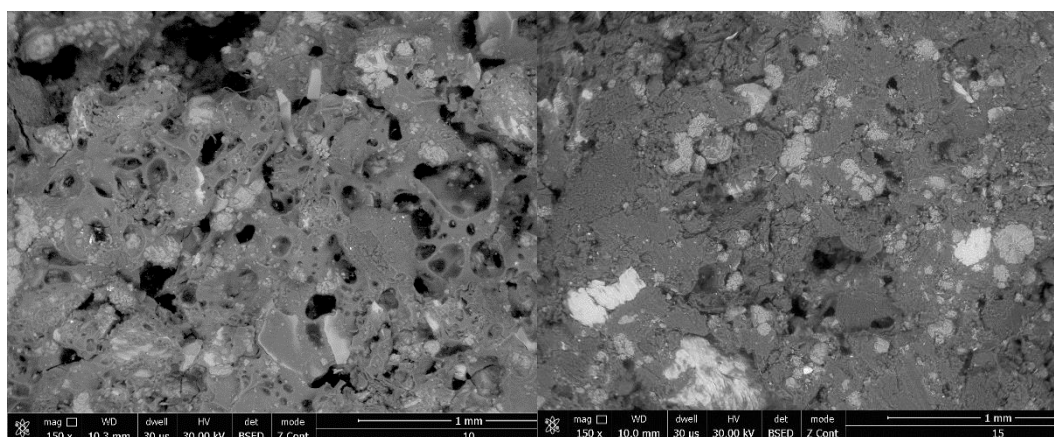
În probele P18 și P19 se poate observa o distribuție relativ omogenă a constituenților în matricea de aluminiu. De asemenea, în probele P17, P18 și P19 se observă o cantitate mare de rășină (zonele negre) neuniform distribuită în structură. În toate probele se observă prezența aluminiului (zonele albe), neomogen distribuit.

Din analiza EDX prezentată în tabelul 4.11, se observă că cea mai mare cantitate de aluminiu s-a menținut și după sinterizare în proba P17, care nu are în rețetă fibră de nucă de cocos, iar cea mai mică proporție în P20 care conține cantitatea maximă de fibră de nucă de cocos. Acest lucru arată faptul că nu au apărut modificări în proporția constituenților după sinterizare. Din tabelul 4.11 se observă că în toate cele patru rețete există un procent ridicat de oxizi, care a slăbit interatomic lipirea constituenților, ceea ce a dus la scăderea rezistenței mecanice la compresiune.



P17-0% cocos

P18-5% cocos



P19-10% cocos **P20-15% cocos**
Fig.4.40 Imagini SEM pentru familia F2 de materiale compozite (Al_2O_3)

Tabelul 4.11. Compoziția materialelor din familia F2 după sinterizare

Element	P17	P18	P19	P20
	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)
C	42,15	47,69	51,79	46,21
Al	28,13	25,52	23,32	22,11
O	22,31	20,76	18,04	16,25
Fe	3,18	2,10	3,60	8,26
Na	0,53	0,64	0,40	0,47
Si	3,29	4,91	5,23	6,18
Zr	0,41	0,38	0,26	0,52
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

Se observă că în probele P17-P20, după sinterizare se regăsesc toate elementele introduse inițial în rețete. Analiza EDX evidențiază similaritatea elementelor materialelor compozite produse cu componentele inițiale introduse în rețetă.

În mod ideal, materialele de fricțiune ar trebui să aibă cele mai bune caracteristici fizico-mecanice pentru a obține cea mai bună eficiență la frânare [97], [98], [99], [100].

Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor de fricțiune nu pot fi apreciate doar pe baza tipului și a procentului componentilor utilizați în rețete, nici cunoscând dimensiunile și forma particulelor de material [73]. Aceste proprietăți depind de parametri tehnologici ai procesului tehnologic de sinterizare, cum ar fi: durata de amestecare, presiunea și durata de compactare, timpul de răcire până la întărirea ulterioară, temperatura din cuptor, timpul de menținere în cuptor, etc. [73].

În acest context cel mai adecvat material compozit destinat realizării plăcuțelor de frână nu poate fi selectat doar pe baza aprecierii caracteristicilor fizico-mecanice. Acestea pot fi utilizate pentru a controla calitatea formulării rețetelor dezvoltate în procesul de fabricație [73]. În schimb, proprietățile fizice și mecanice constante ale aceleiași rețete indică faptul că procesul de obținere a materialului compozit este sub control [73].

Principalele concluzii obținute ca urmare a studiului efectuat sunt:

- densitatea materialelor compozite produse după rețete proprii, depinde de procentul componentei metalice din rețetă, ceea ce confirmă datele din literatura de specialitate;
- ambele familii de materiale compozite produse au o anumită porozitate ceea ce poate duce la scăderea zgomotului în timpul frânării și la minimizarea efectului apei și a uleiului în funcționare [68], [79];
- pentru familia F1 de materiale compozite produse, valoarea cea mai mare a durității este de 66 HRB pentru proba P15, iar pentru familia F2 cea mai mare valoare este de 61HRB obținută pentru proba P19, ambele probe fiind realizate cu 10 % fibtă organică;
- din prelucrarea datelor în programul de calcul EXCEL s-au obținut corelații între rezistența la compresiune în funcție de conținutul de aluminiu pentru diferite adaosuri de fibră de nucă de cocos, exprimate analitic și grafic prin ecuații polinomiale de gradul 2, semnificative din punct de vedere a valorilor coeficienților de corelație și a sensului tehnologic;
- aceleași date care au fost prelucrate în programul de calcul EXCEL, au fost prelucrate și în MATLAB obținându-se ecuații de corelație între elementele componente ale rețetelor și rezistența la compresiune, exprimate sub formă analitică și grafică, care au permis cunoașterea dependenței din punct de vedere cantitativ a influenței compoziției chimice asupra caracteristicilor calitative, permițând stabilirea unui domeniu tehnologic pentru compoziția chimică a materialelor compozite în vederea îmbunătățirii acestor caracteristici;
- rezistența la compresiune este un parametru calitativ pentru materialele compozite produse care este influențat de conținutul materialelor din rețete, procentul de fibră de nucă de cocos adăugat, dar mai ales de parametrii tehnologici ai procesului de sinterizare;
- rezistența la compresiune crește odată cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos și scăderea cantității de aluminiu;
- rezistența la compresiune pentru cele două familii de materiale compozite are valori scăzute datorită tehnologiei de sinterizare care a dus la obținerea în structura materialelor a unei cantități mari de oxizi care au slăbit legăturile interatomice dintre elementele rețetelor;
- unele probe supuse încercării mecanice de compresiune prezintă rezerve de rezistență, ceea ce impune repetarea încercărilor pe un echipament de încercare care să permită o forță de compresiune mai mare;
- rezultatele obținute la încercarea celor două familii de materiale compozite produse după rețete proprii au o împrăștiere destul de largă, care se datorează atât fibrei organice care provine din coaja de nucă de cocos cu proprietăți diferite de la o specie la alta, cât și tehnologiei de sinterizare;
- diagramele obținute în programul Matlab, mai precis proiecția în planul orizontal a curbelor de nivel, permit alegerea valorilor pentru parametrii independenți (cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos), astfel încât să se obțină pentru parametrul dependent (rezistența la compresiune) valoarea dorită;
- domeniul tehnologic pentru conținutul de aluminiu este cuprins între 12-18 % (în medie 15%), iar pentru fibra de nucă de cocos între 6-14 % (în medie 10%), acesta asigurând cele mai bune caracteristici mecanice la compresiune pentru materialele compozite
- analiza SEM a arătat că particulele de material a probelor analizate au dimensiuni diferite, dar sunt uniform dispersate în matricea de aluminiu;

- procentul ridicat de oxizi prezent în materialele compozite produse, pus în evidență cu analiza EDX, a dus la scăderea rezistenței la compresiune din cauza desfacerii legăturilor interatomice dintre elemente;
- analiza EDX evidențiază faptul că nu au apărut modificări în proporția constituenților după sinterizare, ceea ce arată similaritatea elementelor din materialele compozite rezultate cu componentele inițiale care au fost introduse în rețetă;
- materialele compozite organice sunt materiale eterogene, alcătuite din mai multe componente cu proprietăți diferite, prin urmare, alegerea constituenților și a procentului acestora în rețete va afecta în mod semnificativ comportamentul în funcționare, din acest motiv pentru obținerea unor proprietăți fizico-mecanice superioare s-au efectuat modificări în rețetele materialelor compozite produse și s-a efectuat o îmbunătățire a tehnologiei de sinterizare, care vor fi prezentate în următorul subcapitol.

4.3. Studii de optimizare a obținerii probelor compozite

Încercările de îmbunătățire a performanței de frânare sunt realizate mai ușor prin modificări ale rețetelor și a tehnologiei de sinterizare a materialelor de fricțiune decât prin modificări ale sistemelor de frânare [81],[101]. Creșterea performanței de frânare se poate obține prin îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice și tribologice ale materialului de fricțiune utilizat la fabricarea plăcuțelor de frână [68]. Performanța materialului de fricțiune este influențată de următorii factori: compoziția rețetelor, structura materialului, distribuția și mărimea particulelor de material, parametrii procesului tehnologic de sinterizare, precum și mediul înconjurător [81], [83].

În literatura de specialitate au fost raportate diferite lucrări privind utilizarea fibrelor organice în producerea materialelor compozite, cum ar fi: coaja de ananas, sisal, coajă de nucă de cocos, iută, palmier, bumbac, coji de orez, bambus, lemn [79], [81], [83], [103], [104]. Materialele compozite cu fibră de nucă de cocos au o gamă largă de aplicabilitate în țări ca Malayasia, Indonezia, Tailanda, Sri Lanka ele fiind folosite ca materiale de construcție, corzi marine, dispozitive de pescuit, mobilier, aparate de uz casnic [81]. Având în vedere domeniul larg de aplicabilitate și datorită faptului că sunt resurse biodegradabile și abundente în aceste zone geografice, studiul acestora a constituit obiectul mai multor cercetări care au arătat faptul că această fibră organică are proprietăți care aprobă aplicarea ei în fabricarea materialelor de fricțiune, datorită rezistenței ridicate, a greutateii reduse și a proprietăților superioare pe care le conferă produselor obținute [79], [81]. Având în vedere faptul că în țara noastră nuca de cocos este un fruct exotic, acest fapt reprezintă un inconvenient pentru materialele de fricțiune produse în această lucrare. Pentru validarea rezultatelor din cadrul acestui capitol s-au ales câteva lucrări din literatura de specialitate în care s-au produs, testat și caracterizat materiale compozite având ca material de umplură fibra de nucă de cocos [71], [81], [82], [83], [84], [101], [103], [104].

Având în vedere concluziile prezentate în subcapitolul 4.2, formulate pe baza determinărilor experimentale efectuate asupra materialelor compozite produse cu compoziția chimică prezentată în tabelul 4.4, se impune modificarea rețetelor și a tehnologiei de obținere, aceștia fiind principalii factori care duc la îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice ale acestora. Astfel, în vederea stabilirii unui domeniu tehnologic pentru compoziția chimică a rețetelor care să ducă la

îmbunătățirea acestor caracteristici s-a realizat o prelucrare statistico-matematică a datelor, în Excel și Matlab, obținându-se ecuații de corelație între elementele componente ale rețetelor și rezistența la compresiune. Aceste ecuații au permis cunoașterea dependenței din punct de vedere cantitativ a compoziției chimice a rețetelor asupra caracteristicilor calitative. Având în vedere faptul că, în urma calculelor efectuate domeniul tehnologic pentru conținutul de aluminiu este cuprins între 12-18 %, iar pentru fibra de nucă de cocos între 6-14 %, acesta asigurând cele mai bune caracteristici mecanice la compresiune pentru materialele compozite, s-a trecut la modificarea rețetelor în conformitate cu aceste concluzii.

În cadrul acestui subcapitol s-au produs materiale compozite după patru rețete având compoziția chimică optimizată, câte două pentru fiecare familie F1, respectiv F2. În producerea materialelor organice după rețetele optimizate, s-a menținut compoziția de bază a rețetelor din tabelul 4.4, făcându-se modificări doar în ceea ce privește procentul constituenților. Astfel, s-a urmărit respectarea domeniului tehnologic pentru concentrația de aluminiu și cea de fibră de nucă de cocos. Acest lucru a presupus eliminarea din ambele familii de materiale compozite a rețetelor realizate cu 25 % aluminiu și 0% fibră de nucă de cocos, respectiv a celor cu 10 % aluminiu și 15 % fibră de nucă de cocos. Alte modificări care s-au realizat comparativ cu rețetele prezentate în tabelul 4.4 sunt:

- s-a mărit cantitatea de SiC₂ de la 10g la 11 g;
- s-a mărit cantitatea de grafit de la 4g la 5g;
- s-a micșorat cantitatea de TiO₂ (pentru rețetele din familia F1), respectiv cantitatea Al₂O₃ (pentru rețetele din familia F2) de la 13g la 11g.

Decizia cu privire la mărirea cantității de carbură de siliciu s-a luat ca urmare a faptului că se dorește o creștere a rezistenței mecanice, acest component acționând în acest sens. Grafitul are rol în lubrifiere, dar contribuie și la creșterea rezistenței mecanice și implicit a rezistenței la uzură, acesta fiind unul dintre motivele pentru care s-a mărit cantitatea acestui component din cele patru rețete. Pentru a nu depăși procentul de 100% în componența rețetei, s-a considerat oportună micșorarea cu 2 g a TiO₂ (rețetele C1 și C2 din familia F1), respectiv a Al₂O₃ (rețetele C3 și C4 din familia F2), componenți cu rol de abrazivi. Rețetele optimizate după care se vor produce materialele compozite organice sunt prezentate în tabelul 4.12, pentru familia F1 de materiale compozite și în tabelul 4.13, pentru familia F2.

Tabelul 4.12. Compoziția chimică optimizată a materialelor compozite aparținând familiei F1

Probe	Aluminiu [%]	Grafit [%]	Oxid de zirconiu [%]	Carbură de siliciu [%]	Oxid de titan [%]	Rășină fenolică [%]	Hexametyl tetramină [%]	Fibră nucă de cocos [%]
C1	20	5	2	11	11	40	6	5
C2	15	5	2	11	11	40	6	10

Tabel 4.13. Compoziția chimică optimizată a materialelor compozite aparținând familiei F2

Probe	Aluminiu [%]	Grafit [%]	Oxid de zirconiu [%]	Carbură de siliciu [%]	Oxid de aluminiu [%]	Rășină fenolică [%]	Hexametyl tetramină [%]	Fibră nucă de cocos [%]
C3	20	5	2	11	11	40	6	5
C4	15	5	2	11	11	40	6	10

Analizând concluziile obținute în paragraful 4.1.4 referitor la tehnologia de obținere a materialelor compozite s-a observat că factorii care influențează obținerea unor probe corespunzătoare ca formă, structura, și cu proprietăți fizico-mecanice superioare sunt: ordinea de amestecare a constituenților, viteza de amestecare, timpul de amestecare, parametrii regimului de încălzire-menținere-răcire și forța de presare. Pentru îmbunătățirea tehnologiei de obținere a materialelor compozite după rețetele optimizate, pe lângă propriile concluzii obținute ca urmare a experimentărilor efectuate, s-a consultat și literatura de specialitate, în special acele lucrări în care s-au studiat materiale compozite organice cu destinație similară celei din această lucrare [79], [81], [83], [101], [103]. În urma studiului și a analizelor efectuate s-a recurs la stabilirea unei tehnologii de obținere pentru cele patru rețete prezentate în tabelele 4.12 și 4.13. Se precizează că operațiile specifice noii tehnologii de sinterizare sunt identice cu cele prezentate în capitolul 4 al lucrării, acestea fiind sintetizate în diagrama din fig.5.41 [81].

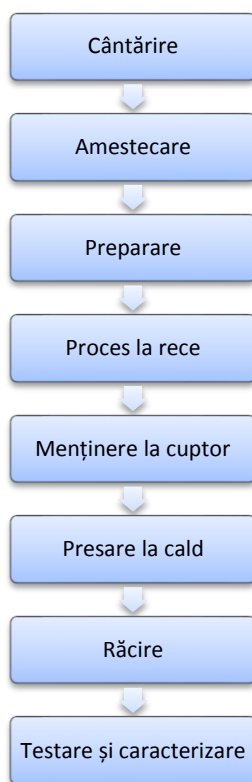


Fig.4.41. Diagrama de obținere a materialelor de fricțiune

Modificările aduse tehnologiei de sinterizare constau în:

- ordinea de amestecare a constituenților;
- viteza și timpul de amestecare, acestea făcându-se diferențiat în funcție de tipul constituenților;
- parametrii tehnologiei de sinterizare.

Elementele componente ale rețetelor au fost amestecate cu un amestecător mecanic cu turația maximă de 3000 rot/min, respectându-se o anumită ordine de introducere a elementelor în amestec, după cum urmează:

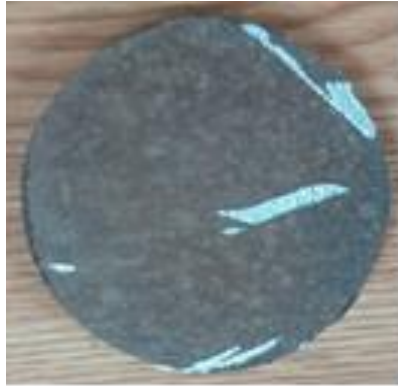
- prima dată s-a amestecat aluminiul și carbura de siliciu timp de 10 min, la o turație de 2500 rot/min;
- separat s-a amestecat, timp de 5 min, oxidul de zirconiu și oxid de titan (pentru rețetele C1 și C2), respectiv oxid de zirconiu și oxid de aluminiu (pentru rețetele C3 și C4);
- cele două amestecuri au fost combinate și s-a continuat amestecarea timp de 4 min cu o turație de 1500 rot/min;
- la final s-a adăugat grafitul și fibra de nucă de cocos și s-a mai amestecat cu aceeași turație încă 10 min;
- separat s-au amestecat rășina fenolică și hexametyltetramina, după care amestecul solid s-a introdus peste acestea, toată compoziția amestecându-se 10 min cu o turație de 1000 rot/min, în vederea obținerii omogenității compoziției;
- la finalul procesului de amestecare, compoziția a avut aspectul unei paste vâscoase și s-a introdus în matriță în vederea sinterizării. Baza matriței și pistonul acesteia au fost protejate cu folie de aluminiu. Înainte de introducerea compoziției în matriță, pe baza acesteia s-a presărat un strat subțire de grafit pentru extragerea cu ușurință a probei din matriță. Se menționează că s-a utilizat matrița prezentată în fig.4.15;
- după introducerea amestecului în matriță, s-au strâns șuruburile acesteia și s-a efectuat o presare la rece, la o presiune de 20 MPa, timp de 5 min;
- s-a introdus ansamblul matriță-probă în cuptorul încălzit la temperatura de 200°C, unde proba a fost menținută timp de o oră;
- după acest interval de timp s-a efectuat o presare la cald cu o presiune de 50 MPa, după care proba a fost introdusă în cuptor la temperatura de 180°C, unde s-a menținut 4 ore [79], [81], [83]. Se menționează că presarea s-a realizat intermitent, luându-se pauze la intervale egale de timp în vederea eliminării gazelor din probă;
- răcirea s-a realizat în două etape: în prima etapă răcirea s-a realizat în cuptor la temperatura de 100°C, timp de 8 h, pentru ca rășina să se transforme din termoplast în termorigid, iar în a doua etapă, răcirea s-a realizat în aer la temperatura ambiantă, timp de 48 ore.

Parametrii tehnologiei de sinterizare au fost stabiliși ca urmare a mai multor încercări experimentale care au permis efectuarea unor analize critice și îmbunătățirea succesivă a acesteia.

În ceea ce privește modificările aduse parametrilor tehnologiei de sinterizare, acestea au fost:

- creșterea forței de presare la rece la valoarea de 20 MPa, forță aplicată progresiv timp de 5 min;
- creșterea timpului de menținere a probelor în cuptorul cald, la temperatura de 200°C, timp de o oră;
- creșterea forței de presare la cald la valoarea de 50 MPa după care s-a micșorat temperatura cuptorului la 180°C, unde proba s-a menținut timp de 4 ore;
- efectuarea răcirii în două etape, în cuptor la temperatura de 100°C, timp de 8 h și în aer la temperatura ambiantă, timp de 48 ore.

În fig.4.42 se prezintă probele obținute după cele patru rețete propuse, la finalul procesului de sinterizare.



C1 (5 % fibră de nucă de cocos)



C2 (10 % fibră de nucă de cocos)

Familia F1 (TiO₂)



C3(5 % fibră de nucă de cocos)



C4 (10 % fibră de nucă de cocos)

Familia F2 (Al₂O₃)

Fig.4.42 Probele obținute după rețetele optimizate

Analizând probele obținute după cele patru rețete optimizate din punct de vedere al compactității, integrității, elasticității și a aspectului la extragerea din matrice s-au obținut următoarele concluzii:

- toate probele și-a păstrat integritatea la extragerea din matrice;
- omogenizarea și solidificarea constituenților arată că ordinea efectuării operațiilor în obținerea materialului compozit este bună;
- toate probele au o suprafețe netedă, formă geometrică complet circulară, duritate și consistență corespunzătoare;
- regimul de încălzire-menținere-răcire este corespunzător, presarea aplicată, atât la cald, cât și la rece realizează o compactare eficientă a materialului;

- toate probele se consideră reușite și pot fi folosite pentru prelevarea epruvetelor necesare caracterizării materialelor compozite produse după rețetele optimizate.

Cele patru probe obținute după rețetele optimizate au fost analizate din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice. Pentru efectuarea experimentărilor s-au prelevat probe din fiecare material compozit produs, în concordanță cu standardele în vigoare.

Principiile pentru determinarea densității, a porozității și a durtății materialelor compozite produse după rețetele optimizate și având tehnologia de sinterizare îmbunătățită au fost descrise în subcapitolul 4.1.1, rezultatele obținute fiind prezentate în tabelul 4.14.

Tabelul 4.14. Valorile densității, porozității și a durtății probelor obținute după rețetele optimizate

Caracteristica	Familia F1 (TiO ₂)		Familia F2 (Al ₂ O ₃)	
	C1 (5 % cocos)	C2 (10 % cocos)	C3 (5 % cocos)	C14 (10 % cocos)
Densitate [g/cm ³]	1,54	1,37	1,46	1,29
Porozitatea în apă [%]	0,75	0,55	0,88	0,62
Porozitatea în ulei [%]	0,29	0,14	0,32	0,17
Duritate HBS	55	59	57	54

Analizând rezultatele prezentate în tabelul 4.14 se observă că valorile densităților pentru cele două familii de compozite sunt relativ scăzute comparativ cu densitățile metalelor, [64], [65], [79], [90]. În graficul din fig.4.43 se prezintă analiza comparativă a densității celor patru probe. Se observă că în ambele familii de materiale compozite produse după rețetele optimizate, densitățile probelor au scăzut cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos, deoarece pe măsură ce a crescut cantitatea de material de umplură, a scăzut cantitatea de metal din rețetă. Concluzii similare au fost obținute și pentru rețetele inițiale, analizate în tabelul 4.5 și fig.4.21, dar și în literatura de specialitate [79].

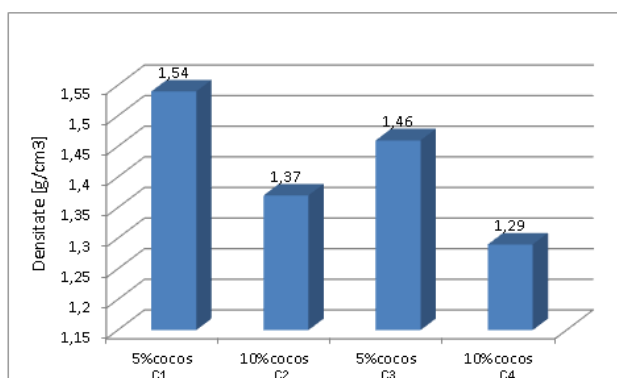


Fig.4.43 Analiza comparativă a densității probelor

În literatura de specialitate [79] s-au mai produs materiale de fricțiune în care ca material de umplură s-a utilizat fibra de nucă de cocos. Aceste materiale sunt destinate realizării plăcuțelor de frână și sunt similare rețetelor corespunzătoare familiei F2 de materiale compozite (rețetele din care s-au realizat probele C3 și C4) din această lucrare, diferența fiind concentrația constituenților din rețete și parametrii tehnologiei de sinterizare. Astfel, densitățile probelor C3 și C4 au fost comparate cu cele din această lucrare. Astfel, pentru probele cu 5 % fibră de nucă de cocos, valoarea densității este de $2,099 \text{ g/cm}^3$, iar pentru materialele compozite realizate cu 10% fibră de nucă de cocos, densitatea este $1,974 \text{ g/cm}^3$. Valorile mai mici pentru densitatea probele produse după rețete proprii indică o calitate mai bună a materialelor compozite obținute. În ceea ce privește probele C1 și C2, acestea au densități mai mari decât C3, respectiv C4, aceasta datorită faptului că au în compoziție titan, acesta având o densitate mai mare decât a aluminiului. Concluzii similare s-au obținut și în cazul probelor realizate după rețetele inițiale (fig.5.8). Pe de altă parte, se observă că valorile densităților obținute după rețete optimizate sunt mai mici decât cele obținute după rețetele inițiale. În fig.4.44 se prezintă rezultatele comparative a porozității în ulei și apă, obținute pentru probele C1-C4. Rezultatele testelor au fost comparate cu cele prezentate în literatura de specialitate [83].

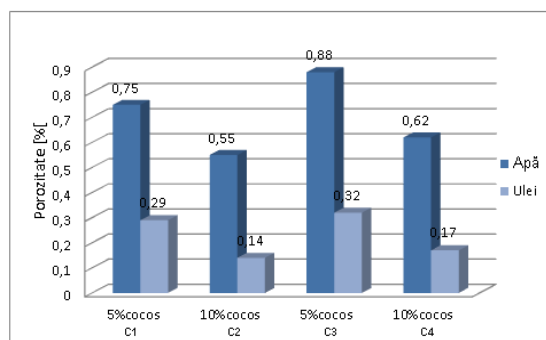


Fig.4.44 Analiza comparativă a porozității în apă și ulei

Pentru efectuarea testului de porozitate în ulei s-a utilizat ulei de motor clasa SAE60. Analizând rezultate obținute pentru porozitatea în ulei comparativ cu cele obținute inițial se observă o scădere considerabilă a acestora. De asemenea se observă că, atât capacitatea de absorbție a apei, cât și capacitatea de absorbție a uleiului, scad cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos. Capacitatea redusă de absorbție a apei și a uleiului poate fi atribuită creșterii legăturii dintre liant și umplură, datorate omogenizării corespunzătoare a constituenților [83], [103], [104]. Rezultatele obținute sunt comparabile cu cele din literatura de specialitate [79], [82], [83], [103], [104]. În fig.4.45 se prezintă rezultatele obținute la determinarea durității prin metoda Brinell [87] pentru probele analizate.

Conținutul variabil de fibre nucă de cocos și de aluminiu determină valori diferite ale durității probelor. Astfel, se observă că, cele mai mari valori ale durității au fost obținute pentru C2 și C4, ambele fiind realizate cu 10 % fibră de nucă de cocs. Valorile obținute pentru duritate sunt favorabile comparativ cu a altor materiale din cercetări similare, [79], [82], [82], [103], [104].

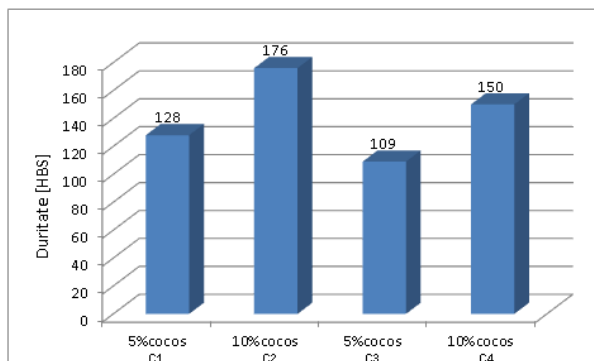


Fig.4.45 Analiza comparativă a durității probelor

Datorită valorilor mai mari obținute pentru durițăților probelor C1-C4, decât în cazul probelor P13-P20, se preconizează ca forța maximă de rupere a probelor la încercarea mecanică de compresiune să fie mai mare de 5KN. Din acest motiv, determinarea rezistenței la compresiune a probelor s-a efectuat pe o mașină universală de încercări mecanice din cadrul Laboratorului de Rezistența materialelor de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara. Echipamentul de încercare are trei domenii de încercare: domeniul I: 0 – 5000 N; domeniul II: 5000 – 12500 N; domeniul III: 12500 – 25000 N.

Încercarea la compresiune s-a efectuat pe un eșantion de 15 epruvete paralelipipedice, dimensiunile acestora fiind prezentate în tabelul 4.15.

Tabelul 4.15. Dimensiunile probelor paralelipipedice supuse încercării la compresiune

Nr. crt.	Familia F1 (TiO ₂)						Familia F2 (Al ₂ O ₃)					
	C1 (5 % nucă de cocos)			C2 (10 % nucă de cocos)			C3 (5 % nucă de cocos)			C14 (10 % nucă de cocos)		
	L [mm]	L [mm]	h [mm]	L [mm]	L [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]
1.	29,35	28,79	15,12	28,96	26,95	13,53	28,91	28,30	12,68	29,78	28,61	13,45
2.	29,94	29,77	15,23	29,28	25,12	13,62	28,06	28,04	12,32	29,81	29,71	13,72
3.	29,79	28,12	15,32	29,24	28,24	18,72	28,09	27,96	12,20	29,45	28,42	13,74
4.	29,34	29,20	15,03	28,33	28,08	17,34	29,02	28,57	11,88	29,22	27,88	13,76
5.	26,44	24,48	14,54	27,79	26,70	14,18	30,00	29,66	12,86	29,44	28,71	13,37
6.	29,79	28,93	15,31	29,85	29,17	18,14	29,65	29,43	11,93	29,80	29,48	13,68
7.	26,75	24,23	14,38	30,17	29,65	17,33	29,06	28,83	13,23	31,09	30,98	13,32
8.	28,27	27,57	15,65	27,94	27,87	13,82	29,96	28,11	12,98	31,12	28,33	13,35
9.	28,99	28,53	15,47	29,35	27,89	14,78	28,38	28,79	12,89	30,23	29,39	12,98
10.	29,89	29,84	14,98	29,56	28,78	14,89	29,56	27,87	12,56	30,76	29,54	13,67
11.	29,78	29,69	15,78	29,78	28,98	14,78	29,34	28,36	11,98	29,89	29,56	12,87
12.	28,94	28,78	15,34	29,69	28,59	15,89	29,55	28,66	11,87	29,78	29,52	12,77
13.	29,68	29,34	14,55	29,74	29,59	15,69	28,97	28,33	12,79	29,69	29,23	13,69
14.	29,82	29,59	15,67	29,69	29,23	14,87	29,87	28,98	13,56	30,34	29,82	13,54
15.	29,79	29,69	14,78	29,58	28,87	14,69	29,76	29,33	13,72	30,22	29,67	13,67
Valori medii	27,12	28,43	15,14	29,26	26,31	15,48	27,33	28,63	11,29	30,04	29,25	13,43

În fig.4.46 se prezintă o probă deformată la finalul încercării mecanice de compresiune.



Fig.4.46 Epruvetă din familia F2 de materiale compozite realizată cu 5% fibră de nucă de cocos deformată ca urmare a solicitării de compresiune

Rezultatele determinărilor experimentale sunt prezentate în tabelul 4.16.

Comparând valorile caracteristicilor obținute pentru probele C1-C4 (tabelul 4.16) cu cele obținute pentru probele P13-P20 (tabelul 4.6) se observă creșteri semnificative.

Din tabelul 4.16 se observă că valoarea rezistenței la compresiune a compozitului C1 este mai mică decât a compozitului C2, acesta putând rezista la forțe de solicitare mari. Ruperea compozitului C2 corespunde unei tensiuni de $35,1912 \text{ N/mm}^2$, forța de rupere fiind de 14577 N . Se observă că și în cazul familiei F2 de materiale compozite, eșantionul realizat cu 10 % fibră de nucă de cocos prezintă cea mai mare rezistență de rupere. Ruperea compozitului C4 corespunde unei tensiuni de $33,0730 \text{ N/mm}^2$, iar forța de rupere este de 12992 N .

Tabelul 4.16. Valorile medii ale caracteristicilor mecanice de compresiune

Denumirea caracteristicii	Familia F1 (TiO_2)		Familia F2 (Al_2O_3)	
	C1 (5 % cocos)	C2 (10 % cocos)	C3 (5 % cocos)	C4 (10 % cocos)
Forța la rupere [N]	11886	14577	8280	12992
Tensiunea normală maximă [N/mm^2]	-27,6141	-35,7912	-25,6162	-33,0730
Scurtarea epruvetei [mm]	0,016	0,018	0,015	0,017
Deformația maximă la forța maximă de încărcare ε_{med} [%]	0,105	0,116	0,132	0,126
Modulul de elasticitate longitudinal E [N/mm^2]	262999,142	32537,454	19406,212	26248,412

Valorile rezistenței la compresiune înregistrate la testarea materialelor compozite produse după rețetele optimizate au fost comparate între ele, graficul fiind prezentat fig.4.47.

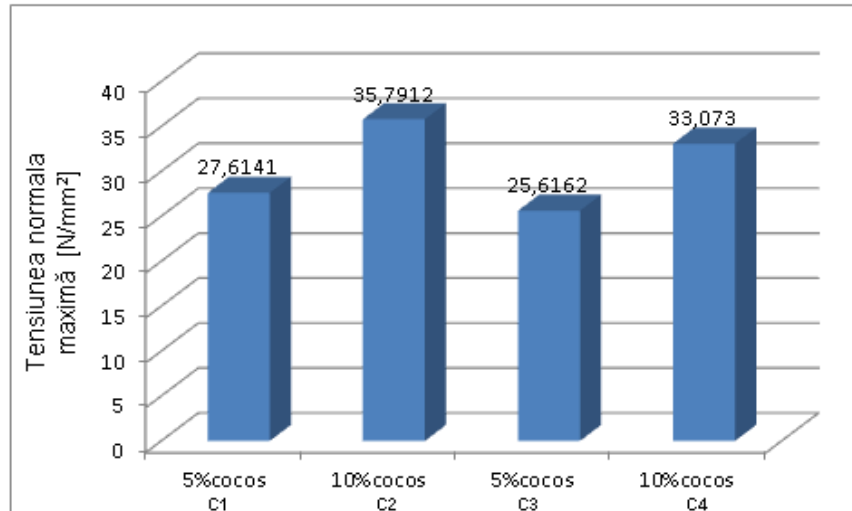
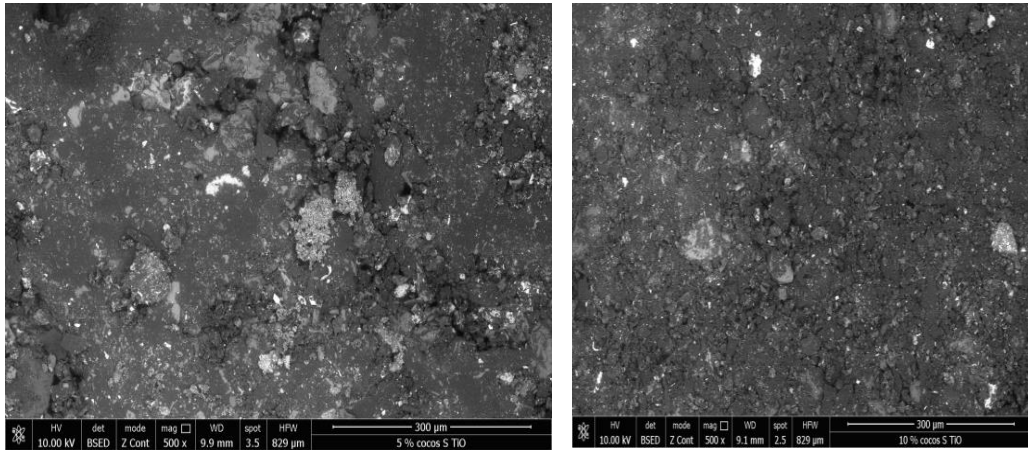


Fig.4.47 Analiza comparativă a rezistenței la compresiune

Eșantioanele care au cea mai mare cantitate de fibră de nucă de cocos (10 %) au și cea mai mare rezistență la compresiune, respectiv cea mai ridicată valoare a efortului de solicitare. Aceasta se explică prin faptul că, particulele de fibră de nucă de cocos s-au distribuit uniform peste matricea de aluminiu, realizându-se o interferență corespunzătoare dintre ele, iar în condiții de deformare s-a produs o deplasare corespunzătoare a fibrelor organice prin matrice [5], [81], [83]. Rezistența la compresiune și modulele de elasticitate longitudinale ale materialelor compozite cresc cu o creștere cantității de fibră de nucă de cocos. Concluzii similare fiind obținute și în [84].

Morfologia suprafeței materialelor compozite produse a fost analizată utilizând microscopia SEM și analiza EDX, efectuarea pe baza principiilor prezentate în paragraful 4.2.2. Fig.4.48 prezintă imaginile SEM pentru probele C1-4, iar tabelul 4.17 prezintă rezultatele analizei EDX.

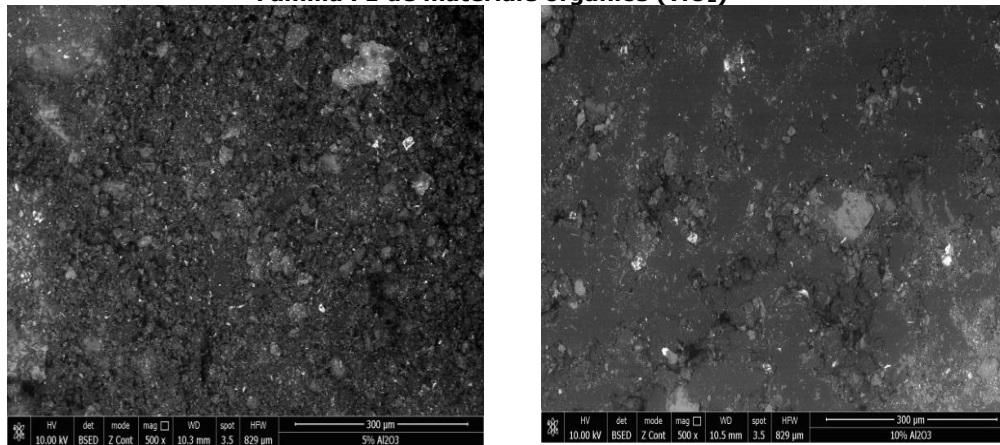
Particulele de material au dimensiuni diferite, dar sunt uniform dispersate în matrice. Carbonul este prezent în toate structurile fiind reprezentat de regiunea gri care domină ceilalți constituenți. Acesta s-a distribuit omogen printre constituenții rețelei. Aluminiul este prezent și el în toate probele în regiunile albe. *Se observă o bună dispersie a fibrei de nucă de cocos și a liantului prin matricea de aluminiu. Particulele de fibră de nucă de cocos s-au distribuit uniform prin liant realizându-se o interfață corespunzătoare între materialul de umplură și matricea de aluminiu,* [81].



C1- 5 % fibră de nucă de cocos

C2- 10 % fibră de nucă de cocos

Familia F1 de materiale organice (TiO_2)



C3- 5 % fibră de nucă de cocos

C4-10 % fibră de nucă de cocos

Familia F2 de materiale organice (Al_2O_3)

Fig.4.48 Imaginile SEM pentru materialele organice obținute în laborator

Tabelul 4.17. Rezultatele analizei EDX pentru materialele compozite organice produse după rețetele optimizate

Element	C1	C2	C3	C4
	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)
C	43,12	47,72	42,67	46,89
Al	21,33	18,32	34,36	30,52
Ti	22,32	20,35	-	-
O	9,12	9,46	18,69	17,82
Na	0,67	0,79	0,84	0,69
Si	1,89	1,58	1,71	1,67
Fe	1,10	1,23	1,14	1,56
Zr	0,45	0,55	0,59	0,85
Total	100,00	100,00	100,00	100,0

Elementul carbon este dominant în rezultatele analizei EDX, acesta având o contribuție importantă la creșterea durității probelor obținute. Materialele organice, cum este fibra de nucă de cocos prin procesul de sinterizare sunt oxidate termic și carbonizate, creând astfel faze de carbon, cu rol deosebit de important în creșterea durității [81]. În acest context, se observă că pentru familia F1 de materiale compozite, proba C2 are o cantitate mai mare de carbon decât C1, iar duritatea probei C2 este 176 HRS, mai mare decât a probei C1, care este 126 HRS. Aceeași situație se întâlnește și în cazul familiei F2 de compozite. Omogenitatea corespunzătoare a probelor, dimensiunile particulelor componente și distribuția acestora a determinat obținerea unor valori corespunzătoare pentru duritate [100] și o rezistență mărită la compresiune.

În probele examinate există o cantitate de fier, aluminiu și titan care este benefică pentru destinația materialelor compozite organice produse, deoarece utilizarea ingredientelor metalice în rețete duce la îmbunătățirea proprietăților acestor materialelor [73]. *Analiza EDX arată o combinație relativ bună a constituenților și faptul că nu s-au produs modificări în proporția acestora.*

4.4. Concluzii și contribuții originale

În cadrul acestui capitol au fost concepute, produse, optimizate și caracterizate mai multe rețete de materiale compozite destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii.

Concluziile obținute la finalul acestui capitol sunt :

- factorii care influențează obținerea unui amestec omogen sunt: viteza de amestecare, cantitatea de rășină fenolică, timpul de amestecare, ordinea de amestecare a componentelor;
- obținerea unei probe compacte este influențată de: regimul de încălzire-menținere-răcire; omogenitatea componentelor, forța de presare;
- în ceea ce privește ordinea de amestecare a componentelor, mai întâi se amestecă materialele cu greutate specifică mică, utilizând o viteză de amestecare mai mică, iar apoi cele cu greutate specifică mare, utilizând o viteză de amestecare mai mare;
- strângerea și presarea exagerată a probelor în matriță duce la acumularea gazelor în centrul probei, acestea solidificându-se cu un gol de contracție;

- densitatea materialelor compozite produse după rețetele inițiale, depinde de procentul componentei metalice din rețetă, ceea ce confirmă datele din literatura de specialitate;
- ambele familii de materiale compozite produse au o anumită porozitate ceea ce poate duce la scăderea zgomotului în timpul frânării și la minimizarea efectului apei și a uleiului în funcționare [68], [79];
- unele probe supuse încercării mecanice de compresiune produse după rețetele inițiale, prezintă rezerve de rezistență, ceea ce impune repetarea încercărilor pe un echipament care să permită o forță mai mare de compresiune;
- rezultatele obținute la încercarea celor două familii de materiale compozite produse după rețetele inițiale au o împrăștiere destul de largă, care se datorează atât fibrei organice care provine din coaja de nucă de cocos cu proprietăți diferite de la o specie la alta, cât și tehnologiei de sinterizare;
- rezistența la compresiune este un parametru calitativ pentru materialele compozite produse și este influențată de conținutul materialelor din rețete, procentul de fibră de nucă de cocos adăugat, dar mai ales de parametrii tehnologici ai procesului de sinterizare;
- rezistența la compresiune crește odată cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos și scăderea cantității de aluminiu;
- din prelucrarea datelor în programul de calcul Excel s-au obținut corelații între rezistența la compresiune în funcție de conținutul de aluminiu pentru diferite adaosuri de fibră de nucă de cocos, exprimate analitic și grafic prin ecuații polinomiale de gradul 2, semnificative din punct de vedere al valorilor coeficienților de corelație și a sensului tehnologic;
- aceleași date care au fost prelucrate în programul de calcul Excel, au fost prelucrate și în Matlab obținându-se ecuații de corelație între elementele componente ale rețetelor și rezistența la compresiune, exprimate sub formă analitică și grafică, care au permis cunoașterea dependenței din punct de vedere cantitativ a influenței compoziției chimice asupra caracteristicilor calitative, permițând stabilirea unui domeniu tehnologic pentru compoziția chimică a materialelor compozite în vederea îmbunătățirii acestor caracteristici;
- diagramele obținute în programul Matlab, mai precis proiecția în planul orizontal a curbilor de nivel, permit alegerea valorilor pentru parametrii independenți (cantitatea de aluminiu și fibră de nucă de cocos), astfel încât să se obțină pentru parametrul dependent (rezistența la compresiune) valoarea dorită;
- domeniul tehnologic pentru conținutul de aluminiu este cuprins între 12-18 % (în medie 15%), iar pentru fibra de nucă de cocos între 6-14 % (în medie 10%), acesta asigurând cele mai bune caracteristici mecanice la compresiune pentru materialele compozite;
- procentul ridicat de oxizi prezent în materialele compozite produse după rețetele inițiale, pus în evidență cu analiza EDX, a dus la scăderea rezistenței la compresiune din cauza desfacerii legăturilor interatomice dintre elemente;
- proprietățile fizico-mecanice ale materialelor compozite cu fibre naturale depind de mai mulți factori, cum ar fi: comportamentul, concentrația, distribuția și orientarea fibrelor naturale;
- analiza SEM efectuată pentru probele P13-P20 (produse după rețetele inițiale) a arătat că particulele de material a probelor analizate au dimensiuni diferite, dar sunt uniform dispersate în matricea de aluminiu;

- analiza EDX efectuată pentru probele P13-P20 evidențiază faptul că nu au apărut modificări în proporția constituenților după sinterizare, ceea ce arată similaritatea elementelor din materialele compozite rezultate cu componentele inițiale care au fost introduse în rețetă;
- materialele compozite organice sunt materiale eterogene, alcătuite din mai multe componente cu proprietăți diferite, prin urmare, alegerea constituenților și a procentului acestora în rețete va afecta în mod semnificativ comportamentul în funcționare, din acest motiv pentru obținerea unor proprietăți fizico-mecanice superioare s-au efectuat modificări în rețetele materialelor compozite produse și s-a efectuat o îmbunătățire a tehnologiei de sinterizare, care vor fi prezentate în următorul subcapitol.
- obținerea unor materiale compozite cu caracteristici superioare se poate realiza prin modificări ale concentrației componentelor din rețete, precum și prin modificarea parametrilor tehnologiei de sinterizare;
- densitățile materialelor compozite organice produse după rețete optimizate cresc cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos;
- scăderea nivelului de porozitate, atât în apă, cât și în ulei, ca urmare a creșterii legăturii dintre liant și materialul de umplutură a fost determinată de omogenizarea corespunzătoare a componentelor rețetei;
- duritatea, rezistența la compresiune și modulul de elasticitate longitudinal, cresc cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos;
- analiza morfologiei suprafețelor a arătat că nu s-au produs modificări în proporția componentelor după sinterizare și există o combinație relativ bună între aceștia;
- obținerea unor caracteristici fizico-mecanice superioare pentru probele obținute după rețetele optimizate se datorează: omogenizării corespunzătoare a componentelor rețetelor, dimensiunii particulelor de material, distribuției materialului de umplutură prin matrice, existența unei proporții optime dintre cantitatea de metal și ceilalți componente, regimului de încălzire-menținere-răcire și forței de presare;
- integritatea structurală a materialelor compozite produse asigură acestora caracteristici fizico-mecanice superioare;
- factorii care influențează obținerea unor caracteristici fizico-mecanice superioare pentru materialele compozite produse sunt tipul componentelor aleși în rețete, optimizarea proporției componentelor și parametrii tehnologiei de sinterizare.

Contribuții originale din acest capitol sunt:

- *proiectarea a două matrițe pentru realizarea probelor din materialele compozite concepute;*
- *îmbunătățirea soluției constructive a matriței pentru producerea probelor disc;*
- *analiza proprietăților individuale a componentelor rețetelor;*
- *stabilirea proporției componentelor din rețete;*
- *stabilirea parametrilor tehnologici ai procesului de sinterizare;*
- *obținerea probelor și efectuare de analize tehnologice privind rezultatul obținut din punct de vedere al compactității, integrității, elasticității și aspectului eșantionului;*
- *alegerea probelor considerate satisfăcătoare care vor fi testate din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice.*

- *determinarea caracteristicilor fizico-mecanice ale materialelor compozite produse după rețetele inițiale;*
- *producerea a 15 rețete diferite cu concentrații variabile de aluminiu (6-25g) și fibră de nucă de cocos (0-19g) și determinarea rezistenței la compresiune în vederea obținerii datelor necesare optimizării rețetelor prin calcul statistico-matematic;*
- *prelucrarea datelor în programul Excel și Matlab, în vederea stabilirii domeniului tehnologic pentru compoziția rețetelor;*
- *stabilirea domeniului tehnologic pentru concentrația de aluminiu și fibră de nucă de cocos care a dus la îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice ale materialelor compozite;*
- *formularea rețetelor optimizate;*
- *modificarea tehnologiei de sinterizare a materialelor compozite după rețetele optimizate;*
- *obținerea în laborator a materialelor compozite după rețete optimizate;*
- *determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și studiul morfologiei suprafețelor materialelor compozite produse după rețetele optimizate;*
- *analiza comparativă a caracteristicilor obținute experimental cu cele ale materialelor compozite obținute după rețetele inițiale, precum și cu rezultatele obținute de alți cercetători.*

CAPITOLUL 5

COMPORTAREA TRIBOLOGICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE DESTINATE REALIZĂRII PLĂCUȚELOR DE FRÂNĂ

Materialul de fricțiune este un material eterogen și este compus din mai multe elemente, fiecare dintre acestea contribuind la îmbunătățirea proprietății de fricțiune la temperaturi scăzute și înalte, creșterea rezistenței și a rigidității, prelungirea duratei de viață, reducerea porozității și a zgomotului. În mod ideal, materialul de fricțiune destinat realizării plăcuțelor de frână trebuie să aibă un coeficient de frecare constant în diferite condiții de funcționare, cum ar fi: sarcini aplicate, temperatură, viteze, mod de frânare în condiții uscate sau umede, astfel încât să se mențină caracteristicile de frânare ale vehiculului. De asemenea, pe lângă proprietățile anterior amintite, materialul de fricțiune trebuie să dețină și alte proprietăți, cum ar fi: rată scăzută de uzură, stabilitate termică ridicată, zgomot redus și să nu deterioreze discul de frână. Din punct de vedere practic este imposibil ca toate aceste proprietăți să fie îndeplinite. Prin urmare, unele cerințe trebuie să fie atenuate pentru a le îndeplini pe altele. În general, fiecare rețetă de material de fricțiune are propriile sale comportamente de frecare, unice și caracteristici de rezistență la uzură [73].

Cercetările din literatura de specialitate au arătat că nu există o corelație simplă între proprietățile de frecare și proprietățile fizice și mecanice ale unui material de frecare [73], [105], [106], [107]. Prin urmare, **fiecare rețetă de material compozit nou elaborată trebuie supusă unei serii de teste pentru a evalua proprietățile de frecare și uzură** [73]. În acest context, în cadrul acestui capitol se va studia comportarea la frecare și uzură a materialelor compozite produse după rețetele proprii optimizate, destinația acestor materiale fiind realizarea plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii.

Principalele obiective urmărite în acest capitol se referă la **studiul influenței regimului de lucru (forța de apăsare, viteza de alunecare, timpul de încercare, regimul de frecare) asupra caracteristicilor tribologice ale probelor testate**. În acest sens se va studia:

- evoluția unor parametri de uzare;
- evoluția temperaturii în zona de contact;
- evoluția coeficientului de frecare;

Cunoașterea evoluției coeficientului de frecare, a temperaturii în zona de contact precum și a caracteristicilor funcționale, oferă posibilitatea unor aprecieri pertinente cu privire la durabilitatea în exploatare a materialelor compozite destinat realizării plăcuțelor de frână.

5.1. METODOLOGIA DE CERCETARE

5.1.1. Obținerea și analiza tehnologică a probelor din fontă

În vederea efectuării acestui studiu s-au realizat epruvete sub formă de discuri și pini din fontă, destinate montării în instalațiile de uzare care permit studiul comportării la frecare și uzură a materialelor compozite produse. În acest sens s-a stabilit tehnologia de elaborare a două șarje de fontă din care se vor executa discurile și pinii necesari testării materialelor compozite. În elaborarea acestor șarje

s-a urmărit obținerea unei compoziții chimice cât mai apropiată de cea a discurilor de frână produse la ora actuală, conform standardelor în vigoare [38].

Pentru producerea epruvetelor din fontă, s-au elaborat două șarje de fontă într-un cuptor cu inducție, având capacitatea de 10kg, existent în laboratorul de Topituri Metalice din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, Universitatea Politehnica Timișoara, cu caracteristicile tehnice prezentate în fig.5.1 [66].

Caracteristici tehnice:

Volum creuzet 1,4 dm³;
 Capacitate 7 kg fontă/oțel;
 Diametru creuzet 100 mm;
 Înălțime creuzet 220 mm;
 Frecvența curentului 100 KHz;
 Puterea transformatorului 150 KVA;
 Tensiunea primar 500 V; Tensiunea în secundar 167 V;
 Tensiunea variabilă 100/83/50 V;
 Puterea la înaltă frecvență 50 kW;
 Durata topirii 40 min;
 Căptușeală bazică – magnezită.

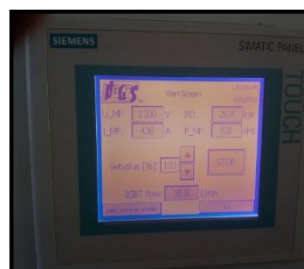


Fig.5.1 Cuptor cu inducție [24], [66]

Încărcătura metalică a fost alcătuită din bare din fontă, obținute prin turnare în cochilie, durata topirii unei încărcături fiind de 90 minute [66]. Având în vedere că s-a efectuat o simplă retopire s-a considerat că nu este necesară o corecție a compoziției chimice a băii metalice la terminarea topirii [24].

După terminarea topirii s-a menținut baia metalică în cuptor încă 5 minute, iar temperatura acesteia s-a măsurat cu un pirometru optic. După măsurarea temperaturii șarja s-a evacuat din cuptor într-o matriță și două forme cilindrice. Matrița permite realizarea pinilor din fontă, fig.5.2, iar formele cilindrice au fost realizate din grafit, o formă având diametrul de 85 mm, iar cea de a doua diametrul de 38 mm, fig.5.3a și b.

După răcire, fonta a fost evacuată din forme și s-au prelevat următoarele epruvete:

- din matriță s-au realizat mai mulți pini în vederea montării în instalațiile tribologice pentru studiul frecării și uzurii;
- din proba de diametru 38 mm s-au prelevat epruvetele pentru efectuarea analizei chimice, respectiv cele necesare efectuării analizei metalografice a fontei elaborate;
- din proba de diametru 85 mm s-au prelevat epruvetele pentru efectuarea testelor de duritate și a testelor tribologice.



Fig.5.2 Matriță pentru realizarea pinilor din fontă



a-formă cilindrică de diametrul de 38 mm



b- formă cilindrică de diametrul de 85 mm

Fig.5.3 Forme pentru turnarea șarjelor de fontă elaborate

Compozițiile chimice, duritățile și densitățile inițiale ale fontelor de la care s-a pornit în elaborarea celor două șarje se prezintă în tabelul 5.1

Tabelul 5.1. Compoziția chimică, duritatea și densitatea fontelor destinate în elaborarea șarjelor

Nr. șarjă	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Duritate HB	Densitate [g/cm ³]
S1	3,26	1,11	0,59	0,037	0,037	182	7,18
S2	3,12	1,32	0,6	1,07	0,195	180	7,11

În vederea elaborării primei șarje încărcătură cuptorului cu inducție cuprinde: 1769 g fontă, 20 g FeSi, 5 g FeS și 5 g FeP.

Pentru elaborarea celei de a doua șarje în cuptorul cu inducție s-au introdus: 1495 g fontă, 2, 25 g FeSi și 6,2 g FeMn.

Răcirea s-a efectuat în aer timp de 12 ore, după care probele au fost extrase din forme.

În continuare s-au prelevat eșantioane destinate efectuării analizelor chimice, testelor de duritate și cele destinate încercărilor tribologice de uzare. După prelevare, eșantioanele au fost polizate și șlefuite în Laboratorul de Prelucrări mecanice din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara, acestea fiind prezentate în fig.5.4 și fig.5.5.



Fig.5.4 Eșantion de pini după efectuarea prelucrărilor mecanice



Fig.5.5 Eșantion de probe cilindrice polizate și șlefuite

Probele disc rezultate ca urmare a prelucrărilor mecanice respectă condițiile tehnice prezentate în schița din fig.5.6, iar pinii condițiile tehnice din fig.5.7.

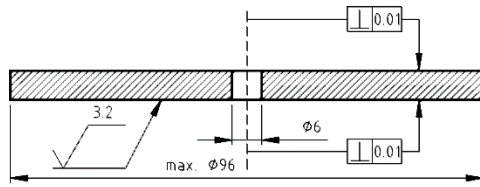


Fig.5.6 Dimensiunile probei disc realizată din fontă [24], [66]

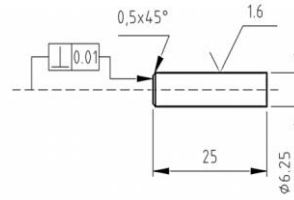


Fig.5.7 Dimensiunile pinilor din fontă [24], [66], [71]

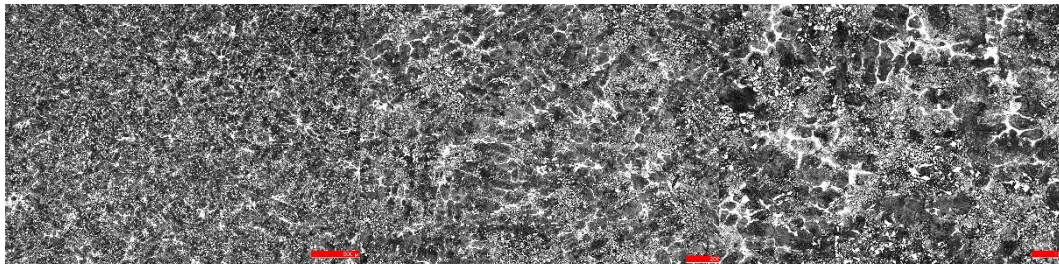
În continuare s-a efectuat analiza tehnologică a șarjelor de fontă elaborate în condiții de laborator.

a. Analiza șarjei S1

Compoziția chimică și duritatea fontei rezultate în urma elaborării în condiții de laborator se prezintă în tabelul 5.2, iar structurile metalografice aferente se prezintă în fig.5.8.

Tabel 5.2. Compoziția chimică și duritatea șarjei S1

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Duritate HB
3,28	2,47	0,9	0,405	0,409	0,18	0,08	229



Șarja 1x50 Șarja 1x100 Șarja 1x200
Fig.5.8 Microstructuri SEM pentru fonta elaborată în șarja S1

Fonta elaborată este o fontă cenușie cu grad de saturație în carbon ridicat $S_c=0,96$, cu grafit lamelar (Gf1) interdendritic de subrăcire (de tip D) de dimensiuni mici (Gf4, Gf5). Grafitul de dimensiuni mici asigură o uzură mult mai mică și mai uniformă decât separările grosolane [20].

Structura fontei este ferito-perlitică, iar datorită concentrației mărite de fosfor (peste 0,4%) este favorizată apariția eutecticului ternar fosforos (steadita), dispus sub formă de rețea discontinuă la limita grăunților structurii primare, ceea ce asigură o rezistență la uzare ridicată (deoarece are duritate ridicată) [21]. Suprafața ocupată de perlita este cuprinsă între 65-80% (apariția grafitului interdendritic de subrăcire de tip D este întotdeauna însoțită și de ferită) [21]. Valorile ridicate ale conținuturilor de Mn și S au acțiune perlitizantă la transformarea eutectoidă, favorizând transformarea austenitei în perlită, determinând creșterea gradului de dispersie a acesteia [108]. Creșterea conținutului de sulf (0,409%) conduce la

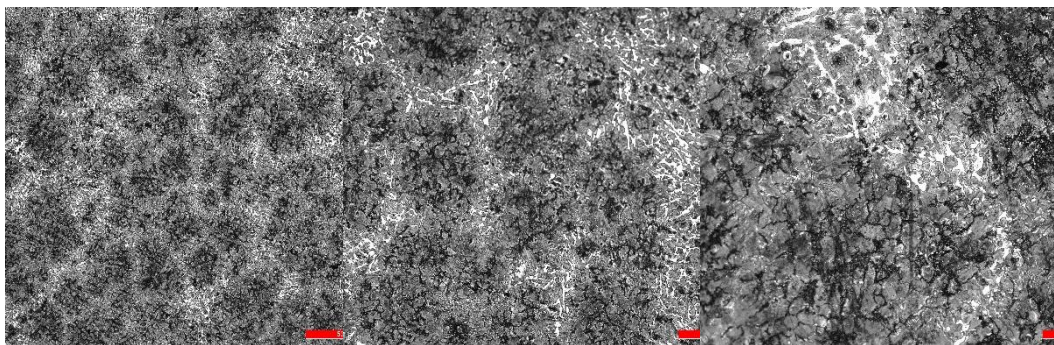
scăderea rezistenței la tracțiune a fontelor cenușii și la creșterea durității fontei (datorită acțiunii antigrafitizante a acestuia). Elementele înotoitoare (0,18%Cr și 0,08%Ni în limitele reziduale) au o acțiune perlitizantă la transformarea eutectoidă, ceea ce poate conduce la creșterea durității fontei [20].

b. Analiza șarjei S2

Compoziția chimică a fontei rezultate din șarja S2 este prezentată în tabelul 5.3, iar microstructurile aferente în fig.5.9.

Tabel 5.3. Compoziția chimică și duritatea șarjei S2

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Cu %	HB
3,47	2,30	0,83	0,07	0,233	0,4	0,2	237



Șarja 1x50

Șarja 1x100

Șarja 1x200

Fig.5.9 Microstructuri SEM pentru fonta elaborată în șarja S2

Fonta elaborată în cea de a doua șarjă este o fonta cenușie cu grad de saturație în carbon ridicat $Sc=0,97$, cu grafit lamelar (Gf1) semiarcuit (Gf2), dispus sub formă de rețea (Gr4). Structura masei metalice de bază este de tip perlită lamelară (PI) - suprafața ocupată de perlita este peste 80%.

Pentru caracterizarea fontelor din punct de vedere al compoziției chimice se folosește gradul de saturație în carbon (SC). Conform [20], acestea se determină cu ajutorul relației:

$$SC = C/[4,26 - 0,3(Si + P)] \quad (5.1)$$

Prin reducerea gradului de saturație în carbon SC, crește proporția de austenită, la cristalizarea primară, scheletul de dendrite și, în final, proporția de perlită, singurul constituent care poate asigura rezistența ridicată a fontei [19]. Compoziția chimică, respectiv gradul de saturație în carbon pentru cele două șarje elaborate sunt prezentate în fig.5.10 și fig.5.11.

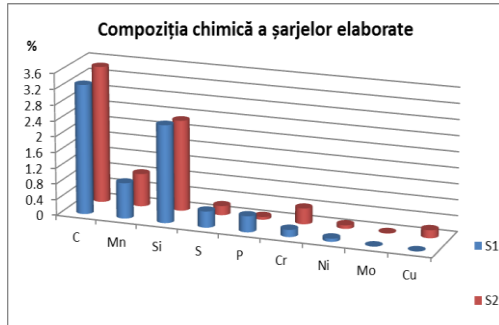


Fig.5.10 Compoziția chimică a celor patru șarje de fonte elaborate

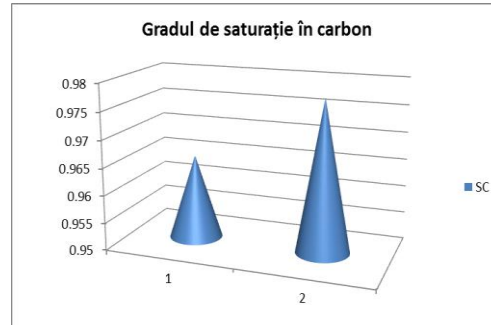


Fig.5.11 Gradul de saturație în carbon pentru cele patru șarje elaborate

Compoziția chimică a discurilor de frână pentru autovehicule conform normelor ASTM A159 s-au prezentat în tabelul 3.5, capitolul 3.

Analizând compozițiile chimice ale fontelor elaborate în șarja S1 și S2 comparativ cu compoziția chimică a discurilor de frână conform normelor ASTM A 159 se observă că:

- **fonta elaborată în șarja S1 se încadrează în marca G 2500, destinată realizării discurilor de frână pentru autovehicule;**
- **fonta elaborată în șarja S2 se încadrează în marca G 3000, destinată realizării discurilor de frână pentru autocamioane.**

5.1.2. Caracteristicile instalației

Instalația tribologică pentru testarea materialelor compozite are caracteristicile tehnice prezentate în fig.5.12. Regimul de frecare folosit este cel de frecare uscată, iar metoda de testare este pin pe disc.

Caracteristicile tehnice:

Motor electric $P=1\text{kW}$,

Turație $n=1500\text{ rot./min}$;

Distanța maximă dintre axul de rotație și epruvetă $d=75\text{ mm}$;

Viteza periferică a discului în dreptul epruvetei $v=11,775\text{ m/s}$



Fig.5.12. Instalație de uzare prin frecare uscată

5.1.3. Mod de încercări experimentale

Principiul testelor tribologice a constat în apăsarea unui pin din materialele compozite produse după rețetele optimizate (C1-C4) pe discul rotativ realizat din fontă, în vederea determinării unor caracteristici de uzare [24]. Sarcina aplicată simulează presiunea de contact dintre suprafețele aflate în frecare. Încărcarea brațului instalației se realizează prin intermediul unui taler pe care se așează greutatea de valoarea cunoscută. Apăsarea pinului pe disc s-a realizat cu trei forțe de

valori diferite: 5 N, 10 N și 15 N, care pot fi aplicate la distanțe diferite față de centrul discului [66], [109], [110]. Turația discului depinde de viteza de alunecare și raza de lucru, iar timpul de desfășurare a fiecărui test depinde de viteza de alunecare [24], [66]. Relații de calcul utilizate la determinarea parametrilor încercărilor tribologice se prezintă în tabelul 5.4 [24], [66].

Tabelul 5.4. Relații de calcul utilizate la determinarea parametrilor încercărilor [24], [66]

Presiunea [MPa]	Timpul de testare T, [min]	Viteza de alunecare [m/s]	Viteza unghiulară [rad/s]
$p = F_z / A$	$t = L/v$	$v = \omega R$	$\omega = \pi n / 30$

Semnificația mărimilor care apar în relațiile de calcul din tabelul 5.4 sunt:

- F_z – forța normală pe suprafața de contact a cuplelor aflate în frecare, [N];
- A - aria suprafeței de contact dintre disc și pin, [m²];
- L – lungimea de parcurs, [m];
- v – viteza de alunecare, [m/s];
- R- raza de montare a pinului, [m];
- n- turația echipamentului de încercare, [rot/min].

Aprecierea comportării materialelor testate se face prin metoda gravimetrică (pierderi în greutate). În acest sens se determină uzura masică și durabilitatea relativă la uzare [24], [66], [68], [109]. În cadrul experimentelor efectuate în condiții de laborator, *discul din fontă are rolul de a simula comportarea discului de frână din ansamblul sistemului de frânare al autovehiculelor, iar pinii din material compozit joacă rolul plăcuțelor de frână* [66].

5.2. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR FUNCȚIONALE A MATERIALELOR COMPOZITE

În vederea determinării comportării la frecare și uzură, probele realizate din materialele compozite care în urma analizelor tehnologice calitative au fost selectate ca fiind corespunzătoare (C1-C4), vor fi supuse testelor tribologice. care se vor efectua pe o instalație de uzare existentă în cadrul Laboratorului de Tribologie din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara.

În cadrul cercetărilor experimentale s-au studiat:

- **influența caracteristicilor masice și dimensionale asupra unor parametrii de uzare;**
- **influența vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare.**

5.2.1. Influența caracteristicilor masice și dimensionale asupra unor parametrii de uzare

Pentru efectuarea determinărilor experimentele s-a utilizat un *disc din fontă* elaborată laborator, într-un cuptor cu inducție, șarja S1, asimilată cu marca G 2500, conform normelor ASTM A 159. Alegerea acestei șarje s-a făcut deoarece marca G2500 este destinată realizării discurilor de fontă pentru autovehicule [38]. De asemenea, au fost supuse experimentărilor și un număr de 4 *pini din materialele compozite (C1-C4)* realizate după rețetele optimizate prezentate în cap.5,

subcapitolul 5.5. Pini au fost obținuți în laborator cu ajutorul matriței prezentată în fig.4.5, dimensiunile acestora fiind prezentate în cap.4, fig.4.6. Aceștia au aria bazei circulară, cu suprafața de 30,66 mm², aceasta fiind curățată cu hârtie abrazivă cu granulația de 400 μm.

În fig.5.13 se prezintă discul din fontă realizat din șarja S1 și doi pini realizați din materialele compozite aparținând familiei F1, cu 5 %, respectiv 10% fibră de nucă de cocos care s-au montat în instalația de uzare prin frecare. În vederea montării în instalația de uzare a fost necesar să se realizeze un suport de menținere, care la un capăt are o tijă filetată, iar la celălalt capăt un alezaj. Tija filetată a permis montarea suportului în instalația de uzare, iar celălalt capăt permite montarea succesivă a pinilor din materialele compozite testate, fig.5.14. În fig.5.15 se prezintă ansamblul suport-pin, iar în fig.5.16 se prezintă ansamblul acestor elemente montate pe brațul instalației de uzare.



Fig.5.13 Probele disc realizate din fontă împreună cu pinii din compozit



Fig.5.14 Suportul pentru montarea pinului din material compozit



Fig.5.15 Pin montat în suport



Fig.5.16 Cupla cinematică de testat montată în ansamblul instalației tribologice

Principali parametri utilizați în experimentările tribologice, determinați pe baza relațiilor din tabelul 5.4 sunt:

- viteza de alunecare: $v = 3,92 \text{ m/s}$ și $4,71 \text{ m/s}$;
- raza de încercare: $R = 25 \text{ mm}$;
- lungimea parcursă la încercare: $L = 2000 \text{ m}$;
- timpul de încercare: $t = 8,5 \text{ min}$.

Cu datele determinate experimental s-au calculat următorii **parametrii de uzare: uzură masică, intensitate de uzare și durabilitatea relativă de uzare.**

Caracteristicile masice și dimensionale ale epruvetelor C1-C4 la începutul și sfârșitul experimentărilor se prezintă în tabelul 5.5.

Tabel 5.5. Caracteristicile dimensionale ale epruvetelor

Nr. crt.	Nr. epruvetă	Masa inițială a epruvetei m_0 [g]	Masa finală a epruvetei m_f [g]	Înălțimea inițială a epruvetei l_i [mm]	Înălțimea finală a epruvetei l_f [mm]
1.	Fontă S1	50,8934	50,6214	-	-
2.	C1	7,8657	6,3243	27,5	18,4
3.	C2	7,2317	6,7532	26,4	17,8
4.	C3	8,8213	7,8389	25,0	14,5
5.	C4	8,1379	7,5129	28,3	23,6

Uzura masică u se determină cu relația [24], [66], [111]:

$$u = m_0 - m_f, \text{ [g]} \quad (5.2)$$

unde: m_0 este masa epruvetei înainte de încercare, [g];

m_f - masa epruvetei după încercare, [g].

Intensitatea de uzare se determină cu relația [24], [66], [111]:

$$I = \frac{u}{L_u} = \frac{m_0 - m_f}{L_u}, \text{ [g/m]} \quad (5.3)$$

unde: L_u este parcursul de uzare, [m].

Durabilitatea relativă la uzare se calculează prin raportarea uzurii masice a epruvetei din material compozit (u_c) la uzura masică a epruvetei de fontă (u_f), cu relația [24], [66], [111]:

$$u_r = \frac{u_c}{u_f} \quad (5.4)$$

Cu ajutorul caracteristicilor prezentate în tabelul 5.5 și utilizând relațiile 5.1, 5.2 și 5.3 se vor determina parametrii de uzare, rezultatele fiind prezentate în tabelul 5.6.

Tabel 5.6. Parametrii de uzare pentru proba de fontă și pinii din material compozit

Nr. crt.	Nr. epruvetă	Uzura masică $u = m_0 - m_f$ [g]	Parcursul de uzare L [m]	Intensitate de uzare $I = u / L$ [g/m]	Durabilitatea relativă la uzare $u_r = u_{\text{fontă}} / u_{\text{compozit}}$
1.	Fontă S1	0,272	5000	0.0000544	-
2.	C1	1,5414	5000	0.0003082	0,1764
3.	C2	0,4785	5000	0,0002957	0,1839
4.	C3	0,9824	5000	0,0001964	0,2768
5.	C4	0,625	5000	0,000125	0,4352

Analizând tabelul 5.6 se observă că cea mai mare intensitate de uzare s-a obținut pentru compozitul C1, iar cea mai mică pentru compozitul C4. De asemenea, pentru ambele familii de materiale compozite cea mai mare durabilitatea relativă de uzare s-a obținut pentru compozitele care conțin 10% fibră de nucă de cocos (C2 și C4).

În tabelul 5.7 se prezintă rezultatele experimentale privind reducerea greutateii și înălțimii epruvetelor supuse încercărilor tribologice.

Tabel 5.7. Rezultate experimentale privind reducerea greutateii și înălțimii epruvetelor

Nr. crt.	Nr. epruvetă	Uzura masică $u = m_0 - m_f$ [g]	Uzura masică relativă [%]	Reducerea de înălțime absolută, [mm]	Reducerea de înălțime relativă, [%]
1.	Fontă S1	0,272	0,53	-	-
2.	C1	1,5414	19,59	9,1	33,09
3.	C2	0,4785	6,61	8,6	32,57
4.	C3	0,9824	11,13	10,5	42,00
5.	C4	0,625	7,68	4,7	16,60

În fig.5.17 se prezintă sub formă grafică, variația uzurii masice pentru pinii din materialele compozite obținute după rețetele optimizate prezentate subcapitolul 4.3, tabellele 4.8 respectiv 4.9.

Cea mai mică uzură masică a fost obținută pentru proba C2 (familia F1 de materiale compozite), urmată de C4 (familia F2 de materiale compozite), ambele fiind realizate cu 10 % fibră organică.

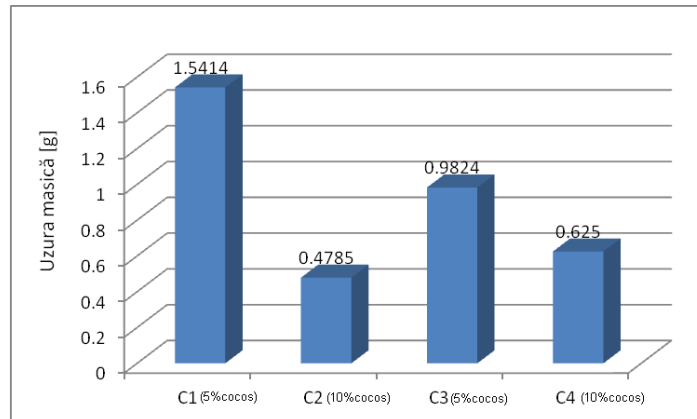


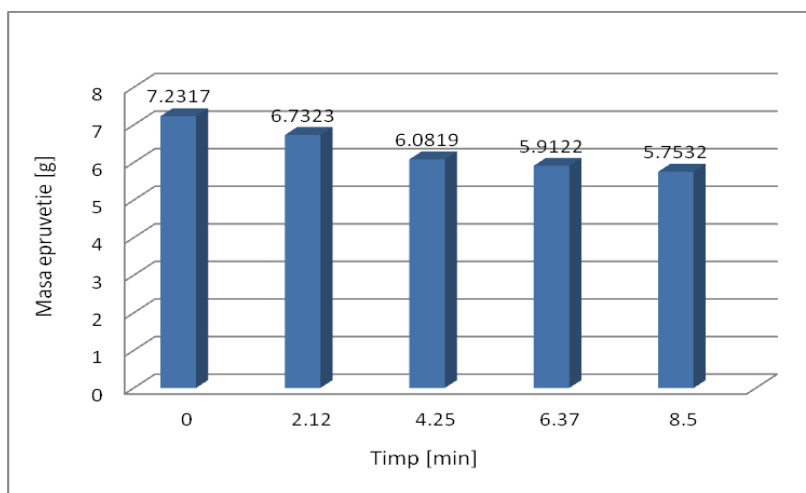
Fig.5.17. Uzura masică a probelor din material compozit

În timpul experimentărilor probele C2 și C4 au fost cronometrate și cântărite la timpi și lungimi pe parcurs intermediare, valorile obținute fiind prezentate sub formă tabelară și grafică, [24]. În tabelul 5.8 și fig.5.18-5.22 se prezintă rezultatele centralizate obținute pentru proba C2.

Tabel 5.8. Rezultate experimentale privind variația masei și a înălțimii epruvetei C2

Timpul [min]	Lungimea Parcursă L [m]	Masa [g]	Reducere de greutate absolută, [g]	Reducerea de greutate relativă, [%]	Înălțime [mm]	Reducere de înălțime absolută	Reducere de înălțime relativă
0	0	7,2317	0	0	26,4	0	0
2,12	500	6,7323	0,4994	6,9057	23,1	3,30	12,5
4,25	1000	6,0819	1,1498	15,8994	21,0	5,40	20,45
6,37	1500	5,9122	1,3195	18,2460	19,4	7,04	26,66
8,5	2000	5,753	1,4785	20,4447	17,8	8,60	32,57

În vederea stabilirii unor ecuații de corelație simplă (utile pentru cercetare și practica curentă), rezultatele prezentate în tabelul 5.8 au fost prelucrate în programul de calcul Excel. Corelațiile obținute sunt prezentate în continuare, atât sub formă analitică (cu menționarea coeficientului de regresie pentru fiecare corelație) cât și sub formă grafică în fig.5.24 – 5.28, rezultatele fiind semnificative din punct de vedere al coeficienților de corelație [24].

**Fig.5.18. Variația masei epruvetei C2 în funcție de timpul de încercare**

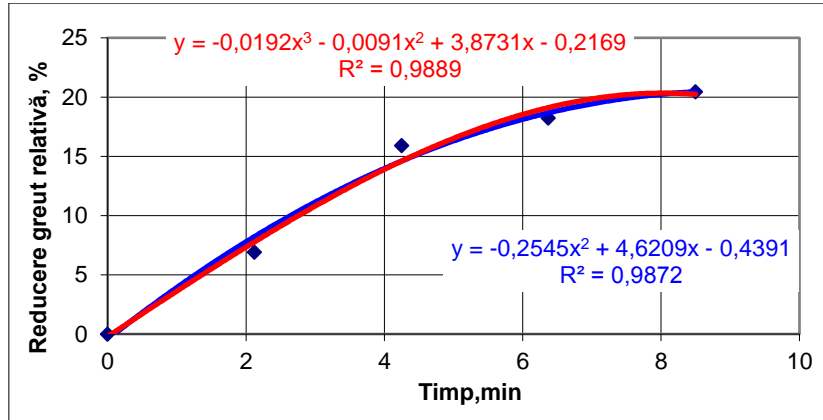


Fig.5.19 Reducerea de greutate relativă pentru epruveta C2

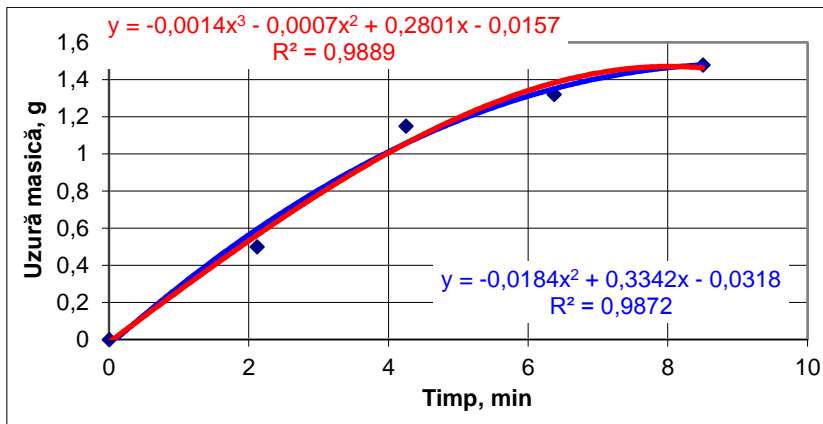


Fig.5.20 Uzura masică pentru epruveta C2

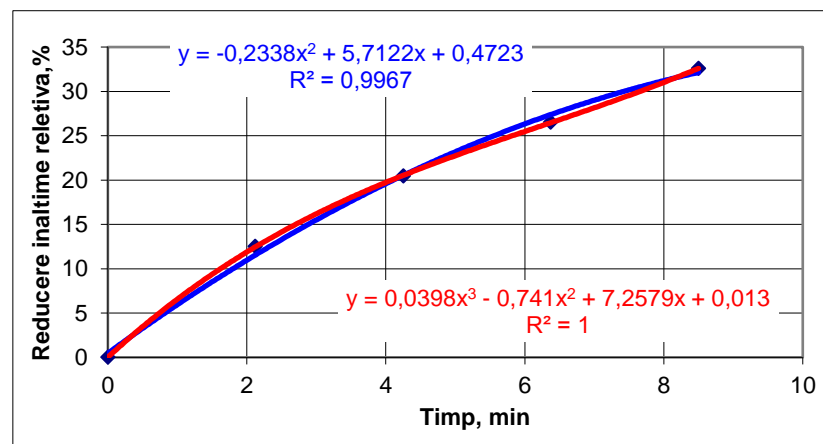


Fig.5.21 Reducerea de înălțime relativă pentru epruveta C2

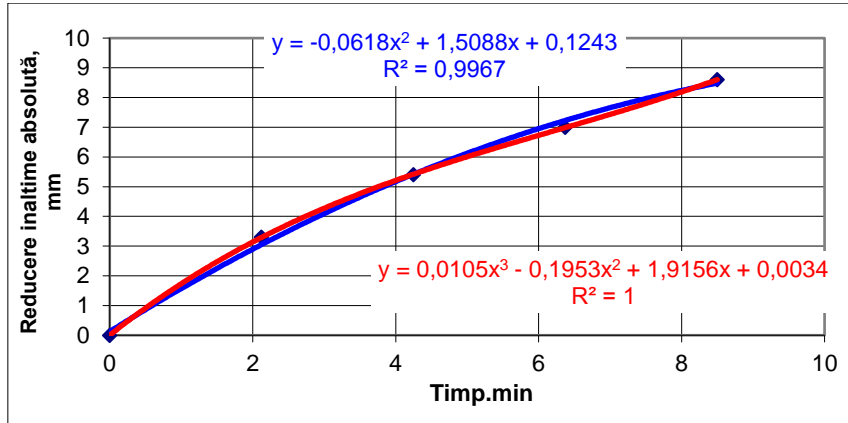


Fig.5.22 Reducerea de înălțime absolută pentru epruveta C2

Experimentările anterioare efectuate pentru proba C2 au fost efectuate și pentru proba C4. Astfel, în timpul experimentărilor epruveta C4 a fost cronometrată și cântărită la timpi și lungimi de parcurs intermediare [24]. Valorile obținute sunt prezentate în tabelul 5.9 și fig.5.23-5.27.

Tabelul 5.9. Rezultate experimentale privind variația masei și a înălțimii epruvetei C4

Timpul [min]	Lungimea Parcursă L [m]	Masa [g]	Reducere de greutate absolută, [g]	Reducerea de greutate relativă, [%]	Înălțime [mm]	Reducere de înălțime absolută	Reducere de înălțime relativă
0	0	8,1379	0	0	28,3	0	0
2,12	500	8,0529	0,085	1,04	26,4	1,9	6,71
4,25	1000	7,8912	0,2467	3,03	25,1	3,2	11,3
6,37	1500	7,6882	0,4497	5,52	24,4	3,9	13,78
8,5	2000	7,5129	0,625	7,68	23,6	4,7	16,60

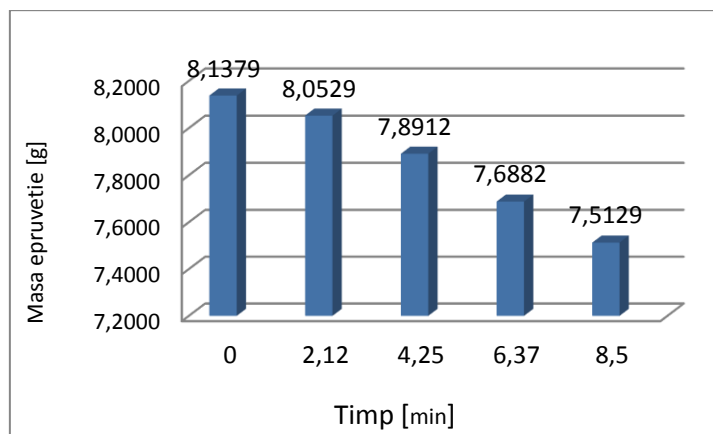


Fig.5.23 Variația masei epruvetei C4 în funcție de timpul de încercare

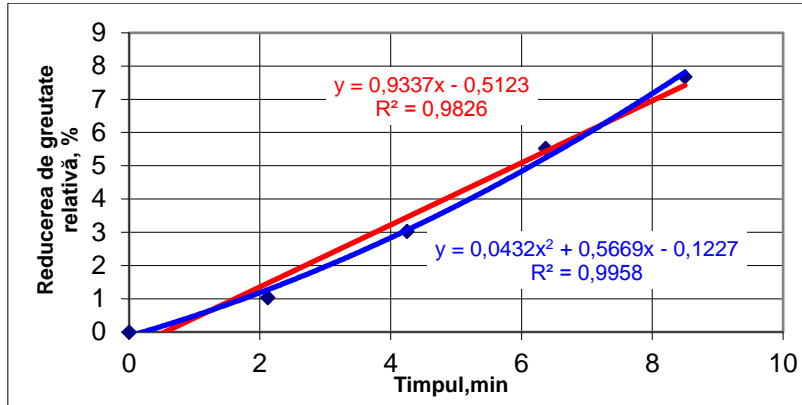


Fig.5.24 Reducerea de greutate relativă pentru epruveta C4

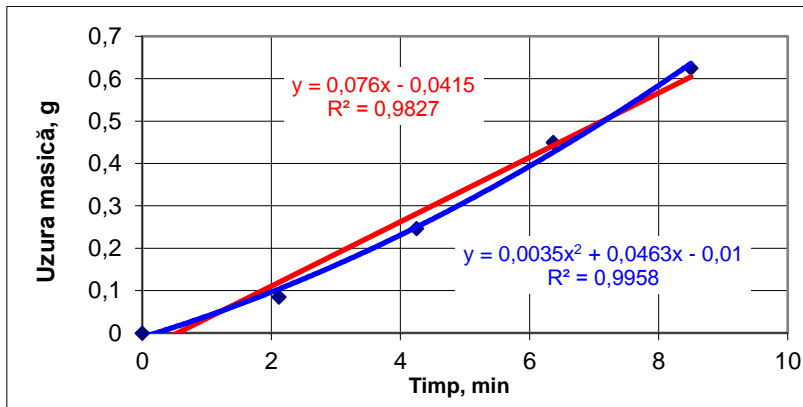


Fig.5.25 Uzura masică pentru epruveta C4

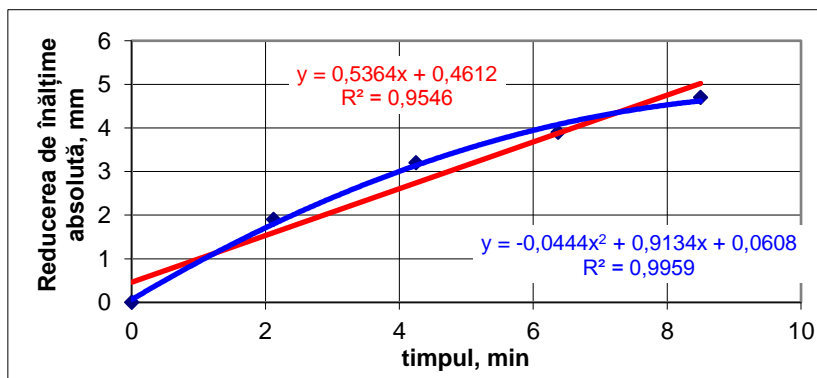


Fig.5.26 Reducerea de înălțime relativă pentru epruveta C4

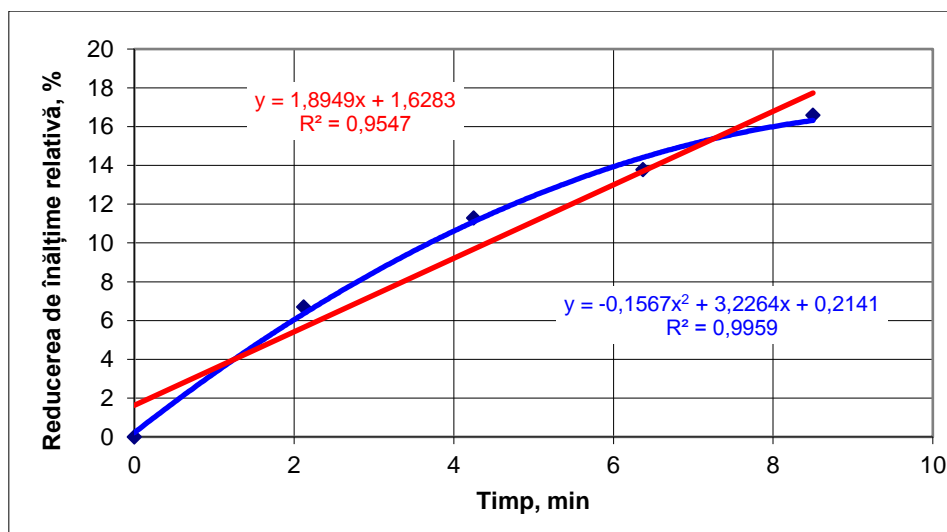


Fig.5.27 Reducerea de înălțime absolută pentru epruveta C4

În fig.5.28 și 5.29 se prezintă imaginile discului din fontă și a unui pin (C2) la finalul încercărilor tribologice anterior prezentate.



Fig.5.28 Imaginea discului din fontă la finalul încercărilor tribologice



Fig.5.29 Imaginea unui pin realizat din material compozit (C2) la finalul încercărilor tribologice

Din analiza experimentărilor efectuate și a rezultatelor obținute din prelucrarea datelor rezultă următoarele concluzii:

- cea mai mare rezistență la uzura o are epruveta C2 urmată de C4, ambele fiind realizate cu 10% fibră de nucă de cocos;
- rezistența la uzare este satisfăcătoare și în cazul epruvetelor C1 și C3, realizate cu 5 % fibră organică;
- uzura discului din fontă este mult mai mică decât uzura materialelor compozite, ceea ce arată că rezistența la uzare nu depinde foarte mult de cantitatea părții metalice [24], acest lucru fiind foarte important pentru situația practică deoarece plăcuțele de frână se înlocuiesc mai ușor decât discul .

5.2.2 Influența vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare

În acest subcapitol se urmărește evoluția ratei de uzură liniară a probelor la diferite viteze de alunecare și forțe de încărcare. Instalația tribologică utilizată în efectuarea experimentărilor este cea prezentată în fig.5.12.

Pentru determinările experimentale s-au utilizat **discuri realizate din fiecare rețetă optimizată de material compozit** (cap.4, subcapitolul 4.3), și pini din fontă, elaborată în cuptorul cu inducție, șarja S1, asimilată cu marca G 2500, conform normelor ASTM A 159 prezentate în cap.3, tabelul 3.5.

Materialele studiate s-au testat în condiții de frecare uscată, utilizând forțe de apăsare de valori diferite: $F=5\text{N}$, $F=10\text{N}$ și $F=15\text{N}$ și două viteze de alunecare: $3,92\text{ m/s}$, respectiv $4,71\text{ m/s}$. Uzura s-a măsurat pentru fiecare disc în parte (uzura la știft fiind neglijabilă), ca pierdere de masă între valoarea măsurată inițial și valoarea măsurată la finalul testului [24], [66], [68], [71].

Rata de uzură liniară la o încercare s-a calculat cu relația [24], [66] :

$$W_e = \frac{\Delta_m}{F \cdot L} \text{ [g/N}\cdot\text{km]} \quad (5.5)$$

unde: $\Delta_m = m_i - m_f$, [g];

m_i - masa inițială a probei [g];

m_f - masa finală a probei, [g];

F - forța normală aplicată la tribometru, [N];

L - distanța de alunecare, [km].

Datele experimentale pentru discurile din material compozit C1-C4 încărcate cu forța normală de apăsare având valoarea $F = 5\text{ N}$, vitezele de alunecare de $3,92\text{ m/s}$ și $4,71\text{ m/s}$ și distanța de alunecare constantă $L = 2000\text{m}$ sunt prezentate în tabelul 5.10. În acest tabel se prezintă uzura masică a probelor și rata de uzură liniară de uzare pentru fiecare probă din material compozit.

Tabelul 5.10. Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 5\text{N}$

Probe disc material compozit	Viteza de alunecare v [m/s]	Masa inițială a probei m_i , [g]	Masa finală a probei m_f , [g]	Uzura masică Δ_m , [g]	Uzură liniară $W_e = \frac{\Delta_m}{F \cdot L}$
C1	3,92	39,2176	39,1431	0,0745	0,00745
	4,71	39,7216	39,7020	0,0196	0,00196
C2	3,92	35,0819	35,0630	0,0189	0,00189
	4,71	35,0672	35,0535	0,0137	0,00137
C3	3,92	45,4378	45,4095	0,0283	0,00283
	4,71	45,9285	45,9094	0,0191	0,00191
C4	3,92	46,2179	46,193	0,0249	0,00249
	4,71	46,9516	46,9351	0,0165	0,00165

Datele experimentale obținute cu privire la uzura liniară au fost prelucrate în programul de calcul Excel, iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în fig.5.30 și 5.31.

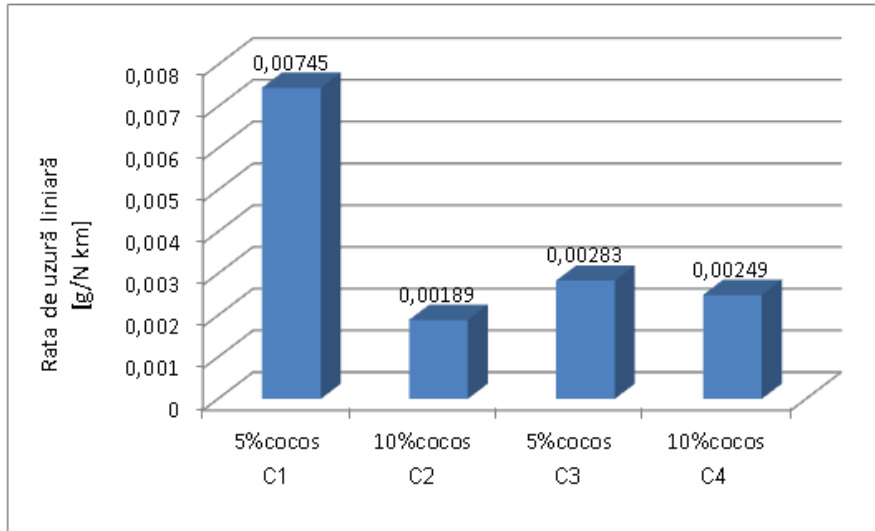


Fig.5.30 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 3,92 \text{ m/s}$, $F = 5N$

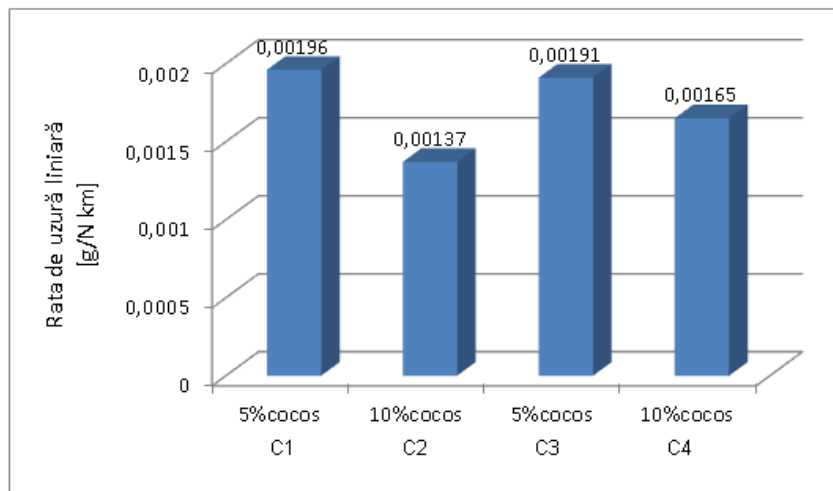
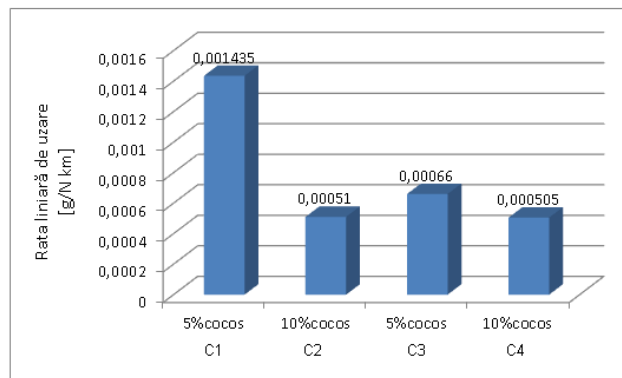
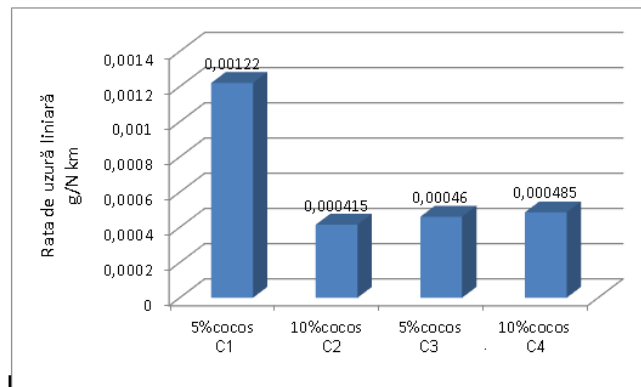


Fig. 5.31 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 4,71 \text{ m/s}$, $F = 5N$

Datele experimentale pentru discurile din material compozit cu forța normală de $F = 10N$, vitezele de alunecare de $3,92 \text{ m/s}$ și $4,71 \text{ m/s}$ și distanța de alunecare constantă $L = 2000 \text{ m}$ sunt prezentate în tabelul 5.11. Datele experimentale obținute cu privire la uzura liniară au fost prelucrate în programul de calcul Excel, iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în fig.5.32 și 5.33.

Tabelul 5.11. Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 10N$

Probe disc material compozit	Viteza de alunecare v [m/s]	Masa inițială a probei m_i , [g]	Masa finală a probei m_f , [g]	Uzura masică Δm , [g]	Uzură liniară $W_e = \frac{\Delta m}{F \cdot L}$
C1	3,92	53,2135	53,1848	0,0287	0,001435
	4,71	53,0911	53,0667	0,0244	0,00122
C2	3,92	45,3162	45,306	0,0102	0,00051
	4,71	45,6965	45,6882	0,0083	0,000415
C3	3,92	55,3310	55,3178	0,0132	0,00066
	4,71	55,5260	55,5168	0,0092	0,00046
C4	3,92	46,1807	46,1706	0,0101	0,000505
	4,71	46,3114	46,3017	0,0097	0,000485

**Fig.5.32 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 3,92$ m/s, $F = 10N$** **Fig.5.33 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 4,71$ m/s, $F = 10N$**

Datele experimentale pentru discurile din material compozit cu forța normală de $F = 15N$, vitezele de alunecare de $3,92 \text{ m/s}$ și $4,71 \text{ m/s}$ și distanța de alunecare constantă $L = 2000 \text{ m}$ sunt prezentate în tabelul 5.12. Datele experimentale obținute cu privire la uzura liniară au fost prelucrate în programul de calcul Excel, iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în fig.5.34 și 5.35.

Tabelul 5.12. Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 15N$

Probe disc material compozit	Viteza de alunecare v [m/s]	Masa inițială a probei m_i , [g]	Masa finală a probei m_f , [g]	Uzura masică Δm , [g]	Uzură liniară $W_e = \frac{\Delta m}{F \cdot L}$
C1	3,92	51,0442	51,0292	0,0150	0,0005
	4,71	50,9574	50,9433	0,0141	0,00047
C2	3,92	45,6355	45,6278	0,0077	0,00025
	4,71	45,6253	45,6179	0,0074	0,000246
C3	3,92	55,5660	55,5576	0,0084	0,00028
	4,71	55,76524	55,75734	0,0079	0,000263
C4	3,92	46,9710	46,9638	0,0072	0,00024
	4,71	46,9806	46,9737	0,0069	0,00023

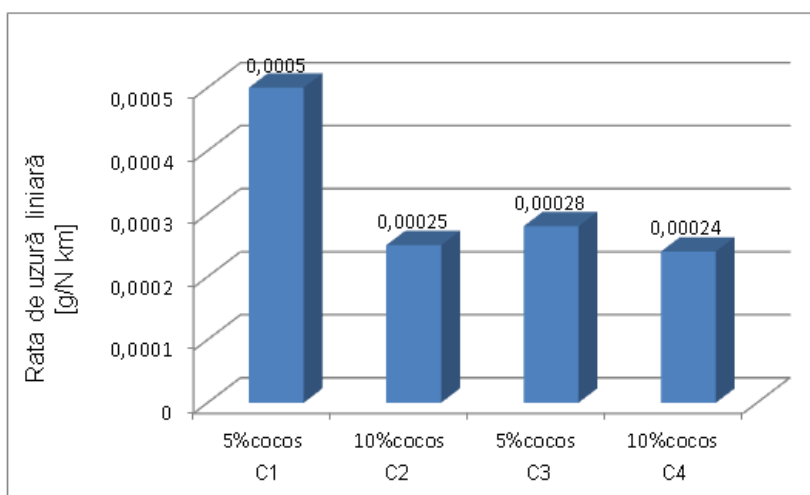


Fig. 5.34 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 3,92 \text{ m/s}$, $F = 15N$

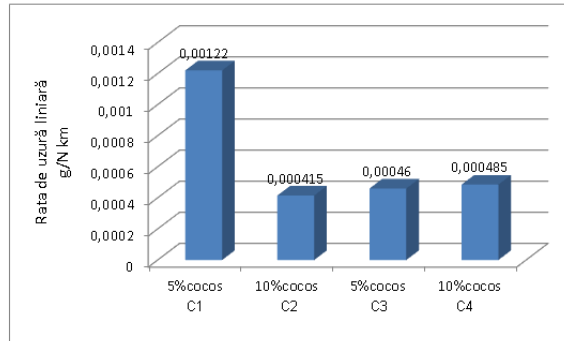


Fig.5.35 Rata de uzură liniară a probelor la $V = 4,71 \text{ m/s}$, $F = 15N$

În continuare se prezintă rezultatele comparative pentru cele patru probe disc realizate după rețetele optimizate, având următorii parametri de încercare:

- $F=5N$, $v= 3,92\text{m/s}$ și $4,71\text{m/s}$, $L = 2000\text{m}$, fig.5.36;
- $F=10N$, $v= 3,92\text{m/s}$ și $4,71\text{m/s}$, $L = 2000\text{m}$, fig.5.37;
- $F=15N$, $v= 3,92\text{m/s}$ și $4,71\text{m/s}$, $L = 2000\text{m}$, fig.5.38.

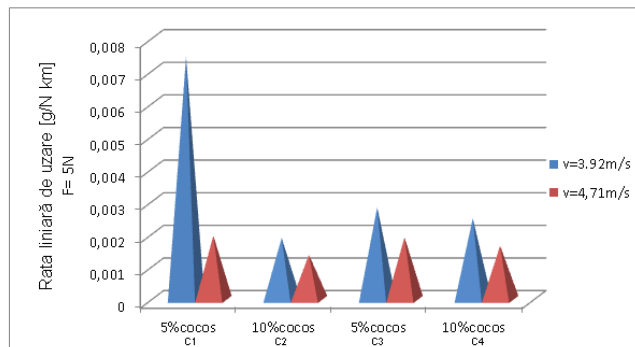


Fig.5.36. Analiza comparativă a ratei liniare de uzare a probelor disc din material compozit, $F=5N$

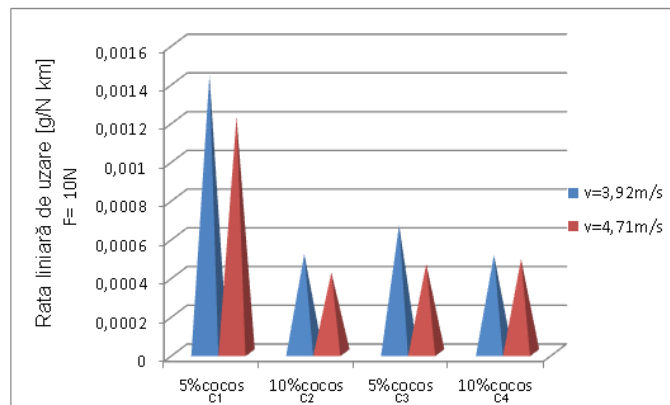


Fig.5.37 Analiza comparativă a ratei liniare de uzare a probelor disc din material compozit, $F=10N$

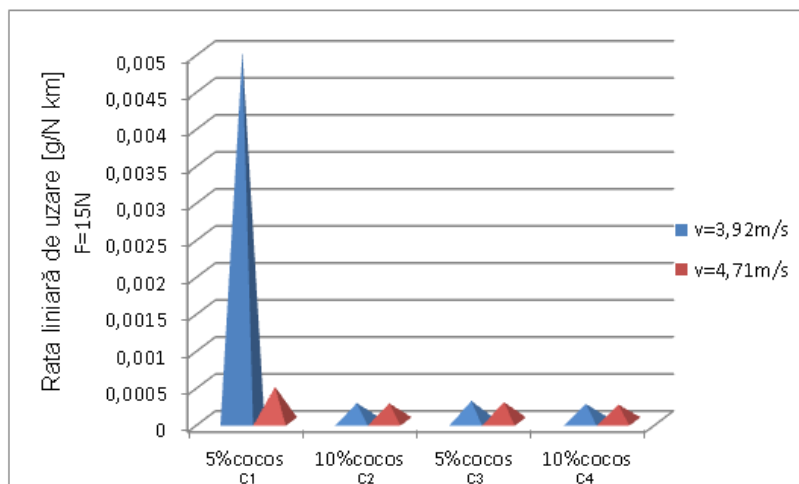


Fig.5.38 Analiza comparativă a ratei liniare de uzare a probelor disc din material compozit, $F=15N$

În urma studiului influenței vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare se desprind următoarele concluzii:

- rata de uzură liniară scade cu creșterea vitezei de alunecare;
- rata de uzură liniară scade cu creșterea forței de apăsare;
- cea mai bună comportare la uzare o au probele C2 și C4, realizate cu 10 % fibră organică.

5.3. STUDIUL EVOLUȚIEI CÂMPULUI TERMIC ÎN ZONA DE CONTACT

În cadrul acestor experimente se va analiza și **evoluția câmpului termic în zona de contact a cuplelor de frecare** (disc fontă-pin material compozit organic). Câmpul termic se va analiza cu ajutorul unei camere termografice marca FLIR "Therma CAM Quick View" care permite descărcarea de imagini de la un aparat de fotografiat în infraroșu, la un PC, precum și captarea imaginilor de la distanță în aparatul de fotografiat [24], [112]. Imaginile captate pot furniza informații cu privire la evoluția temperaturii în punctul de contact dintre pin și disc, precum și temperatura urmei de contact.

În tabelul 5.13 se prezintă temperatura urmei de contact dintre discul din fontă și pinii din material compozit precum, iar în fig.5.39-5.41 imaginile și evoluția temperaturii în punctul de contact pentru pinul C2.

Tabelul 5.13. Temperatura urmei de contact dintre discul din fontă și pinii din material compozit

Forța de apăsare F [N]	Lungimea de parcurs L [m]	Timpul de încercare t [min]	Temperatura T [°C]			
			Familia F1 (TiO ₂)		Familia F2 (Al ₂ O ₃)	
			C1	C2	C3	C4
5	500	2,12	45,7	37,4	49,4	46,6
	1000	4,25	49,9	41,9	58,5	57,5
	1500	6,37	51,9	43,8	64,9	63,1
	2000	8,50	48,9	44,3	70,0	69,0
10	500	2,12	84,7	81,3	88,6	80,8
	1000	4,25	90,5	86,4	94,4	92,8
	1500	6,37	93,2	77,5	96,9	94,0
	2000	8,50	90,7	72,2	90,7	90,2
15	500	2,12	115	75,5	96,5	85,2
	1000	4,25	121	65,7	100,1	87,8
	1500	6,37	126	69,0	97,6	80,8
	2000	8,50	118	58,3	92,1	75,5

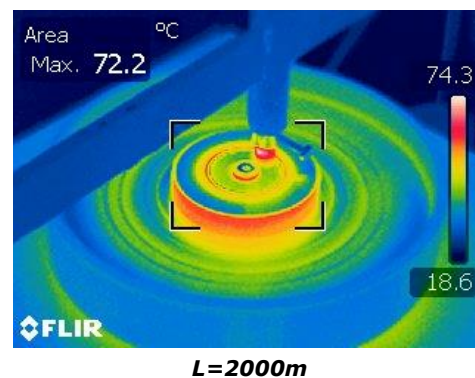
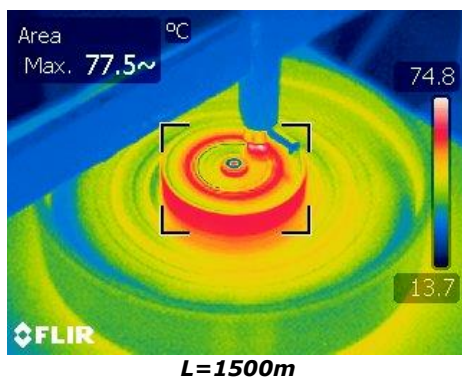
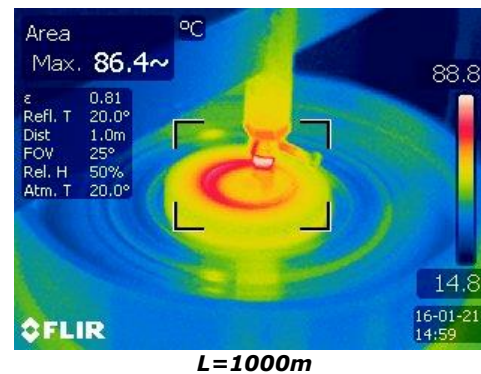
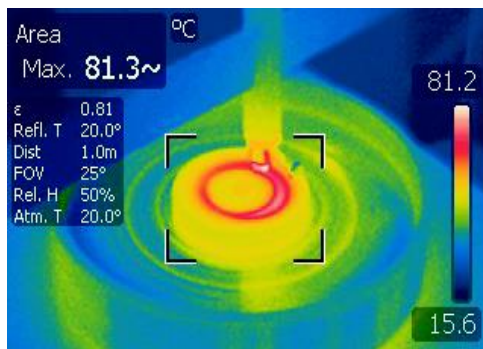


Fig.5.40 Evoluția câmpului termic pentru pinul C2, F =10 N, R=25 mm

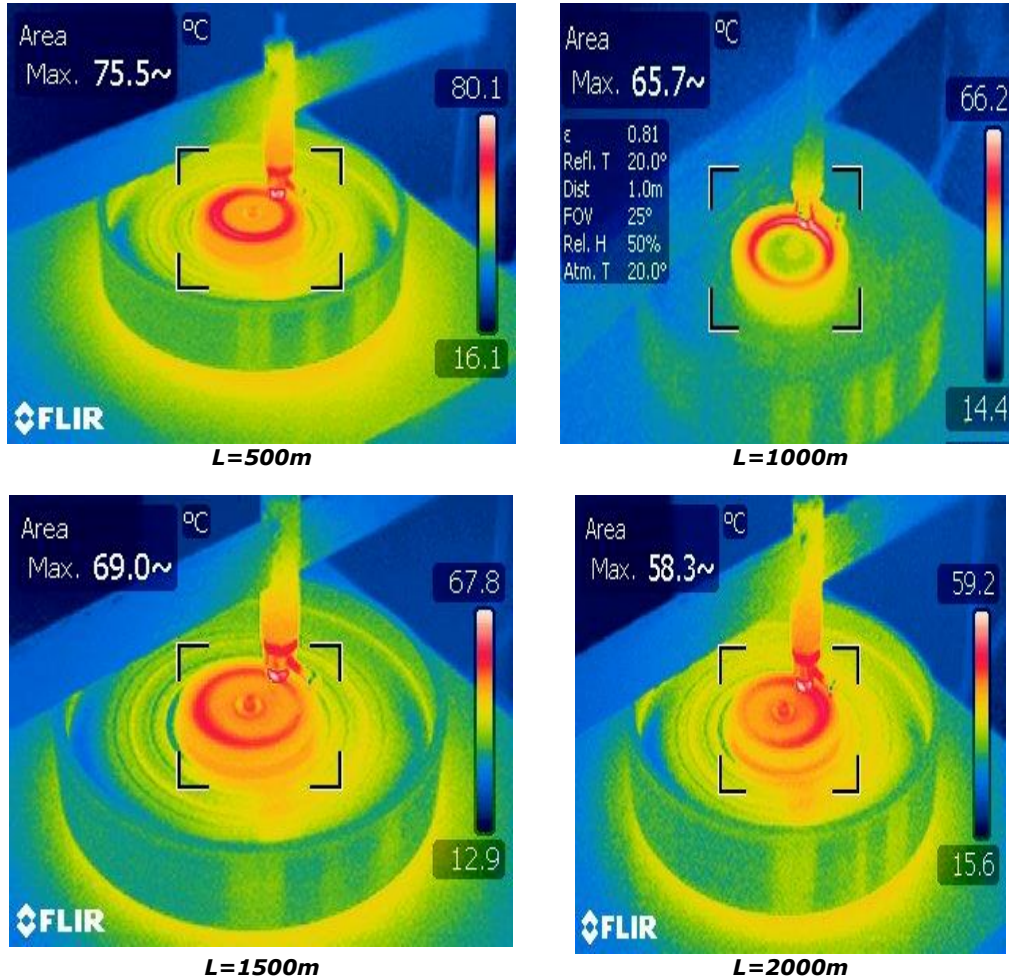


Fig.5.41 Evoluția câmpului termic pentru pinul C4 , F =15 N, R=25 mm

Pentru familia F1 de materiale compozite se observă că:

- la F=5N în intervalul 0-500m, temperatura în pinul C1 crește mai repede decât în C2, astfel încât la sfârșitul parcurgerii celor 500m temperatura în pinul C1 este $T_{C1} = 45,7^{\circ}\text{C}$, iar temperatura în pinul C2 este $T_{C2} = 37,4^{\circ}\text{C}$;
- la aceeași forță de încărcare, în intervalul 500-1000m, temperatura în cei doi pini crește mai puțin, cu aproximativ 4°C , iar în intervalul 1000-1500m, creșterea de temperatura a fost și mai mică, de aproximativ 2°C ;
- peste 1500 m, temperatura în cei doi pini începe să scadă, astfel încât la finalul încercărilor cu forța de 5N temperatura urmei de contact în pinul C1 a fost $48,9^{\circ}\text{C}$, iar în pinul C2 temperatura a fost $44,3^{\circ}\text{C}$;
- la creșterea forțelor de încărcare cu valorile F=10N respectiv F=15N se observă că se păstrează aceeași tendință de creștere rapidă în intervalul 0-500m, urmată de o stabilizare a temperaturii în intervalul 500-1500m, iar peste 1500m temperatura începe să scadă;

- în toate cele trei variante de încărcare, pinul realizat după rețeta C1, care conține 5% fibră de nucă de cocos a acumulat o cantitate mai mare de căldură.

În fig.5.42-5.44 imaginile și evoluția temperaturii în punctul de contact pentru pinul C4.

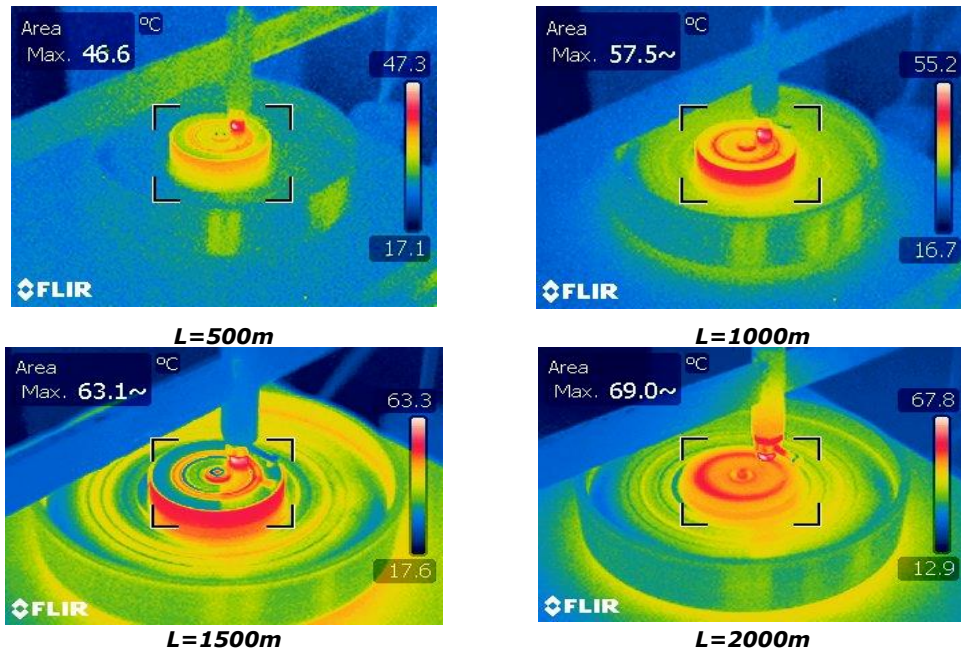


Fig.5.42 Evoluția câmpului termic pentru pinul C4, $F = 5 \text{ N}$, $R = 25 \text{ mm}$

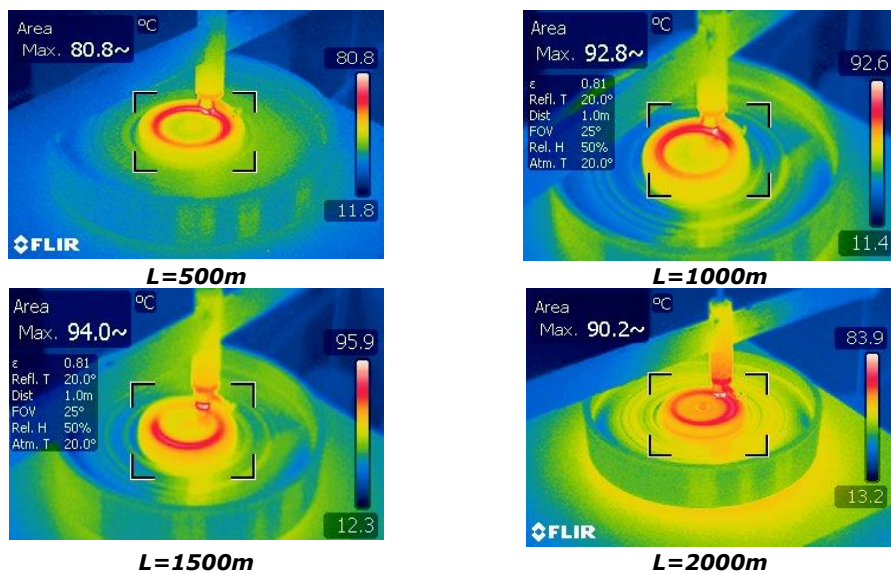


Fig.5.43 Evoluția câmpului termic pentru pinul C4, $F = 10 \text{ N}$, $R = 25 \text{ mm}$

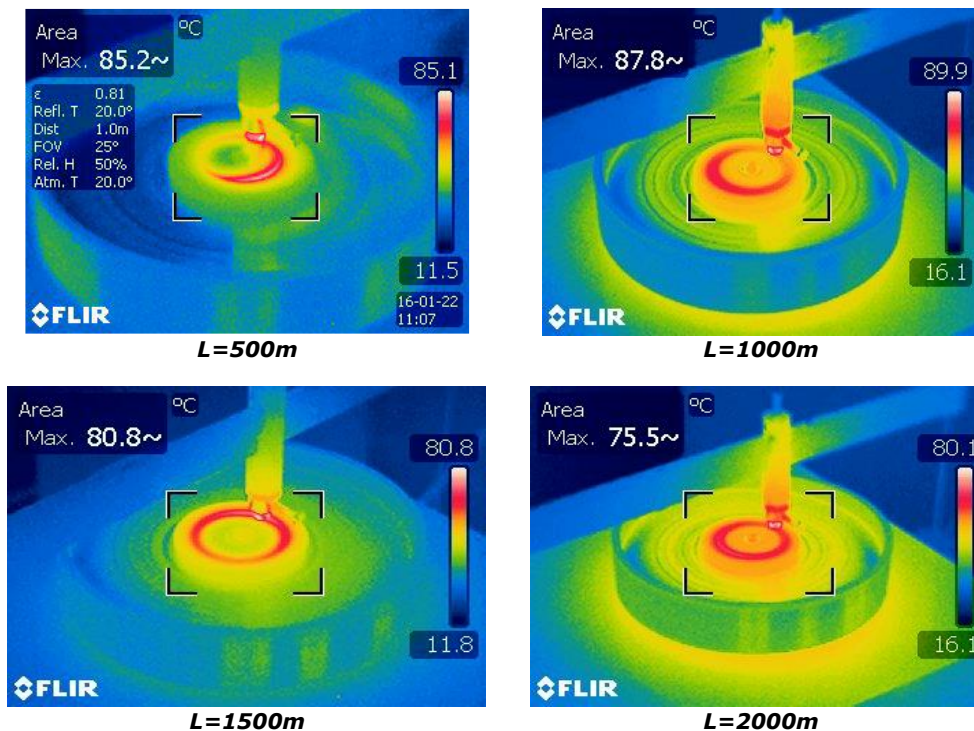


Fig.5.44 Evoluția câmpului termic pentru pinul C2, $F = 15\text{ N}$, $R = 25\text{ mm}$

Pentru familia F2 de materiale compozite se observă că:

- la $F=5\text{N}$ în intervalul 0-500m, se observă aceeași creștere rapidă de temperatură ca și în cazul familiei F1 de materiale compozite;
- la aceeași forță de încărcare, în intervalul 500-1000m, temperatura în cei doi pini crește cu aproximativ 10°C , ceea ce reprezintă o creștere mai mare decât în cazul familiei F1;
- în intervalul 1000-1500m, creșterea de temperatură este de aproximativ 5°C ;
- peste 1500 m, temperatura în cei doi pini începe să scadă, astfel încât la finalul încercărilor cu forța de 5N temperatura urmei de contact în C3 a fost 70°C , iar în C4 temperatura a fost 63°C ;
- la creșterea forțelor de încărcare $F=10\text{N}$ și $F=15\text{N}$ se observă că se păstrează aceeași tendință de creștere rapidă în intervalul 0-500m, urmată de o stabilizare a temperaturii în intervalul 500-1500m, iar peste 1500m temperatura începe să scadă;
- în toate cele trei variante de încărcare, pinul realizat după rețeta C3, care conține 5% fibră de nucă de cocos a acumulat o cantitate mai mare de căldură.

Ca urmare a studiului evoluției câmpului termic în zona de contact dintre discul din fontă și pinii din material compozit s-au obținut următoarele concluzii:

- pentru toți cei patru pini C1-C4, temperatura în zona de contact crește rapid în prima parte a încercării până la parcurgerea distanței de 500 m ;
- în intervalul de 500 – 1500 m temperatura mai crește mai puțin și se poate spune că în acest interval de lungime parcursă începe procesul de stabilizare a temperaturii;
- cea mai mare parte a căldurii se disipă în pin care în cupla reală de frecare reprezintă plăcuța de frână;
- cu cât temperatura în zona de contact este mai mică, cu atât disiparea de căldură este mai mare, deci este mai mică degradarea componentelor organice din materialele compozite;
- cea mai bună comportare o au pinii C2 și C4, ambii fiind realizați cu 10% fibră organică.

5.4. DETERMINAREA EVOLUȚIEI COEFICIENTULUI DE FRECARÉ

În acest subcapitol **cercetarea tribologică a probelor din material compozit a avut ca obiective studiul influenței unor parametri ai regimului de lucru: forța de apăsare, turația, timpul de încercare, asupra caracteristicilor tribologice a probelor testate. În acest sens s-a studiat evoluția coeficientului de frecare.**

5.4.1. Prezentarea echipamentului de testare și a modului de lucru

Determinarea coeficientului de frecare s-a efectuat la Universitatea Politehnica Timișoara, Facultatea de mecanică din cadrul departamentului Ingineria Materialelor și a Fabricației.

Echipamentul pe care s-au realizat determinările experimentale este un tribometru TR-20 produs de firma Ducom-Materials Characterization Systems a cărui principiu de funcționare are la bază metoda „pin pe disc”, fig.5.45. Echipamentul permite montarea unor epruvete realizate din materialele de testat, de formă paralelipipedică sau disc, de diferite dimensiuni, în acest sens echipamentul dispune de patru bacuri reglabile. Pinul echipamentului este o bilă de oțel cu diametrul de 6 mm, iar regimul de frecare folosit pentru testare este cel de frecare uscată.

În cadrul experimentărilor, epruvetele au fost realizate sub formă paralelipipedică cu dimensiunile 30x30x20mm. Probele au fost supuse curățirii cu alcool, apoi uscate și cântărite cu o balanță digitală cu precizia de $\pm 0,01$ mg. S-au realizat trei cântăriri succesive luând în calcul media acestora. În fig.5.46 se prezintă o epruvetă montată în ansamblul echipamentului de testare în timp determinărilor experimentale.



Fig.5.45 Tribometru TR-20 pentru determinare coeficientului de frecare

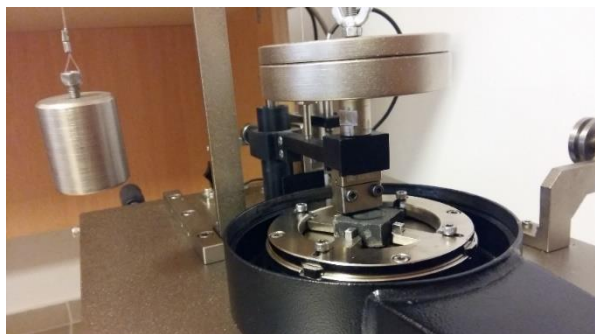


Fig.5.46 Epruvetă montată în ansamblul instalației de uzare în timp determinărilor experimentale

Fiecare test s-a efectuat la o rază de 15 mm de la axa de simetrie a echipamentului, pe fiecare epruvetă rezultând o singură urmă de uzare. Uzura s-a măsurat pentru fiecare probă în parte prin pierdere de masă între valoarea măsurată inițial și valoarea măsurată la finalul testului [113].

În funcție de turație și raza urmei de uzare se poate calcula viteza relativă dintre bilă și piesă v [m/s] și timpul de testare [min]. Încercările s-au efectuat cu trei sarcini de valori diferite. În urma efectuării testelor au rezultat datele experimentale sub forma unui fișier text care au putut fi prelucrate în programul Excel, precum și graficele aferente, înregistrate de softwer-ul echipamentului de încercare.

5.4.2. Experimentări și rezultate

În cadrul testului s-a modificat forța de apăsare, la fiecare încercare cântărindu-se probele înainte și după efectuarea încercării, în vederea determinării uzurii masice.

Parametrii de încercare în cadrul experimentului sunt:

- **diametrul urmei de uzare:** $D = 15 \text{ mm}$;
- **turația:** $n = 150 \text{ rot/min}$;
- **timpul de testare:** $t = 5 \text{ h}$;
- **distanța de testare** (calculata pe baza condițiilor de mai sus):
 $d = 2200 \text{ m}$.

În fig.5.47 se prezintă cele patru probe după efectuarea testelor pentru determinarea coeficientului de frecare.

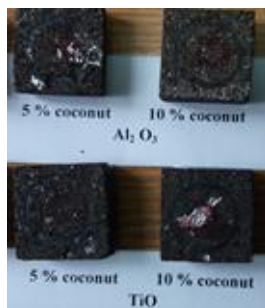


Fig.5.47 Urme de uzare obținute pe epruvetele testate [113]

a. Date experimentale pentru sarcina $F = 5N$

Datele experimentale pentru sarcina $F = 5N$ obținute în fișier text din soft-ul computerului tribometrului au fost importate și prelucrate în programul de calcul Excel, iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în fig.5.48-5.51.

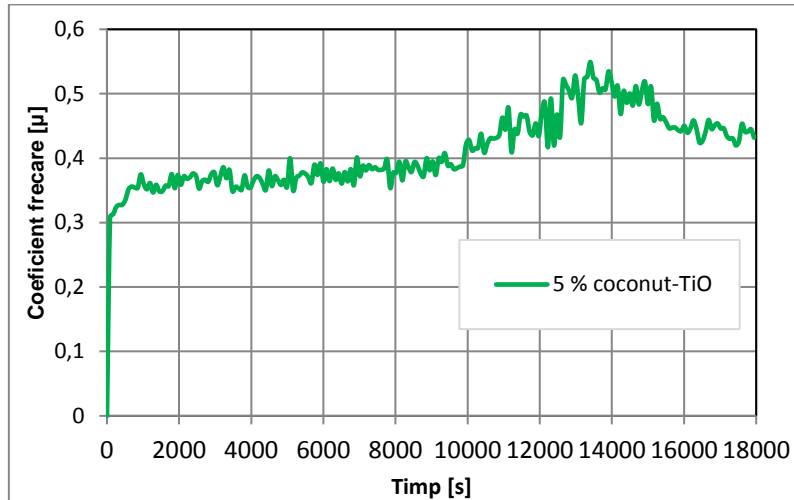


Fig. 5.48 Coeficientul de frecare la încercarea probei C1 cu $F=5N$

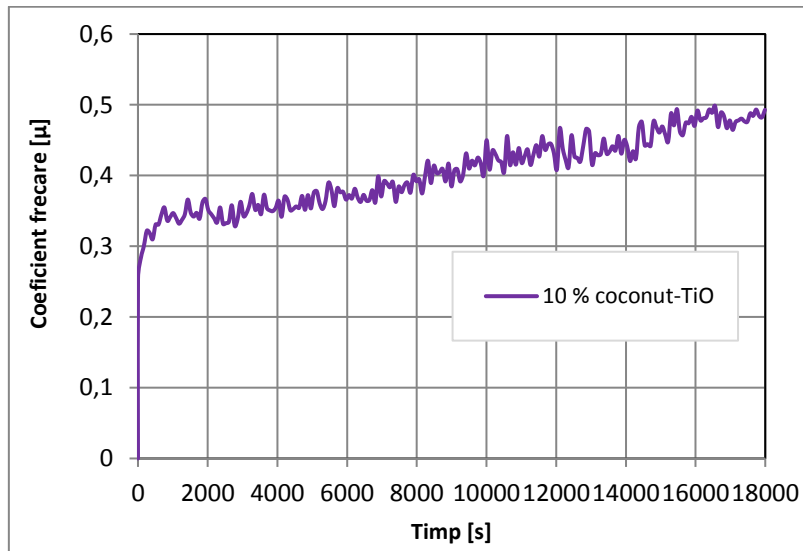


Fig. 5.49 Coeficientul de frecare la încercarea probei C2 cu $F=5N$

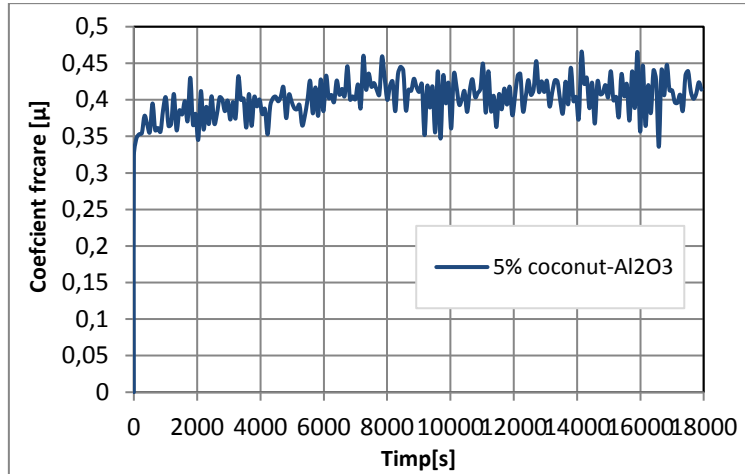


Fig. 5.50 Coeficientul de frecare la încercarea probei C3 cu F=5N

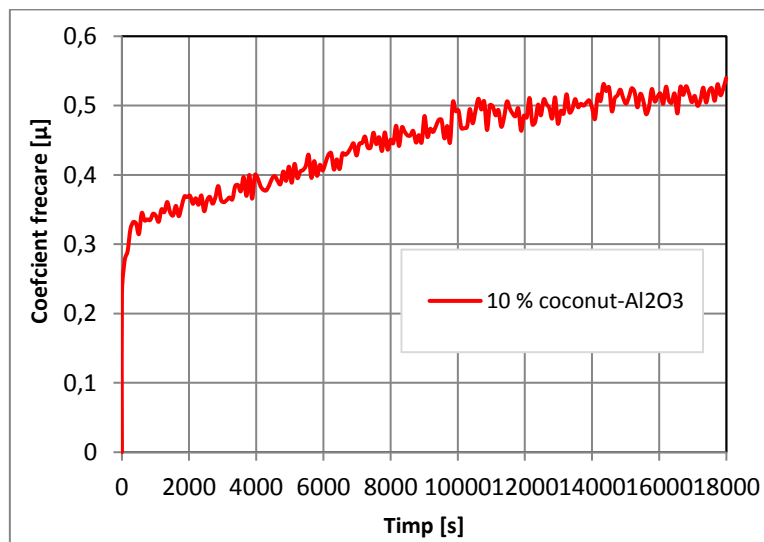


Fig. 5.51 Coeficientul de frecare la încercarea probei C4 cu F=5N

Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 5N$ se prezintă în tabelul 5.14.

Tabelul 5.14. Rezultatele determinărilor experimentale $F = 5N$

Nr. crt.	Caracteristici	Probe			
		C1	C2	C3	C4
1.	Coeficient de frecare (mediu)	0,45	0,51	0,47	0,52
2.	Pierderea de material Δm , [g]	0,18	0,06	0,15	0,07

Analizând graficele din figurile anterioare se observă că:

- la începutul testelor coeficientul de frecare variază ca urmare a contactului discontinuu dintre bila de oțel și probele din materialele compozite, datorate neregularității suprafeței frontale a probei paralelipipedice;
- după un interval de timp de aproximativ 2000 s, coeficienții de frecare au atins valori de 0,3 pentru probele C1, C2 și C4, singura probă pentru care coeficientul de frecare 0,47, fiind C3;
- în intervalul de timp de la 2000s până la 10000s se observă o creștere a coeficienților de frecare care depășesc valoarea de 0,4 pentru toate probele;
- pentru proba C1, coeficientul crește în continuare atingând un maxim de 0,55 după un interval de 140 000s, după care scade și se stabilizează în jurul valorii de 0,45;
- pentru proba C2, coeficientul de frecare crește până la valoare de 0,51, valoare la care se stabilizează;
- coeficientul de frecare pentru C3 are fluctuații mari în jurul valorii de 0,47, iar pentru C4 coeficientul de frecare la finalul încercărilor s-a stabilizat în jurul valorii de 0,52.

b. Date experimentale pentru sarcina $F = 10\text{ N}$

Regimul de frecare folosit pentru testarea cu $F = 10\text{ N}$ este tot cel de frecare uscată. Pentru fiecare probă s-a folosit o bilă din oțel. În urma realizării testelor au rezultat datele încercării în fișier text precum și graficele parametrilor, înregistrate de softwer -ul computerului tribometrului TR -20. Datele experimentale pentru sarcina $F=10\text{ N}$ obținute în fișier text din software-ul calculatorului tribometrului au fost importate și prelucrate în programul de calcul Excel, iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în fig.5.52.

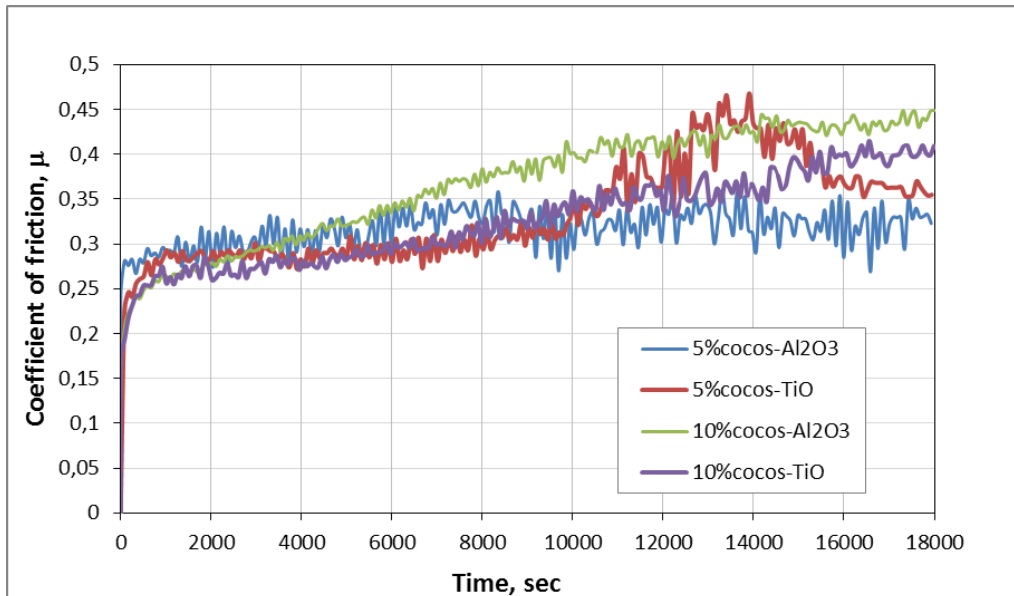


Fig. 5.52 Coeficientul de frecare la încercarea probelor C1- C4, cu $F=10\text{ N}$

Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 10\text{N}$ se prezintă în tabelul 5.15.

Tabelul 5.15. Rezultatele determinărilor experimentale $F = 10\text{N}$

Nr. crt.	Caracteristici	Probe			
		C1	C2	C3	C4
1.	Coeficient de frecare (mediu)	0,32	0,37	0,31	0,45
2.	Pierderea de material Δm , [g]	0,16	0,04	0,13	0,06

Analizând rezultatele obținute ca urmare a experimentărilor cu sarcina $F=10\text{N}$ s-au obținut următoarele concluzii:

- cu creșterea sarcinii de lucru la aceeași viteză de alunecare coeficienții de frecare, după o anumită perioadă de funcționare devin stabili în timp;
- cea mai mare valoare a coeficientului de frecare s-a obținut pentru proba C2, care aparține familiei F1 cu 10 % fibră de nucă de cocos și este de 0,452;
- valoare apropiată acesteia de 0,415 s-a obținut pentru proba C4 care aparține familiei F2 cu 10 % fibră de nucă de cocos;
- probele C1 și C3 au valori de 0,32, respectiv 0,31;
- pentru toate probele testate, coeficientul de frecare se stabilizează în timp, după un anumit interval de testare cuprins între 14000-18000s.

c. Date experimentale pentru sarcina $F = 15\text{N}$

Datele experimentale pentru sarcina $F=15\text{N}$ obținute în fișier text din soft-ul computerului tribometrului au fost importate și prelucrate în programul de calcul EXCEL iar rezultatele sunt prezentate sub forma grafică în fig.5.53-5.56.

Rezultatele determinărilor experimentale cu $F = 10\text{N}$ se prezintă în tabelul 5.16.

Tabelul 5.16. Rezultatele determinărilor experimentale $F = 15\text{N}$

Nr. crt.	Caracteristici	Probe			
		C1	C2	C3	C4
1.	Coeficient de frecare (mediu)	0,30	0,33	0,27	0,39
2.	Pierderea de material Δm , [g]	0,14	0,03	0,10	0,04

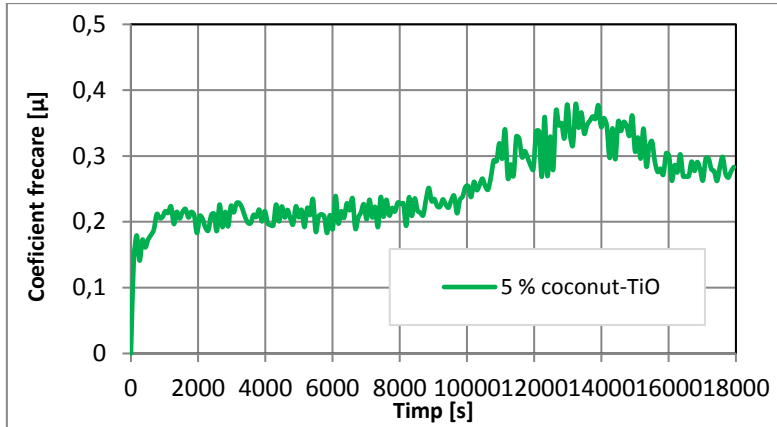


Fig. 5.53 Coeficientul de frecare la încercarea probei C1 cu $F=15N$

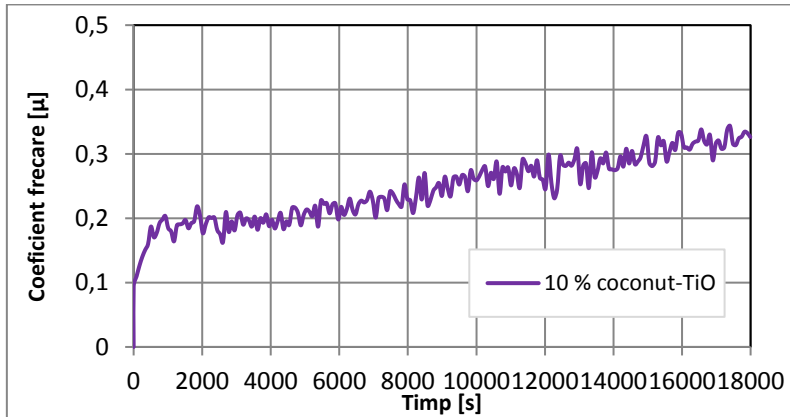


Fig. 5.54 Coeficientul de frecare la încercarea probei C2 cu $F=15N$

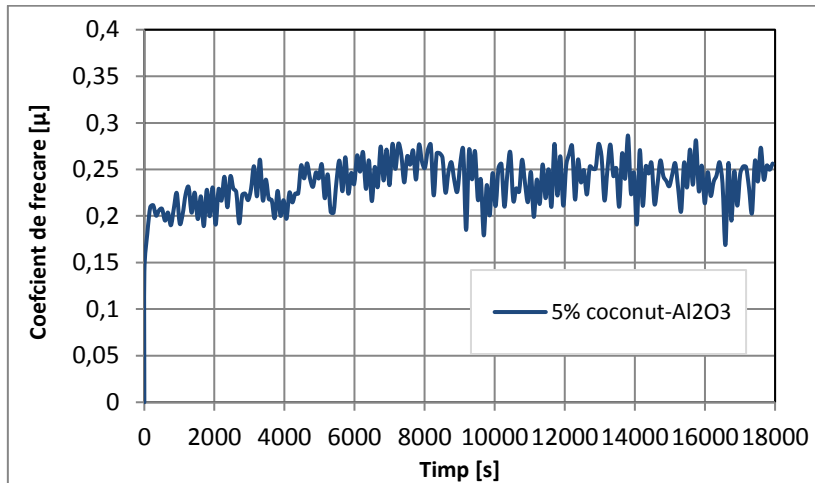


Fig. 5.55 Coeficientul de frecare la încercarea probei C3 cu $F=15N$

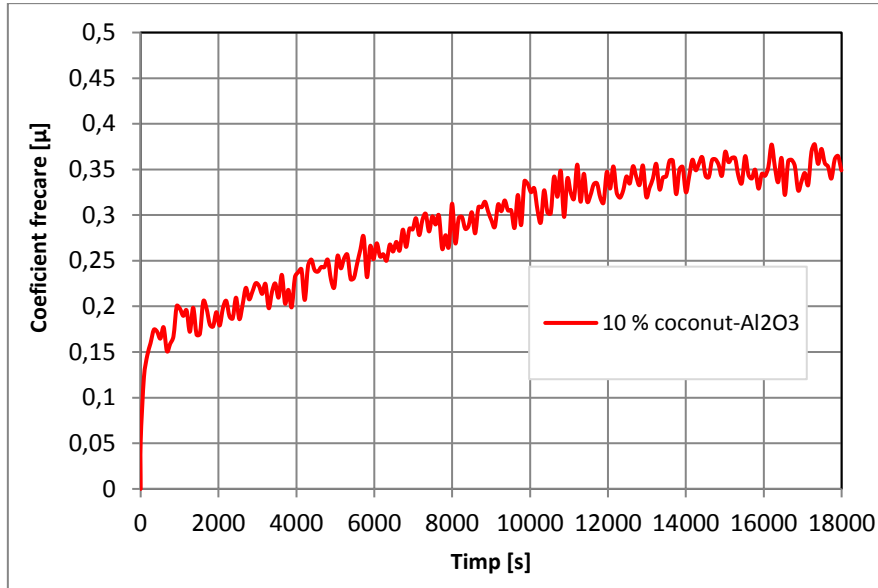
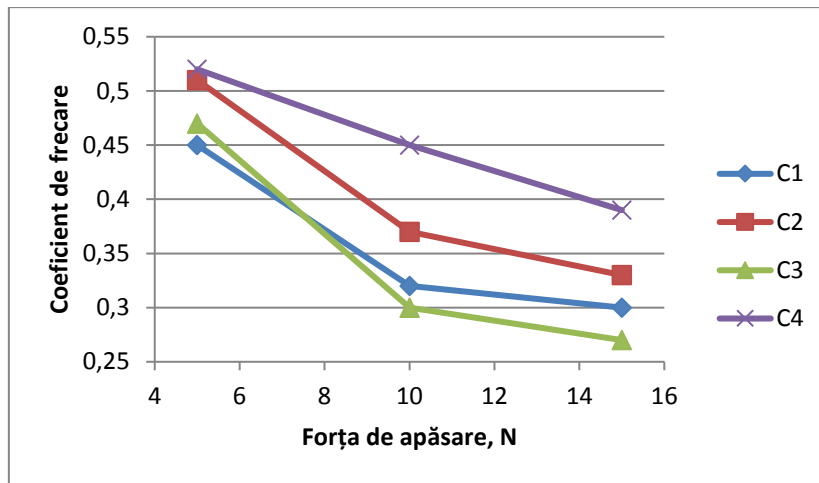


Fig. 5.56 Coeficientul de frecare la încercarea probei C4 cu $F=15N$

Analizând graficele din figurile anterioare se observă că:

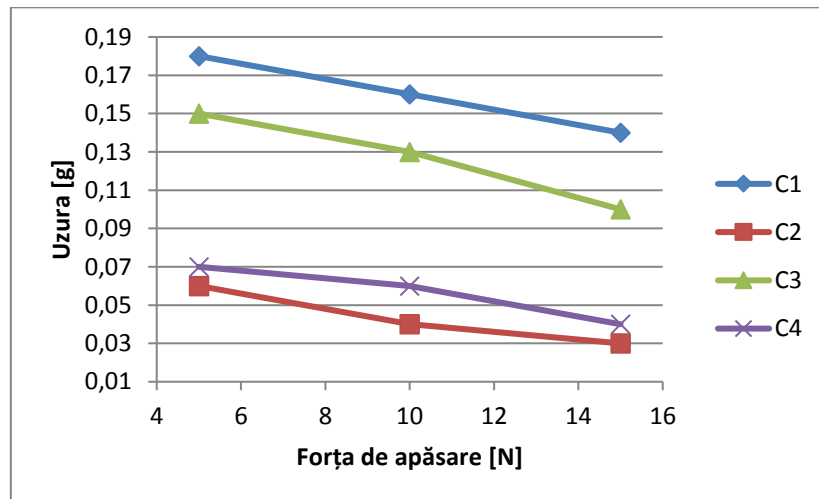
- variația coeficientului de frecare la începutul experimentărilor se explică prin variația suprafeței de contact dintre probele realizate din materialele compozite și bila de oțel, datorită neregularităților suprafețelor aflate în contact [73];
- creșterea suprafeței de contact dintre probele realizate din materialele compozite și bila de oțel, după un anumit interval de timp de la începutul experimentărilor, a dus la creșterea coeficientului de frecare;
- pentru proba C1, coeficientul se stabilizează în jurul valorii de 0,3;
- pentru proba C2, coeficientul de frecare crește de la începutul experimentărilor și după un interval de timp de 16000s și se stabilizează la valoarea de 0,33;
- coeficientul de frecare pentru C3 are fluctuații mari în jurul valorii de 0,27;
- coeficientul de frecare pentru C4 la finalul încercărilor s-a stabilizat în jurul valorii de 0,39;
- pentru toate forțele de apăsare, coeficientul de frecare devine stabil după un interval relativ mare de timp de la începutul experimentărilor, acest lucru fiind confirmat de experimentările de la subcapitolul 5.3 și se explică prin faptul că: temperatura din zona de contact a cuplelor aflate în frecare crește în primii 1500m ai spațiului parcurs și doar apoi începe să scadă; scăderea temperaturii indică o disipare mai mare a căldurii și menținerea la o valoare constantă a coeficientului de frecare [73].

În fig.5.57 s-a studiat influența forței de apăsare asupra coeficientului de frecare, iar în fig.5.58 influența forței de apăsare asupra uzurii probelor.



C1-5% cocos; C2-10% cocos; C3-5% cocos; C4-10 % cocos

Fig.5.57 Influența forței de apăsare asupra coeficientului de frecare pentru cele patru probe



C1-5% cocos; C2-10% cocos; C3-5% cocos; C4-10 %cocos

Fig.5.58 Influența forței de apăsare asupra uzurii celor patru probe

Analizând fig.5.57-5.58 se observă că:

- pentru C1 se observă scăderea cea mai pronunțată a coeficientului de frecare cu creșterea sarcinii;
- la valori mici ale forțelor de apăsare, coeficienții de frecare se încadrează pentru toate materialele compozite între limitele 0,45-0,55;
- coeficienții de frecare scad cu creșterea forței de apăsare;
- uzura scade cu creșterea forței de apăsare.

5.5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Literatura de specialitate precizează valori ale coeficienților de frecare pentru materiale de fricțiune cuprinse într-o gamă destul de largă de valori 0,15 la 0,6, practic, pentru majoritatea vehiculelor valorile nominale ale coeficienților de frecare variază între limitele 0,3-0,6 [26], [36], [48]. În literatura de specialitate se enumeră șase clase de materiale de fricțiune în funcție de capacitățile lor operaționale. Cu cât este mai mare numărul de clasă, cu atât cresc condițiile de exploatare și se impun valori mai mari pentru coeficienții de frecare [26], [36]. Societatea Inginerilor Auto (SAE) a dezvoltat un sistem de identificare (SAE Practica recomandată J866a) care este un ghid pentru atelierele de întreținere și reparații pentru autovehicule, care enumera următoarele coduri și coeficienții de frecare prezentate în tabelul 3.13 [26], [36]:

Aceste coduri limită nu oferă nici o indicație referitor la rezistența la uzură, de asemenea literatura de specialitate afirmă că ele nu pot și nu ar trebui să fie utilizate drept criteriu de selecție unic pentru materialul de fricțiune al plăcuțelor de frână [26], [36]. În acest context, în ultimii ani, valoarea codurilor limită a devenit controversată din punct de vedere a răspunsului sistemului de frânare în condiții de funcționare și a coeficientul de frecare aparent, aceasta datorită faptului că cercetările din domeniu, efectuate de-a lungul timpului, au arătat influența mai multor factori asupra acestuia. Astfel, răspunsul sistemului de frânare în funcționare nu depinde numai de materialul de fricțiune din care sunt realizate plăcuțele de frână, ci depinde și de tehnologia de fabricație a acestuia, de mediul în care rulează autovehiculul, de mecanica sistemului de frânare, precum și ciclurile de lucru la care sunt supuse frânele [26], [36], [48].

Concluziile care se desprind în urma studiului cu privire la comportamentul la frecare și uzură a materialelor compozite produse sunt:

- **fiecare rețetă de material compozit nou produsă trebuie supusă unei serii de teste pentru a evalua proprietățile de frecare și uzură, aceasta datorită faptului că nu există o corelație simplă între proprietățile fizico-mecanice și cele tribologice ale acestor materiale [73], [105], [106], [107];**
- **cunoașterea unor parametri de uzură, a temperaturii în zona de contact a cuplelor de frecare, precum și a evoluției coeficientului de frecare sub diferite valori ale forțelor de apăsare, permite aprecierea durabilității în funcționare a materialelor compozite;**
- **fontele elaborate în laborator se încadrează din punct de vedere al compoziției chimice și a durității în normele ASTM A 159, destinate realizării discurilor de frână pentru autovehicule;**
- **uzura fontei este mai mică decât a materialelor compozite produse după rețetele optimizate în capitolul 5;**
- **pinii realizați din rețetele C2 și C4 prezintă uzură similară, aceste probe având în compoziție 10 % fibră de nucă de cocos;**
- **pentru toate materialele compozite testate, rata de uzură liniară scade cu creșterea vitezei de alunecare;**
- **pentru toate materialele compozite testate, rata de uzură liniară scade cu creșterea forței de apăsare;**
- **cele mai mici valori ale uzurii masice, a ratei de uzură liniară au fost obținute pentru probele C2 și C4;**
- **pentru toți cei patru pini C1-C4, temperatura în zona de contact crește rapid în prima parte a încercării până la parcurgerea**

- distanței de 500 m, iar în intervalul de 500 – 1500 m, se poate spune că începe procesul de stabilizare a temperaturii;*
- *cea mai mare parte a căldurii se disipă în pin care în cupla reală de frecare reprezintă plăcuța de frână;*
 - *cea mai bună comportare din punct de vedere al evoluției câmpului de temperatură o au pinii C2 și C4;*
 - *coeficienții de frecare scad cu creșterea forței de apăsare;*
 - *pentru toate materialele compozite testate, coeficienții de frecare se stabilizează în timp;*
 - *limitele între care se încadrează coeficienții de frecare pentru materialele compozite testate sunt limitele 0,2-0,55;*
 - *cele mai bune caracteristici tribologice le au probele C2 și C4, ambele fiind realizate cu 10% fibră organică; se precizează că C2 face parte din prima familie de materiale compozite produse, care are în rețetă oxid de titan, iar C4 face parte din cea de a doua familie, care are în rețetă oxid de aluminiu;*
 - *proprietățile de frecare și uzură ale materialelor de fricțiune depind de o serie de factori, cum ar fi: presiune, viteza, temperatura în zona de contact, compoziția materialului de fricțiune, durata și lungimea de parcurs [114].*

Contribuții originale din acest capitol sunt:

- *elaborarea în laborator a două șarje de fonte și analiza tehnologică a acestora;*
- *încadrarea fontelor produse conform normelor în vigoare;*
- *determinări experimentale privind evoluția unor parametri de uzură în vederea aprecierii comportamentului tribologic al materialelor produse;*
- *studiul influenței caracteristicilor masice și dimensionale a probelor din materialele compozite produse după rețetele optimizate, asupra unor parametri de uzare;*
- *studiul influenței vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare;*
- *studiul influenței vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare;*
- *analiza evoluției câmpului termic în zona de contact a cuplelor de frecare disc din fontă-pin din material compozit;*
- *analiza evoluției coeficientului de frecare pentru materialele compozite produse după rețetele optimizate;*
- *studiul influenței forței de apăsare asupra coeficientului de frecare și asupra uzurii materialelor compozite organice.*

Partea a-III-a

**Concluzii finale și evidențierea contribuțiilor personale pentru rezolvarea temei de doctorat.
Direcții viitoare de cercetare în domeniul temei**

CAPITOLUL 6

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1. Concluzii finale

Studiul literaturii de specialitate și rezultatele cercetărilor experimentale cu privire la producerea de materiale de fricțiune organice, având ca material de umplutură fibra de nucă de cocos, destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii au condus la următoarele concluzii:

- Sistemul de frânare al autovehiculelor reprezintă elementul primordial în asigurarea siguranței circulației, iar punerea în valoare a performanțelor de viteză și de accelerație ale unui autovehicul depind într-o mare măsură de capacitatea de frânare a acestuia;
- Calitățile sistemului de frânare pot fi asigurate prin utilizarea unor materiale adecvate pentru realizarea componentelor acestuia, utilizarea unor tehnologii moderne de fabricație și întreținerea corectă a ansamblului disc-plăcuță de frână;
- Discurile și plăcuțele de frână sunt cele mai solicitate componente care funcționează împreună și contribuie la siguranța sistemului de frânare;
- Cantitatea mare de căldură care se degajă în timpul frânării contribuie la înrăutățirea calităților de frânare ale autovehiculului și grăbește uzarea plăcuțelor de frână, respectiv a discurilor de frânare;
- În ansamblul autovehiculului, discurile și plăcuțele de frână sunt expuse unor solicitări termo-mecanice mari, motiv pentru care în stabilirea tehnologiei de fabricație a acestora trebuie să se aleagă materialul cel mai adecvat;
- Funcționarea ansamblului disc-plăcuță de frână este influențată de condițiile atmosferice și tipul suprafeței de rulare;
- Principala cerință impusă discurilor și plăcuțelor de frână este de a asigura o disipare cât mai rapidă a căldurii spre mediul exterior;
- La fabricarea plăcuțelor de frână trebuie găsit întotdeauna un compromis între siguranță, confort și eficiență economică;
- În industria constructoare de autovehicule, materialele metalice au ponderea cea mai mare, dar prognozele arată că acestea vor fi înlocuite treptat de materialele compozite care sunt create sintetic pentru a răspunde unor exigențe bine definite;
- În industria autovehiculelor folosirea materialelor compozite conduce la creșterea rezistenței componentelor, concomitent cu scăderea greutateii acestora, ceea ce presupune reducerea consumului de combustibil și creșterea performanțelor autovehiculelor;
- Prioritățile de cercetare din domeniul materialelor compozite sunt reducerea consumului de energie pentru tehnologiile de fabricație, minimizarea impactului asupra mediului și asigurarea necesarului de materiale pentru o populație în curs de dezvoltare;

- La ora actuală analizele, studiile și cercetările experimentale sunt îndreptate spre dezvoltarea materialelor și a tehnologiilor utilizate la fabricarea discurilor și a plăcuțelor de frână;
- La obținerea în laborator a probelor din materialele compozite, factorii care influențează obținerea unui amestec omogen sunt viteza de amestecare, cantitatea de rășină fenolică, ordinea de amestecare a componentilor;
- Obținerea unei probe compacte este influențată de parametrii tehnologiei de sinterizare, de natura și omogenitatea componentilor;
- Pe parcursul experimentărilor au rezultat următoarele observații:
 - ✓ dacă timpul în care se realizează amestecarea constituenților din rețetă este mic, există posibilitatea să nu se realizeze o omogenizare corespunzătoare a acestora;
 - ✓ creșterea exagerată a timpului de amestecare nu duce la îmbunătățirea continuă a omogenității componentilor;
 - ✓ strângerea și presarea exagerată a probelor în matrită duce la acumularea gazelor în centrul probei, aceasta solidificându-se cu un gol de contracție.
- Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor compozite organice depind de următorii factori comportamentul, concentrația, distribuția și orientarea fibrelor materialului de umplutură;
- Îmbunătățirea caracteristicilor materialelor compozite se poate realiza prin modificări ale concentrației componentilor din rețete, precum și prin modificarea parametrilor tehnologiei de sinterizare;
- Corelațiile realizate între rezistența la compresiune și proporția de componente din rețete, prin calcul statistico-matematic, efectuat cu ajutorul programele Excel și Matlab, permit stabilirea rețetelor optime de producere a materialelor compozite;
- Domeniul tehnologic pentru conținutul de aluminiu și fibră de nucă de cocos asigură obținerea celor mai bune caracteristici mecanice de compresiune pentru materialele compozite produse;
- Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor de fricțiune nu pot fi apreciate doar pe baza tipului componentilor utilizați în rețete, ele depind de parametrii procesului tehnologic de sinterizare (durata de amestecare, presiunea și durata de compactare, timpul de răcire până la întărirea ulterioară, temperatura din cuptor, timpul de menținere în cuptor);
- Caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor compozite pot fi utilizate pentru a controla calitatea rețetelor dezvoltate în procesul de sinterizare;
- Densitățile materialelor compozite organice produse după rețetele optimizate scad cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos;
- Scăderea nivelului de porozitate, în apă și în ulei, ca urmare a creșterii legăturii dintre liant și materialul de umplutură a fost determinată de omogenizarea corespunzătoare a componentilor rețetei;
- Duritatea, rezistența la compresiune și modulul de elasticitate longitudinal, cresc cu creșterea cantității de fibră de nucă de cocos;
- Analiza morfologiei suprafețelor probelor obținute după rețetele optimizate arată că nu s-au produs modificări după procesul tehnologic sinterizare în proporția componentilor;
- Integritatea structurală a materialelor compozite produse asigură acestora caracteristici fizico-mecanice superioare;

- Factorii care influențează obținerea unor caracteristici fizico-mecanice superioare pentru materialele compozite produse sunt tipul componentelor aleși în rețete, optimizarea proporției componentelor și parametrii tehnologiei de sinterizare;
- Obținerea unor caracteristici fizico-mecanice superioare pentru probele obținute după rețetele optimizate se datorează omogenizării corespunzătoare a componentelor rețetelor, dimensiunii particulelor de material, distribuției materialului de umplutură prin matrice, existenței unei proporții optime dintre cantitatea de metal și ceilalți constituenți, regimul de încălzire-menținere-răcire și forța de presare;
- Evaluarea proprietăților de frecare și uzură se impune datorită faptului că alegerea celui mai adecvat material de fricțiune nu se poate realiza doar pe baza caracteristicilor fizico-mecanice, datorită faptului că nu există o corelație simplă între proprietățile fizico-mecanice și cele tribologice;
- Cunoașterea unor parametri de uzură, a temperaturii în zona de contact a cuplelor de frecare, precum și a evoluției coeficientului de frecare sub diferite valori ale forțelor de apăsare, permit aprecierea durabilității în funcționare a materialelor compozite;
- Uzura fontei elaborate în laborator (șarja S1) se încadrează din punct de vedere al compoziției chimice și a durității în normele ASTM A 159, putând fi asimilată cu marca G2500;
- Pentru toate materialele compozite testate, rata de uzură liniară scade cu creșterea vitezei de alunecare și crește cu creșterea forței de apăsare;
- Cele mai mici valori ale uzurii masice și a ratei de uzură liniară au fost obținute pentru probele C2 și C4 (ambele fiind realizate cu 10% fibră organică), acestea prezentând un comportament similar;
- La determinarea comportamentului tribologic al materialelor compozite, în varianta disc de fontă și pin din material compozit, cea mai mare parte a căldurii se disipă în pin care în cupla reală de frecare reprezintă plăcuța de frână;
- Pentru toate materialele compozite testate, temperatura în zona de cuple de frecare crește rapid în prima parte a încercării (până la parcurgerea distanței de 500 m); în intervalul de parcurs 500–1500m, temperatura a crescut foarte puțin acesta fiind intervalul în care are loc stabilizarea temperaturii;
- Cea mai bună comportare din punct de vedere a evoluției câmpului de temperatură o au probele C2 și C4, acestea fiind realizate după rețete care conțin 10% fibră organică;
- Din studiul influenței vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare (varianta disc din material compozit și pin din fontă) se observă că rata de uzură liniară scade cu creșterea vitezei de alunecare și cu creșterea forței de apăsare;
- Pentru toate materialele compozite testate, coeficienții de frecare scad cu creșterea forței de apăsare, iar după o anumită perioadă de funcționare se stabilizează în timp;
- Limitele între care se încadrează coeficienții de frecare pentru materialele compozite testate se încadrează în intervalul 0,2-0,55;
- Proprietățile de frecare și uzură ale materialelor de fricțiune depind de forța de apăsare, viteza, temperatura în zona de contact, structura anatomică a materialului de fricțiune, durata și lungimea de parcurs;

- Cele mai bune caracteristici tribologice le au probele C2 și C4, ambele fiind realizate cu 10% fibră organică; se precizează că C2 face parte din prima familie de materiale compozite produse (care are în rețetă oxid de titan), iar C4 face parte din cea de a doua familie (care are în rețetă oxid de aluminiu);
- Din punct de vedere al coeficienților medii de frecare pentru probele C2 și C4, califică aceste materiale în categoria celor care pot fi utilizate în realizarea plăcuțelor de frână pentru autovehiculele mici și performanțe medii, destinate traficului urban;
- Inconvenientul producerii materialelor compozite cercetate în prezenta teză de doctorat este prețul materiei prime relativ mare, nuca de cocos fiind un fruct exotic.

6.2. Contribuții originale

Contribuțiile originale în realizarea tezei de doctorat se regăsesc în toate fazele de elaborare a lucrării și sunt următoarele:

- Studiul literaturii de specialitate cu privire la elementele componente ale sistemului de frânare, factorii care influențează funcționarea ansamblului disc-plăcuță de frână, cerințele care se impun în funcționarea discurilor și a plăcuțelor de frână, importanța utilizării materialelor și a tehnologiilor moderne în fabricarea acestora.
- Sinteza bibliografică cu privire la:
 - ✓ analiza compoziției chimice a fontelor destinate realizării discurilor de frână, cu precizarea influenței elementelor de aliere și a factorilor care influențează turnarea acestora;
 - ✓ evidențierea proprietăților fizico-mecanice ale fontelor și a rolului acestora în asigurarea durabilității în exploatare a discurilor de frână;
 - ✓ elaborarea fontelor pentru discurile de frână în cuptoare cu inducție;
 - ✓ tipologia și elementele componente ale plăcuțelor de frână cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor specifice acestora;
 - ✓ conceptul de material compozit și considerentele tehnice și economice care stau la baza obținerii acestora;
 - ✓ structura, proprietățile, deteriorările posibile, criteriile de apreciere a materialelor compozite și impactul acestora asupra mediului înconjurător;
 - ✓ defectele posibile ale discurilor și plăcuțelor de frână;
 - ✓ evoluția materialelor destinate fabricării discurilor și plăcuțelor de frână.
- Proiectarea a două matrițe pentru realizarea probelor disc și cilindrice (pin) din materialele compozite dezvoltate și îmbunătățirea soluției constructive a matriței pentru producerea probelor disc;
- Analiza proprietăților individuale a componentelor din rețete;
- Stabilirea componenței celor 20 de rețete pentru materialele compozite produse în laborator;
- Stabilirea succesiunii de realizare a procesului tehnologic de sinterizare a materialelor compozite, determinarea caracteristicilor fizico-mecanice ale acestora și analiza critică a rezultatelor obținute;
- Producerea a 15 probe cu concentrații variabile de aluminiu (6-25%) și fibră de nucleu de cocos (0-19%) și determinarea rezistenței mecanice la

compresiune în vederea obținerii datelor necesare optimizării rețetelor prin calcul statistico-matematic;

- Prelucrarea datelor în programele de calcul Excel și Matlab, în vederea stabilirii domeniului tehnologic pentru compoziția rețetelor;
- Stabilirea domeniului tehnologic pentru concentrația de aluminiu și fibră de nucă de cocos care a dus la îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice;
- Formularea, definitivarea și stabilirea rețetelor optimizate;
- Modificarea tehnologiei de sinterizare a materialelor compozite după rețetele optimizate și obținerea în laborator a acestora;
- Determinarea caracteristicilor fizico-mecanice și studiul morfologiei suprafețelor;
- Analiza comparativă a caracteristicilor fizico-mecanice a materialele compozite obținute în cele două variante de rețete (inițială și optimizată);
- Elaborarea, în laborator, a două șarje de fonte necesare determinării caracteristicilor tribologice a materialelor compozite și analiza tehnologică a acestora în concordanță cu standardele în vigoare;
- Determinări experimentale privind evoluția unor parametri de uzură în vederea aprecierii comportamentului tribologic al materialelor produse;
- Studiul influenței caracteristicilor masice și dimensionale a epruvetelor realizate din materialele compozite produse după rețetele optimizate asupra unor parametri de uzare;
- Studiul influenței vitezei și a forței de apăsare asupra parametrilor de uzare;
- Analiza evoluției câmpului termic în zona de contact a cuplurilor de frecare (fontă-material compozit, respectiv material compozit-fontă);
- Analiza evoluției uzurii și a coeficientului de frecare sub acțiunea diferitelor forțe de încărcare;
- Rezultatele obținute în această lucrare califică fibra de nucă de cocos ca material de umplură pentru materialele compozite destinate realizării plăcuțelor de frână pentru autovehiculele de dimensiuni mici și performanțe medii.

Pe baza cercetărilor efectuate s-au stabilit ca variante optime pentru materialele compozite utilizate pentru producerea plăcuțelor de frână, rețetele C2 și C4, ambele realizate cu 10 % fibră organică, acestea întrunind cele mai bune caracteristici fizico-mecanice și tribologice.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele și concluziile obținute impun o dezvoltare viitoare a cercetării în următoarele direcții:

- *testarea tribologică a materialelor compozite la viteze de alunecare și forțe de încărcare mai mari decât cele folosite în acest studiu;*
- *evidențierea proceselor de uzură care apar în stratul superficial al probelor analizate;*
- *extinderea cercetărilor privind caracteristicile mecanice;*
- *studiul fenomenului de oboseală termică care apare în timpul funcționării la contactul dintre discurile și plăcuțele de frână;*
- *testarea performanțelor de frânare conform normelor ECE R 90;*
- *dezvoltarea metodelor experimentale de caracterizare a materialelor compozite, analiza tensiunilor și a defectelor;*
- *aprecierea durabilității, a ciclului de viață și a modului de apariție a defectelor;*

- dezvoltarea unui sistem de producere a plăcuțelor de frână la scară industrială,
- identificarea unei legi de comportare care să descrie comportamentul mecanic al materialelor compozite studiate;
- implementarea legii de comportare a compozitelor studiate și conceperea unui model de deformare a materialului utilizând Metoda Elementelor Finite;
- utilizarea altor tipuri de fibre organice, avantajoase din punct de vedere economic sau a unei combinații de fibre (in, rapiță, trestie) în producerea materialelor de fricțiune.

Ca orice cercetare dezvoltată pe o temă dată, nu se poate spune că se finalizează la un moment dat, pentru că evoluția în domeniul plăcuțelor de frână, deschide permanent oportunități de dezvoltare și aprofundare, cu reluare sau prin impunere de noi tehnici de lucru.

Bibliografie

- [1] <http://www.unitbv.ro/Portals/31/Sustineri%20de%20doctorat/Rezumate/GheorghitaViorel.pdf>
- [2] http://www.unitbv.ro/Portals/31/Sustineri%20de%20doctorat/Rezumate/GheorghitaVasile_v2.pdf
- [3] www.fonduri-ue.ro
- [4] http://www.upt.ro/img/files/uefiscdi/PN-II-ID-PCE-2012-4-0104/Raport%20stiintific_2016.pdf
- [5] R. Ș. Ionescu, A. Chiru, A. Roșescu, *Sistemele de frânare ale automobilelor. Situația actuală și perspective*, Buletinul AGIR nr. 1/2014, ianuarie-martie, pp.19-24, <http://www.agir.ro/buletine/1953.pdf>
- [6] O. I. Nicolae, *Impactul materialelor compozite utilizate în construcții asupra mediului*, Teză de doctorat, București, 2013, http://sd.utcb.ro/_upload/content/docs/267_nicolae_olimpia-iuliana_-_rezumat_ro.pdf
- [7] Brembo, *Il manual del disco freno*, Capítulo 2, 1997
- [8] **A.L.Crăciun**, *Evolution of materials for motor vehicles brake discs*, International Journal of Engineering, Tom XIII, Fas.3, p. 149-154, 2015
- [9] T.J.Mackin, *Thermal cracking in disc brakes*, Engineering Failure Analysis, February, vol. 9, nr. 1, 63-76(14), 2002
- [10] Șt.Voloancă, Ghe. Frățilă, *Cercetări privind solicitările termice ale mecanismului de frânare și influența lor asupra siguranței circulației*, <http://www.agir.ro/buletine/2080.pdf>
- [11] V. Mateescu, L.Popa, *Performanțele automobilelor*, Editura Printech, București, 2000.
- [12] www.textar.com, *Evaluarea erorilor plăcuțelor frânei cu disc și a discurilor de frână*. Inf. teh.
- [13] O. Maluf, M. Angeloni, M.T. Milan, D. Spinelli, W.W.F. Filho, *Development of materials for automotive disc brakes*, Pesquisa e Tecnológica Minerva 4(2), pp.149-158
- [14] Lanchester, F. W. *Improvements in the brake mechanism of power-propelled road vehicles*. G. B. Patent No. 26407.1902
- [15] <https://www.4tuning.ro/istorie-auto/istoria-franelor-auto-de-la-par-si-piele-de-camila-la-discuri-de-carbon-26107.html>
- [16] T. P. Newcomb, R.T. Spurr, *A technical history of the motor car*, New York: Adam Hilger, 1989
- [17] discuridefrana.blogspot.ro/2011/05/discuri-de-frana.html
- [18] Linder, A., DukicT., Hjort, M, *Methods for the evaluation of traffic safety effects of Antilock Braking System (ABS) and Electronic Stability Control (ESC)*, VTI Rapport, 58:12, 2007
- [19] I.Ripoșan, M.Chișamera, *Tehnologia elaborării și turnării fontei*, Ed. Did. și Ped., București, 1981
- [20] L.Sofroni, I. Ripoșan, V. Brabie, M. Chișamera, *Turnarea fontei*, Ed. Didactică și Pedagogică, 1985
- [21] L. Sofroni, D. M. Ștefănescu, *Fonte modificate cu proprietăți superioare*, Ed. Tehnică, București, 1971
- [22] I.G. Grișcovici, *Turnarea fontei*, Editura Tehnică, 1952
- [23] V.Cojocar, C. Filipiu, *Pregătirea încărcăturii pentru elaborarea fontei în cuptoare cu inducție*, Ed. Samia, Iasi, 2006.

- [24] L. Pascu, *Cercetări privind îmbunătățirea calității saboților de frână destinați materialului rulant*, Teză de doctorat, 2014, Timișoara, www.library.upt.ro/pub.edocs/rezumatel/.../REZUMAT%20%20TEZA%20PASCU.doc
- [25] A. Aloman, ș.a., *Tratat de știința și ingineria materialelor metalice*, vol.I, Ed. AGIR 2006
- [26] Y.Jimbo, T.Mibe, K Akiyama, H. Matsui, M.Yoshida, A.Ozawa, *SAE International*. SAE 900002, 1990. p. 22
- [27] M. Milan, O. Maluf, D.Spinelli, F. Bose, *Metais uma visão objetiva*. São Carlos, Brasil: Ed. Suprema. 2004
- [28] T. Okamoto, A. Kagawa, K. Kamei, H. Matsumoto, *Effects of graphite shape on thermal conductivity, electrical resistivity, damping capacity and Young's Modulus of cast iron below 500 deg. C*. Journal of the Japanese Foundrymen's Society, vol. 55, p. 32-36, 1983
- [29] R.L. Hecht, R.B Dinwiddie, W. Porter, H. Wang, *SAE Technical Paper Series 962126*. 1996
- [30] S.Yamada, T. Kuricuma, *Proceedings form 1998 FISITA World Automotive Congress*. Paris, Sep.-Oct. 1998
- [31] D. Fitzgeorge, J.A. Pope, *Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders*, v. 75, p. 284, 1959
- [32] J. Omerod, R.E. Taylor, E.J. Eduards, *Met. Tech.*, p. 109, abr. 1978.
- [33] M. Cho, S. J. Kim, R.H Baskh, J.W. Fashk, H. Jang, *Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: the effect of rotor microstructure*, Tribology International, vol. 36, p. 537-545, 2003
- [34] S.K. Rhee, P.A. Thesie, *Effects of surface roughness of brake drum on coefficient of friction and lining wear*. SAE Technical Papers, no.720449, 1972.
- [35] T. A. Libsch, S.K. Rhee, *The effects of compositional variations in heavy truck rotors upon rotor and pad wear*, Wear of Materials, v. 34, p. 350, 1979
- [36] A. E., Anderson, *Friction and wear of automotive brakes*, Materials Park, OH. ASM Handbook, vol. 18, 1992
- [37] Y.Zhang, Y. Chen, R. He, B. Shen, *Investigation of tribological properties of brake shoe materials- phosphorous cast irons with different graphite morphologies*. Wear, 1993. v. 166, p. 179-186.
- [38] Norme ASTM A 159- *Standard Specification for Automotive Gray Iron Castings*, <http://www.iron-foundry.com/a159-automotive-gray-iron-castings.html>
- [39] H. Metzler, *The brake rotor-friction partner of brake linings*. SAE Technical Papers, no. 900847, 1990
- [40] T Sasaki, *Development for disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength*,JSAE Review, v. 23, p. 105-112, 2002
- [41] J.Yamabe, M.Takagi,T. Matsui, T. Kimura, M. Sasaki, *Development for disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength*, JSAE Review, v. 23, p. 105-112, 2002
- [42] H. Sakamoto. et al. *Heavy-duty brake disk for high speed trains* (in Japanese with English summary). Technical Report of Sumitomo Metal Industries, Ltd., v. 45, n. 6, p. 11-29, 1993.
- [43] V.Teleabă, *Tehnologie ecologică pentru obținerea de materiale compozite avansate pentru aviație*
- [44]<http://www.compositesworld.com/zones/composites/resin-infusion-artmartm.aspx>
- [45]<http://www.autosaga.ro/lectia-auto/placute-de-frana-functionare-si-tipuri-de-placute-frana-sport-ceramice-organice-metalice.html>

- [46] C. Dumitraș, C. Opran, *Prelucrarea materialelor compozite, ceramice și minerale*, Ed. Tehnică, București, 1994.
- [47] Principiile dezvoltării durabile, adoptate în 2005 în cadrul strategiei Lisabona
- [48] P.J. Blau, *Compositions, functions and testing of friction brake materials and their additives*, Metals and Ceramics Division, August 2001
- [49] Nicholson, *Facts About Friction*, P&W Price Enterprises, Inc., Croydon, PA, 1995
- [50] M. Eriksson and S. Jacobson, *Tribological surfaces of organic brake pads*, *Tribol. Intern.*, 33, pp. 817-827, 2000
- [51] N. A. Hooton, *Metal-Ceramic Composites in High-Energy Friction Applications*, *Bendix Technical Journal*, Spring 1969, pp. 55-61, 1969
- [52] H. Jang and S. J. Kim, *The effects of antimony trisulfide and zirconium silicate in the automotive brake friction material on friction characteristics*, *Wear*, 239, p. 229-236, 2000
- [53] R. T. Spurr, *Fillers in Friction Materials*, *Wear*, 22, p. 367-409, 1972
- [54] PQ Corporation, *Extendspheres® product literature*, Valley Forge, PA, 1993
- [55] Hoeganaes Corporation, *Friction Powder Grades*, Product literature, Riverton, NJ, 1990
- [56] L. Gudmand-Hoyer, A. Bach, G. T. Neilsen, and Per Morgan, *Tribological properties of automotive disc brakes with solid lubricants*, *Wear*, 232, pp. 168-175, 1999
- [57] S. K. Rhee, *Wear Mechanisms for Asbestos-Reinforced Automotive Friction Materials*, *Wear*, 29, pp. 391-393, 1974
- [58] Sloss Industries Corp. "PMF® Fiber, The Preferred Reinforcement in Friction Products," product literature, Birmingham, AL, (no year)
- [59] K.-C. Gong, Y. C. Cheng, and Y.-Y. Huang, *The High temperature Resistance of Polymeric Brake Composites*, ASME Wear of Materials Conference Proc., ASME, New York, p. 765-770, 1985
- [60] Y. T. Tatarzicki and R. T. Webb, *Friction and Wear of Aircraft Brakes*, ASM Handbook, Vol.18, ASM International, Materials Park, Ohio, pp. 582-587, 1992
- [61] Borden Packing and Industrial Products, Inc., *Literature on modified resin products*, Louisville, KY, 1994
- [62] A. E. Anderson, *Wear of Brake Materials*, in *Wear Control Handbook*, ASME, pp. 843-857, 1980
- [63] http://www.linkeng.com/sites/default/files/files/SAE_J2975-J866_environmental_and_friction_marking_01_09_2013.pdf
- [64]. **A.L. Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, *Advanced materials with natural fibred reinforced aluminium composite for automotive brake disc*, *Solid State Phenomena*, 254, pp.91-96, 2016
- [65]. **A.L. Crăciun**, T. Heput, C. Pinca-Bretotean, *Formulation of materials with natural fiber for brake system components*, *International Journal of Engineering*, XIV (3), 2016
- [66]. **A. L. Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, D. Uțu, A. Josan, *Tribological properties of nonasbestos brake pad material by using coconut fiber*, *International Conference on Applied Sciences ICAS 2016*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **163** 0124014, pp. 1-9
- [67] Ref. La URL-ul site <http://www.babcox.com/cm/cm99628.htm>
- [68] R. Vijay, J. M. Jeas, M.A. Saibalaji and V. Thiyagarajan, *Optimization of Tribological Properties of Nonasbestos Brake Pad Material by Using Steel Wool*, *Advances in Tribology* **2013** 165859
- [69] M. Weintraub, Brake additives consultant. Private communication, 1998
- [70] O. M. Terciu, I. Curtu, C. Cerbu, M. D. Stanciu, *Testarea la tracțiune a materialelor compozite lignocelulozice cu aplicații în industria autovehiculelor*,

- Buletinul AGIR nr. 1/2012, ian.-mart., pp.40-44
<http://www.agir.ro/buletine/1247.pdf>
- [71]. **A.L. Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, C. Birtok-Băneasă, A. Josan, *Composites materials for friction and braking applications*, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, **200(1)**, art. no. 012009, 2016, September 2017
- [72]M.A. Maleque, S. Dyuti, M.M. Rahman, *Material selection method in design of automotive brake disc*, Proceedings of the World Congress on Engineering ,Vol III, 2010, London UK
- [73]T. R. Jaafar, M.S. Selamat, R Kasiran, *Selection of best formulation for semi-metallic brake friction materials development*, www.intechopen.com
- [74] **A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, *Aspects regarding manufacturing technologies of composite materials for brake pad application*, IOP Conf. Ser.:Mater. Sci.Eng.**294** 012003, pp. 1-9
- [75] P.Gopal, L.R.Dharani, F. D. Blum, *Load, speed and temperature sensitivities of a carbon-fiber-reinforced phenolic friction material*, *Wear*, 181-183(2), 913-921,1995
- [76]. https://ro.wikipedia.org/wiki/Oxid_de_aluminiu
- [77]. <https://ro.wikipedia.org/wiki/Sulf>
- [78]. <http://www.scribub.com/tehnica-mecanica/Structuri-compozite-aplicatie-i73163.php>
- [79] M.A. Maleque, A. Atiqah, R.J. Talib ,H. Zahurin, *New natural fibre reinforced aluminium composite for automotive brake pad*, International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), Vol. 7 (2012), No. 2, 166-170.
- [80] <https://ro.wikipedia.org/wiki/Densitate>
- [81] M. Sutikno , P. Marwoto, S. Rustad, *The mechanical properties of carbonized coconut char powder-based friction materials*, www.elsevier.com/locate/carbon 48(2010) pp.3616-3620
- [82] S. S. Lawal, K. C. Bala, and A. T. Alegbede, *Development and production of brake pad from sawdust composite*, Leonardo Journal of Sciences, 30, pp.47-56, 2017
- [83] I.O. Adeyemi , N. Ademoh, O. M. Okechukwu, *Development and Assessment of Composite Brake Pad Using Pulverized Cocoa Beans Shells filler*, International Journal of Materials Science and Applications, 5(2): pp.66-78, 2016
- [84] S.M. Sapuan, M. Harimi, M. A. Maleque, *Mechanical properties of epoxy/ coconut shell filler particle composites*, Arabian Journal for Science and Engineering, 28(2B), pp.171-181, 2003
- [85] C. Alic, *Bazele cercetării experimentale. Elemente de teorie și aplicații*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2001
- [86] E.Cicală, *Metode de prelucrare statistică a datelor*, Ed. Politehnica Timișoara, 1999
- [87] F. Weber, *Rezistența materialelor. Lucrări de laborator*, Ed. Mirton Timișoara, 2000
- [88] EN ISO 6508:2016- Rockwell hardness test- Part 1, Test method
- [89] I. Curtu, A.E.Stanciu, *Determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor realizate din material compozit tip Mat-Roving*, Buletin AGIR 1/2011, pp.76-81, <http://www.agir.ro/buletine/961.pdf>
- [90]https://www.dcu.ie/sites/default/files/mechanical_engineering/images/Zwick_universal_tester_chap_1&_2_%20intro.pdf
- [91] **A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, *Mechanical testing of composite materials with organic fibres for automotive btake pads*, Internat. Journal of Eng. Vol.X , pp.111-114, Nov.2017

- [92] J. Feist, *Tribological Investigation on Automotive Disc Brakes*, MANE – 6960 Friction Wear and Lubrication, 2013
- [93] E.Cicală, *Metode de prelucrare statistică a datelor*, Ed. Politehnica Timișoara, 1999
- [94] A.Josan, *Durabilitatea cilindrilor de laminare turnați din oțel Adamit*, Ed. Mirton Timișoara, 2005
- [95] Y.Sasaki, *Development philosophy of friction materials for automobile disc brakes*, The eight international Pacific Conference on automobile engineering, Society of Automobile Engineers of Japan, pp. 407-412, 1985
- [96] M. Asif, K.Chandra, P.S.Misra, *Development of aluminium based hybrid metal matrix composites for heavy duty applications*, Journal of minerlas & Materials characterization & Engineering, Vol.10, No.14, pp.1337-1344, 2011
- [97] O. Afiquah, L.Fauziana, O. Rasid, S. V. Wong, *Elemental Composition Study of Commercial Brake Pads for a Passenger Vehicle: A Case Study*, Recent Advances in Mechanics and Mechanical Engineering, pp.29-34
- [98] J.Todorovic, *Modelling of the tribological properties of friction materials used in motor vehicles brakes.*, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. C 226, pp. 911-916, 1987
- [99] P.Filip, L.Kovarik, M.A.Wright, *Automotive brake lining chracterization*, Proceeding of the 8th international pacific conference on automobile engineering, pp. 417-422. Yokohama: Society of Automobile Engineers of Japan, pp. 34-422, 1995
- [100] R.J.Talib, M.S. Shaari,W.M. Ibrahim, S. Kemin & R.Kasiran, *Properties Enhancement of Indigenously Developed Brake Pad for Light Rail Transit*, In: Brake Friction Materials, pp. 79-86, Shah Alam, Upena, Malaysia, 2006
- [101] M.H.Cho,J. Ju, S.J. Kim, H. Jang, *Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials*, Wear 260, pp.855-895, 2006
- [102] Z.Weiss, J.C.Crelling, G.S.Martynkova, M.Valaskova, P.Filip, *Identification of carbon forms and other phases in automotive brake composites using multiple analytical techniques*, Carbon, vol. 44:792-8, 2006
- [103] R.O.Edokpia, V.S. Aigbodion, O.B. Obiorah, C.U.Atuanya, *Evaluation of the Properties of Ecofriendly Brake Pad Using Egg Shell Particles–Gum Arabic*, ScienceDirect, Elsevier. B. V. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.06.003
- [104] A. Ademoh, Nuhu, I.Adeyemi I. Olabisi, *Development and Evaluation of Maize Husks (Asbestos-Free) Based Brake Pad*, International Institute for Science, Technology and Education (IISTE): Industrial Engineering Letters -IEL. Vol. 5, No. 2, pp. 67-80, 2015
- [105] K. Tanaka, S. Ueda & N. Noguchi, *Fundamental studies on the brake friction of resin-based friction materials*, Wear, Vol. 23, pp. 349-365, 1973
- [106] J. Todorovic, *Modelling of the tribological properties of friction materials used in motor vehicles brakes*, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. C 226, pp. 911-916, 1987
- [107] S. M.Hsu, M.C.Shen & A.W.Ruff, *Wear prediction for metals*, Tribology International 30, pp. 377-383, 1997
- [108] O.Maluf, M.Angeloni, DBV.Castro, W.Bose Filho, D.Spinelli, C.O.Ruckert, *Effect of alloying elements on thermal diffisivit of gray cast iron used in automotive brake disc*, Journal of materials engineering and performance,18 (7), pp.980-984, 2009
- [109] I.M. Masoud, J.A.Al-Jarrah and T. Abu Mansour, *Manufacturing of Gray Cast Iron Automotive*, Indian Journal of applied research, 4(3), ISSN 2249-555X, 129-131, 2014
- [110] G. Cueva, A. Sinatora, W.L. Guessser, A.P. Tschiptschin, *Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors*, Wear 255, pp. 1256-1260, 2003

- [111] L. Maftei, *Contribuții la studiul comportării tribologice a compozitelor cu poliamidă și microsferă de sticlă*, teză de doctorat Universitatea "Dunărea de Jos" Galați, 2010,
https://www.arthra.ugal.ro/bitstream/.../Rezumat_Teza_Maftei_Laura_2010.pdf?
- [112] **A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, *Aspects regarding the evolution of temperature in the automotive brake pad using infrared thermography*, Internat. Journal of Eng. Vol.14(4), pp. 103-106, 2016
- [113] **A.L.Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, D. Uțu, Josan A, *Experimental analysis of tribological behavior of organic composites materials*, AMS 2018, în curs de apariție
- [114] J.Todorovic, *Modelling of the tribological properties of friction materials used in motor vehicles brakes*, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. C 226, pp. 911-916, 1987

DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

1. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate ISI Proceedings

1. **A.L. Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, D. Uțu, A. Josan, "Tribological properties of nonasbestos brake pad material by using coconut fiber", International Conference on Applied Sciences ICAS 2016), IOP Conf. Ser.:Mater. Sci.Eng. **163** 0124014, pp.1-9,
doi: 10.1088/1757-899X/163/1/012014, **WoS:** 000399755300014
2. **A.L. Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, C. Birtok-Băneasă, A. Josan, "Composite materials for friction and braking application" **IOP. Conf Science:Mat. Science and Eng.**, Vol. 200(1), art. no. 012009, , September 2017, **doi:** 10.1088/1757-899X/200/1012009, **WoS:**000419288800009
3. C. Birtok-Băneasă, S.A. Rațiu, V. Alexa, **A.L.Crăciun**, A. Josan, A. Budiul-Bergian, "Reducing emission by special air filters for internal combustion engines" **IOP. Conf Science:Mat. Science and Eng.**Mat. Science and Eng. Vol. 200 (1), art. no. 012011, September 2017, **doi:** 10.1088/1757-899X/200/101201, **WoS:**000419288800011

2. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI

1. **A.L. Crăciun**, "Evolution of materials for motor vehicles brake discs", Internat. Journal of Eng. Vol.13 (Issue. 3), pp. 149-154, August 2015, <http://annals.fih.upt.ro/>, **Ebsco**
2. **A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, "Experimental installation use in testing of composite materials for braking system components", Internat. Journal of Eng. Vol. 14 (Issue 3), pp. 243-250, August 2016, <http://annals.fih.upt.ro/>, **Google Academic**
3. **A.L. Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, "Formulation of materials with natural fiber for brake system components", Internat. Journal of Eng. Vol.14 (Issue. 3), pp. 17-20, August 2016, <http://annals.fih.upt.ro/>, **Google Academic**
4. **A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, "Aspects regarding the evolution of temperature in the automotive brake pad using infrared thermography", Internat. Journal of Eng. Vol.14 (Issue 4), pp. 103-106, August 2016, <http://annals.fih.upt.ro/>, **Google Academic**

5. **A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, "Mechanical testing of composite materials with organic fibres for automotive brake pads", Internat. Journal of Eng. Vol.10 (Issue 4), pp. 111-114, Octombrie 2017, <http://annals.fih.upt.ro/>, **Google Academic**

3. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate BDI

1.**A.L. Crăciun**, C. Pinca-Bretotean, „Advanced materials with natural fibred reinforced aluminiu composite for automotive brake disc”, , Switerland Solid State Phenomena, Ed. Trans Tech Publications, vol 254, pp. 91-97, August 2016, **doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.254.91**, (**Scopus**)

2.**A.L.Crăciun**, T. Hepuț, C. Pinca-Bretotean, "Aspects regarding manufacturing technologies of composite materials for brake pad application", International Conference on Applied Sciences ICAS 2017), Hunedoara, IOP Conf. Ser.:Mater. Sci.Eng.**294** 012003, pp.1-9, (**Scopus**)

doi:10.1088/1757-899X/294/1/012003-în curs de indexare ISI

3.**A.L. Crăciun, C Pinca-Bretotean, ID Utu and A Josan**, Experimental analysis of tribological behavior of organic composites materials, 7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (AMS), 28-31 martie, Timișoara- *în curs de apariție*

4. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

1.**A.L.Crăciun**, "Composite materials for automotive brake", Ed. A-13-a "47 de ani de învățământ superior hunedorean ", mai, 2017

2.**A.L.Crăciun**, C.Pinca-Bretotean, T. Hepuț, A. Josan, "Characterization of composite materials reinforced with coconut fibers used for automotive brake pads" The40th International Conference on Mechanics of Solids, Acoustics and Vibrations &The 6th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering, COMAT 2016&ICMSAV 2016, Brașov, Romania, 24-25, Noiembrie, 2016, pp. 55-60

ANEXE

Anexa 1

**Experimenări preliminare efectuate pentru rețetele prezentate în
tabelul 4.2
(P5, P6, P11, P12)**

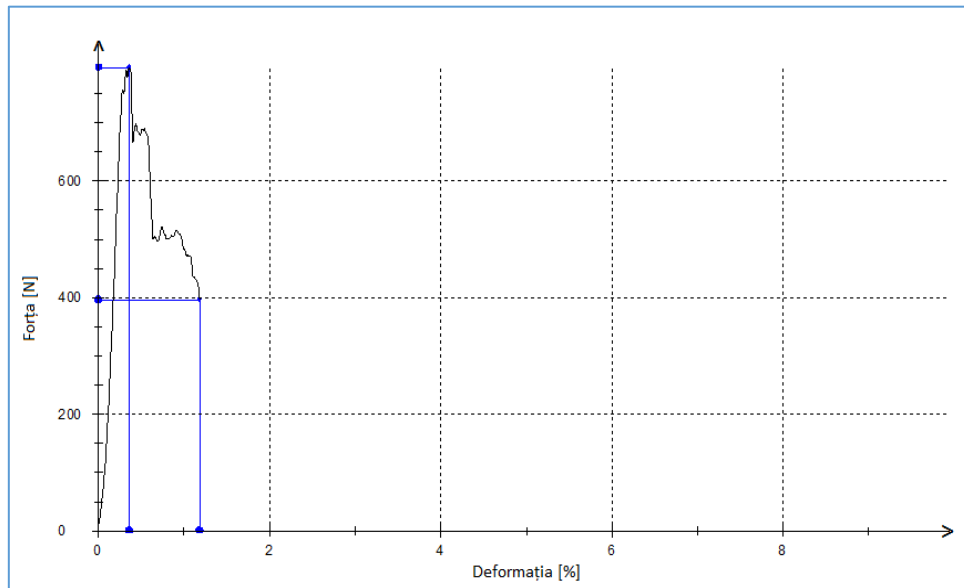


Fig.A.1.1 Dependența forță - deformație pentru rețeta P5, tabel 4.1, (proba 1)

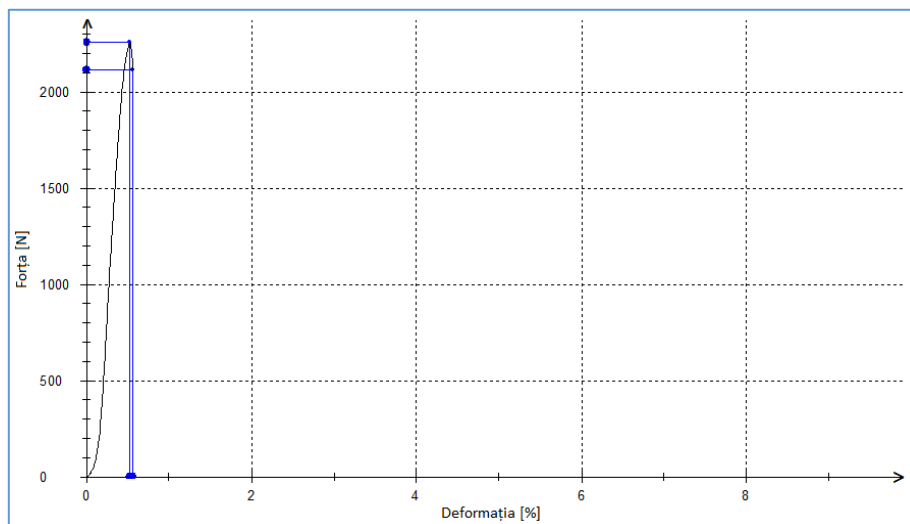


Fig.A.1.2 Dependența forță - deformație pentru rețeta P5, tabel 4.1 (proba 2)

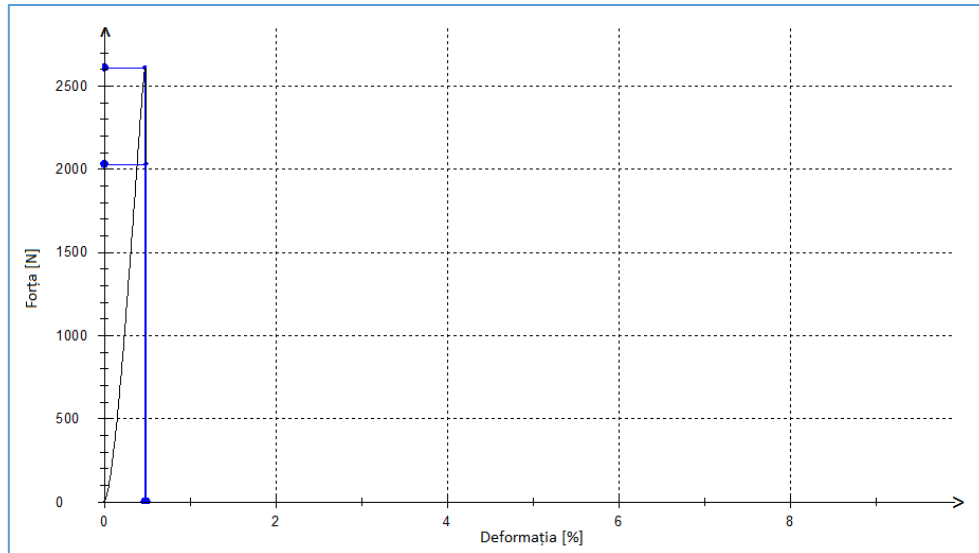


Fig.A.1.3 Dependența forță - deformație pentru rețeta P6, tabel 4.1 (proba 1)

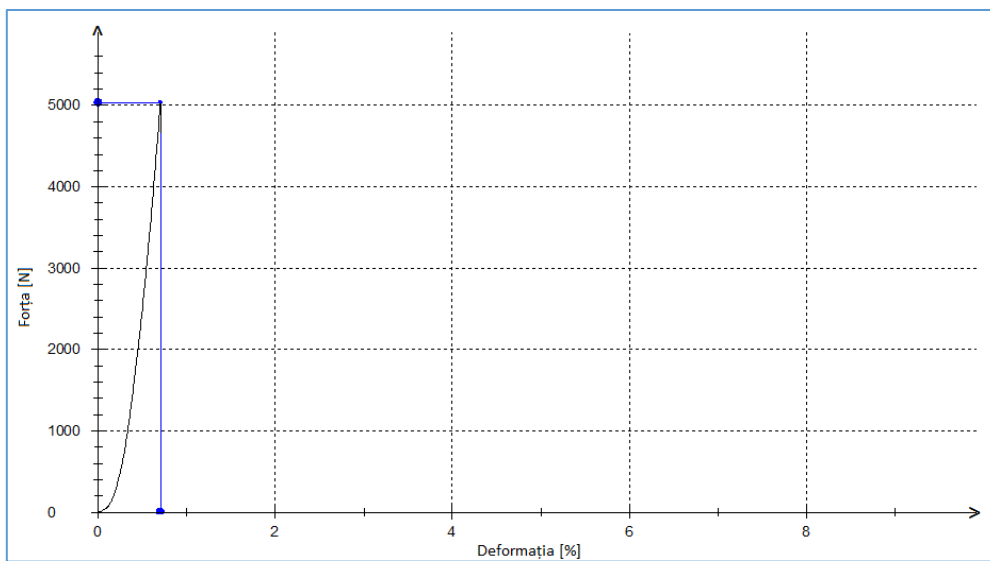


Fig.A.1.4 Dependența forță - deformație rețeta P6, tabel 4.1 (proba 2)

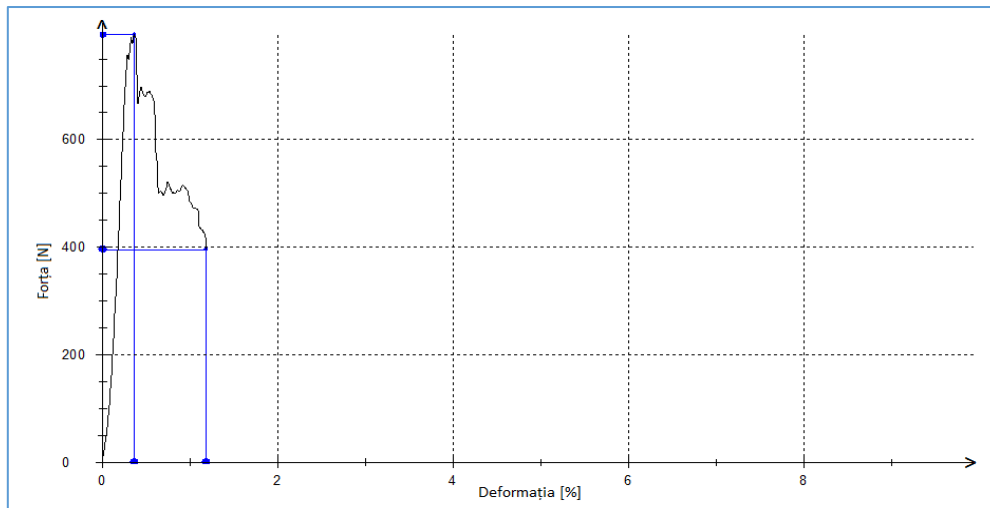


Fig.A.1.5 Dependența forță deformație pentru rețeta P11, tabel 4.2 (proba 1)

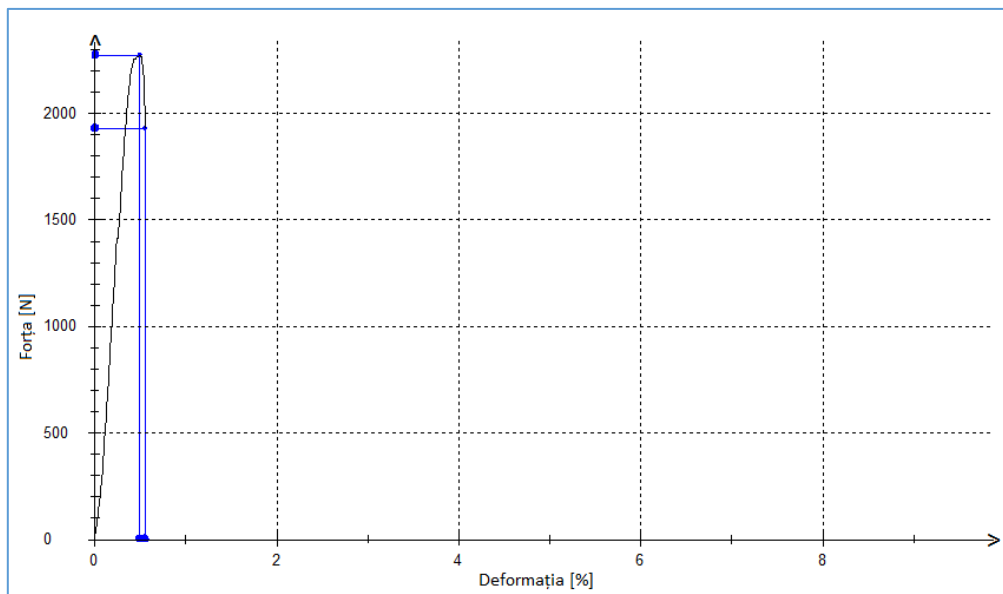


Fig.A.1.6 Dependența forță deformație pentru rețeta P11, tabel 4.2 (proba 2)

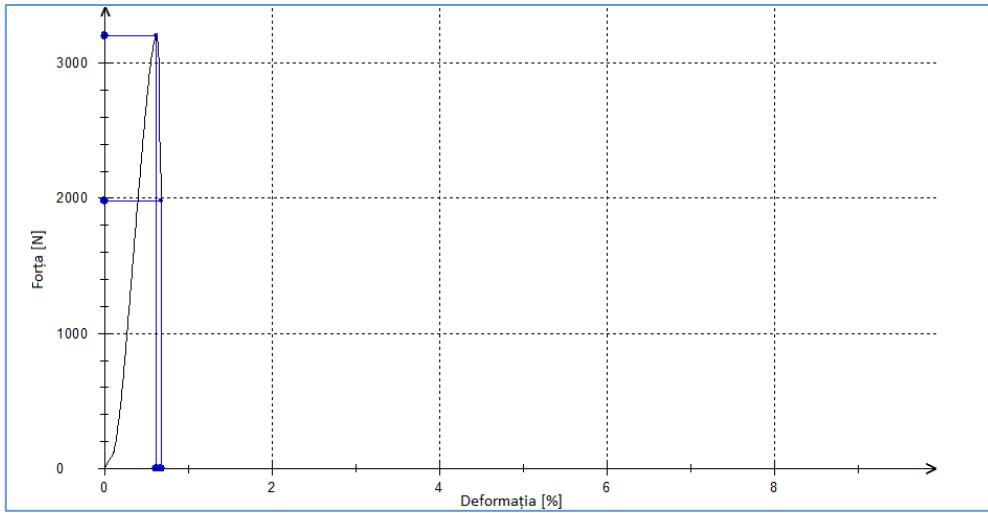


Fig.A.1.7 Dependența forță deformație pentru rețeta P12, tabel 4.2 (proba 1)

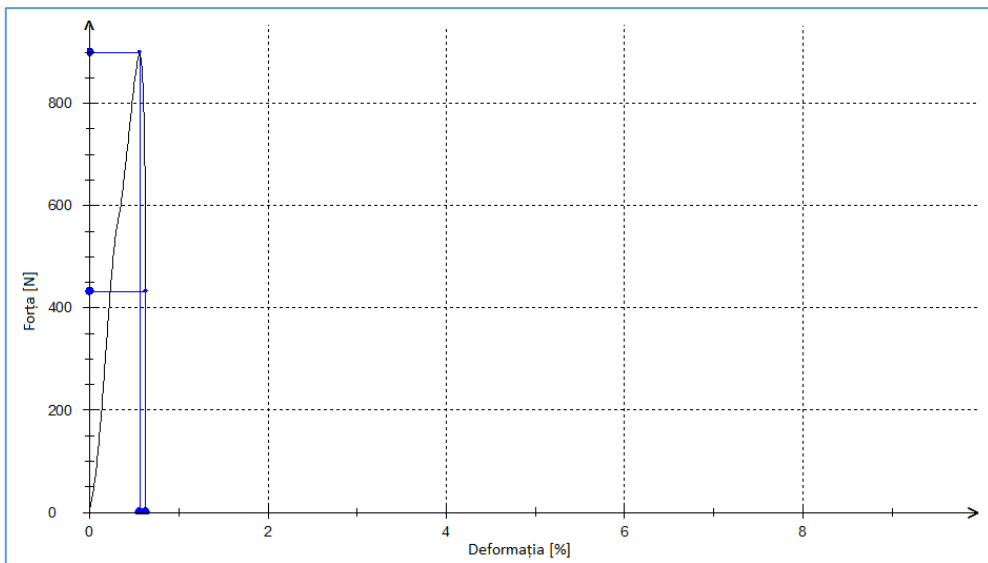


Fig.A.1.8 Dependența forță deformație pentru rețeta P12, tabel 4.2 (proba 2)

Anexa 2

Dimensiuni probe compresiune

Tabel A2.1. Dimensiunile probelor pregătite în vederea efectuării încercării mecanice de compresiune Familia de materiale compozite F1 (TiO₂)

Nr. crt.	0 % fibră de nucleu de cocos			5 % fibră de nucleu de cocos			10 % fibră de nucleu de cocos			15 % fibră de nucleu de cocos		
	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]
1.	29,34	28,28	15,81	29,35	28,79	15,12	28,96	27,95	15,53	30,03	29,89	14,45
2.	29,36	28,88	16,56	29,94	29,77	15,23	29,28	27,12	17,62	28,25	29,35	15,23
3.	30,17	29,22	16,47	29,79	28,12	15,32	29,24	28,24	18,72	30,47	30,14	15,36
4.	29,62	28,25	16,39	29,34	29,20	15,03	28,33	28,08	17,34	30,42	28,37	15,77
5.	29,35	28,13	15,49	26,44	27,48	14,54	27,79	26,70	17,18	25,59	25,29	14,82
6.	28,78	27,01	14,90	29,79	28,93	15,31	29,85	29,17	19,14	26,39	26,05	15,33
7.	28,81	26,94	15,91	26,75	25,23	14,38	30,17	29,65	17,33	26,70	26,41	14,79
8.	28,88	28,38	15,28	28,27	27,57	15,65	27,94	27,87	16,82	29,39	28,36	15,61
Val. medii	29,2887	28,1362	15,8512	28,6712	28,1362	15,0725	28,9450	28,0975	17,46	28,4050	27,9825	15,17

Tabel A2.2. Dimensiunile probelor pregătite în vederea efectuării încercării mecanice de compresiune Familia de materiale compozite F2 (Al₂O₃)

Nr. crt.	0 % fibră de nucleu de cocos			5 % fibră de nucleu de cocos			10 % fibră de nucleu de cocos			15 % fibră de nucleu de cocos		
	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L [mm]	l [mm]	h [mm]
1.	29,40	28,86	16,62	28,91	28,30	14,68	29,78	28,61	15,45	29,28	29,13	14,15
2.	29,20	28,95	16,12	28,06	28,04	15,32	29,81	29,71	14,72	30,01	29,51	15,50
3.	30,71	29,15	16,46	28,09	28,96	16,20	29,45	28,42	13,74	30,20	29,42	15,76
4.	30,24	29,41	16,48	29,02	28,57	15,88	29,22	28,88	13,76	29,04	28,12	14,06
5.	29,56	28,56	16,34	30,00	29,66	16,86	29,44	28,71	13,37	29,56	29,58	14,02
6.	29,22	28,72	16,59	29,65	29,43	15,93	29,80	29,48	13,68	29,59	29,66	14,66
7.	28,89	27,98	15,34	29,06	28,83	14,23	31,09	30,98	14,32	30,67	28,89	15,68
8.	29,67	29,39	16,38	29,96	28,11	15,98	31,12	28,33	15,35	30,53	28,99	15,34
Val. medii	29,6112	28,8775	16,2912	29,0937	28,7375	15,635	29,9637	29,3775	14,2987	29,8600	29,1625	14,8962

Anexa 3

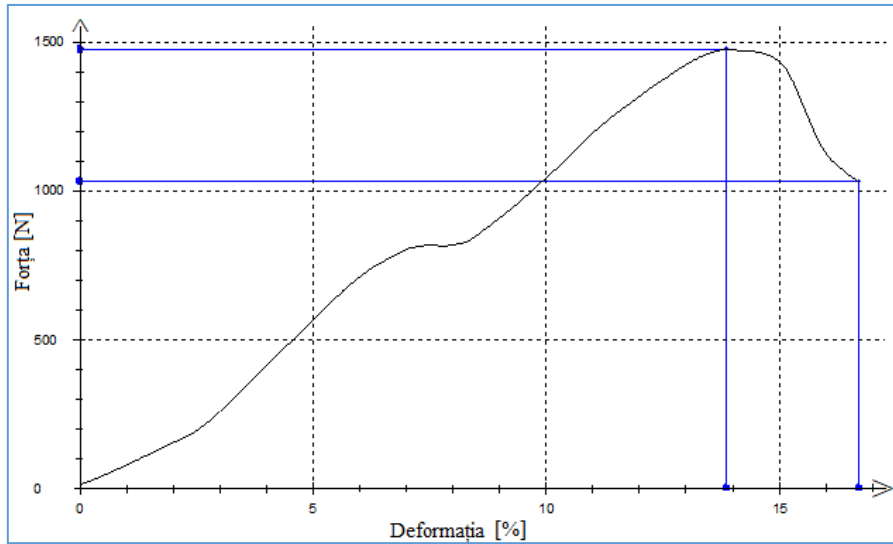
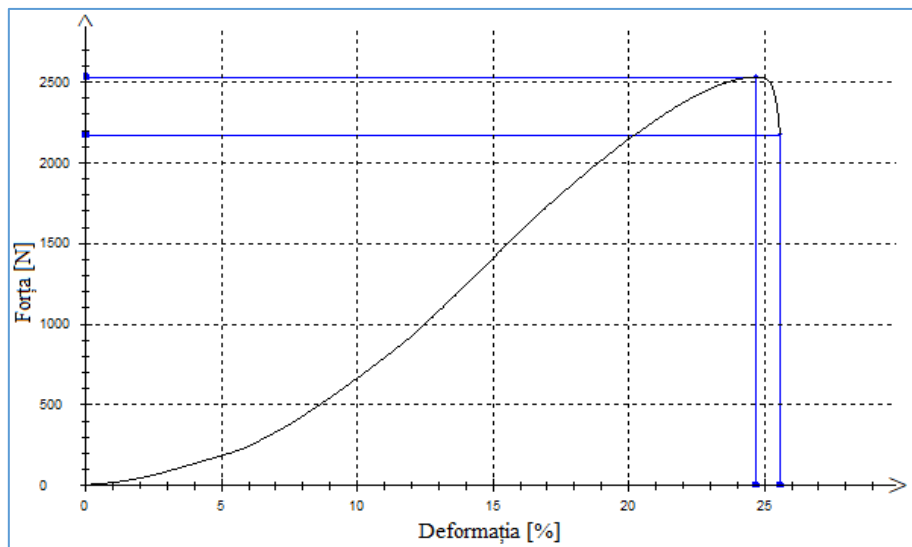
Valorile Fmax rupere și a scurtărilor

Tabelul A 3.1. Forțe maxime de rupere și scurtările probelor obținute la încercarea mecanică de compresiune pentru familia de materiale compozite F1 (TiO₂)

Nr. crt.	0% cocos	5% cocos	10% cocos	15% cocos	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]
	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]				
1.	1570	0,15	2810	0,19	2980	0,12	5000	0,15
2.	1720	0,16	2860	0,15	3890	0,13	5010	0,17
3.	1700	0,18	2480	0,17	4990	0,19	5030	0,19
4.	1890	0,19	2880	0,18	2910	0,15	2010	0,16
5.	2760	0,18	2630	0,16	3560	0,12	2510	0,18
6.	2960	0,20	2430	0,17	5010	0,16	2720	0,13
7.	2010	0,22	2760	0,15	5020	0,11	3070	0,19
8.	2710	0,23	1980	0,14	3940	0,11	5010	0,18
Valori medii	2165	0,22	2604	0,16	4038	0,13	3795	0,16

Tabel A3.2. Forțe maxime de rupere și scurtările probelor obținute la încercarea mecanică de compresiune pentru familia de materiale compozite F2 (Al₂O₃)

Nr. crt.	0% cocos		5% cocos		10% cocos		15% cocos	
	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]	Forța de rupere [N]	Scurtarea Δl [mm]
1.	2560	0,20	2800	0,18	2990	0,13	5020	0,13
2.	2590	0,19	1850	0,15	3690	0,12	5060	0,16
3.	2290	0,16	1890	0,17	4320	0,13	5050	0,16
4.	2260	0,19	2720	0,14	2750	0,15	5000	0,17
5.	1720	0,14	2900	0,18	2850	0,14	3100	0,15
6.	1893	0,15	2210	0,18	3940	0,13	3920	0,16
7.	2410	0,15	2680	0,17	3947	0,16	3910	0,15
8.	1840	0,13	1840	0,13	4700	0,15	3940	0,15
Valori medii	2208	0,16	2273	0,16	3649	0,13	3885	0,15

Anexa 4**Dependențe forță- deformație pentru rețetele produse pentru familia F1
(Rețete din tabelul 5.4)****Fig.A.4.1 Dependența forță- deformație pentru proba 1 (rețeta 1)****Fig.A.4.2 Dependența forță -deformație pentru proba 2 (rețeta 1)**

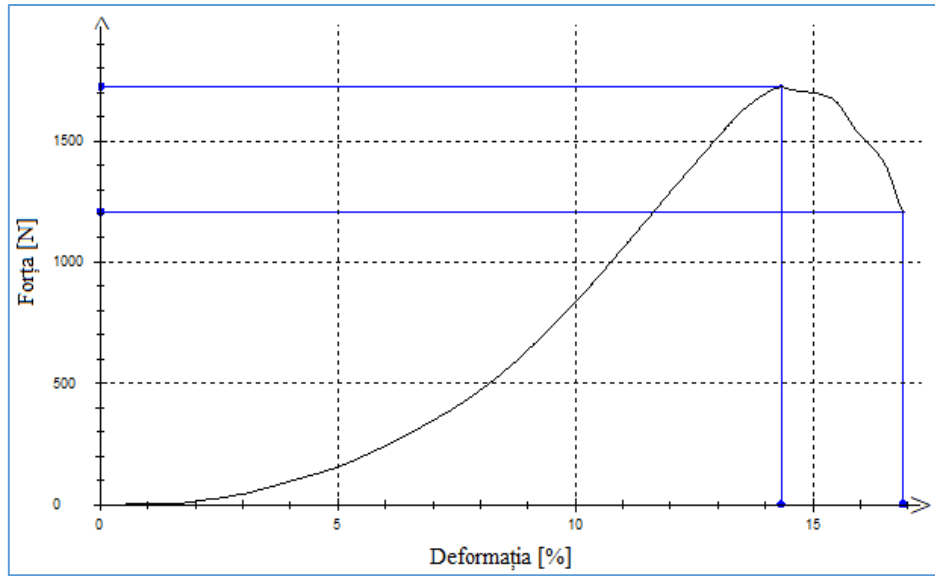


Fig.A.4.3 Dependența forță -deformație pentru proba 3(rețeta 1)

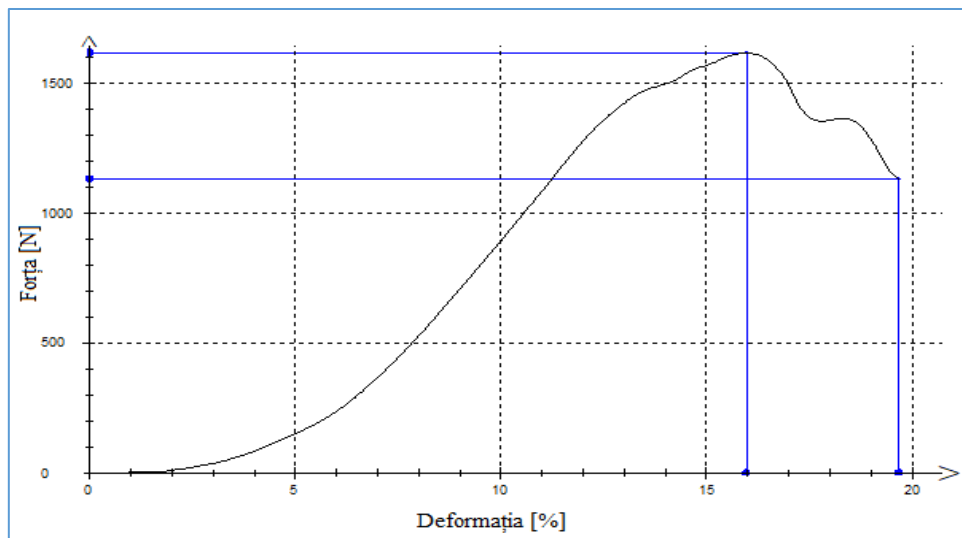


Fig.A.4.4 Dependența forță- deformație pentru proba 1 (rețeta 2)

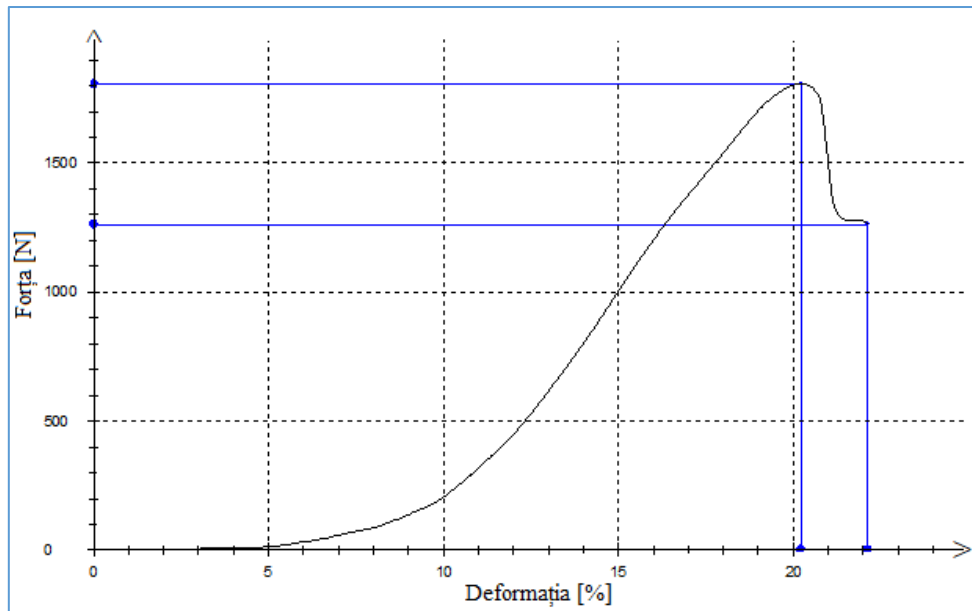


Fig.A.4.5 Dependența forță -deformație pentru proba 2 (rețeta 2)

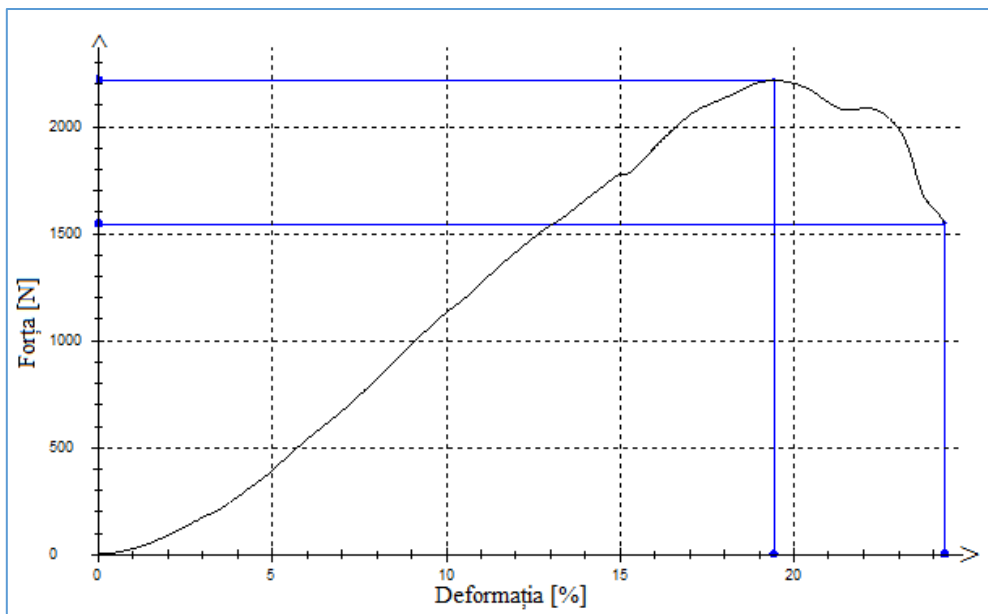


Fig.A.4.6 Dependența forță -deformație pentru proba 3 (rețeta 2)

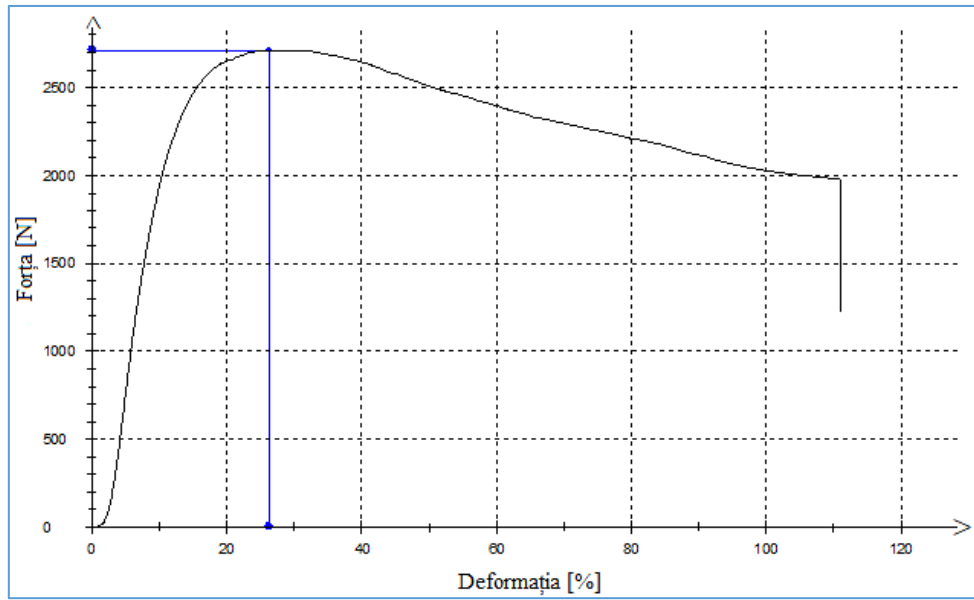


Fig.A.4.7 Dependența forță- deformație pentru proba 1 (rețeta 3)

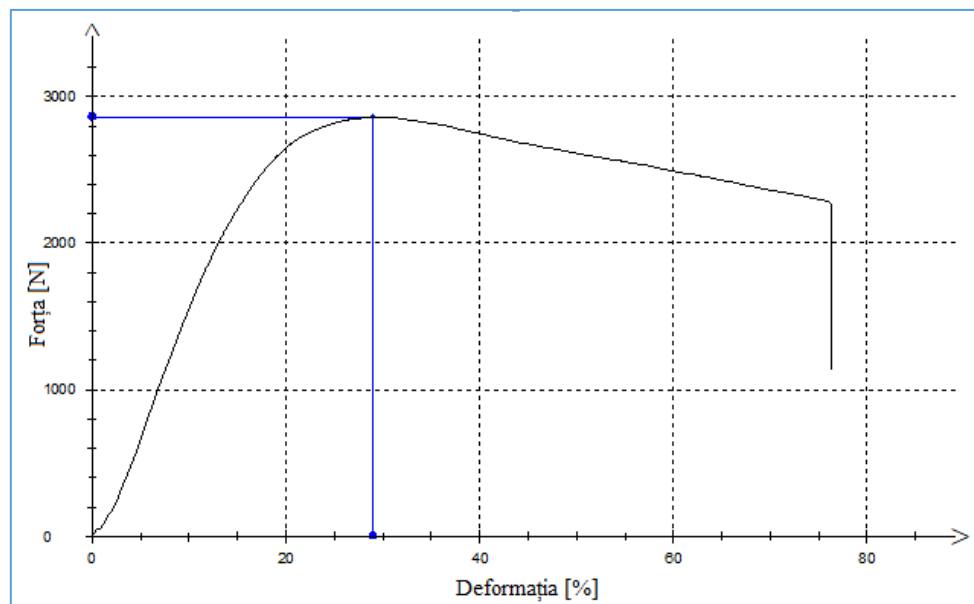


Fig.A.4.8 Dependența forță- deformație pentru proba 2 (rețeta 3)

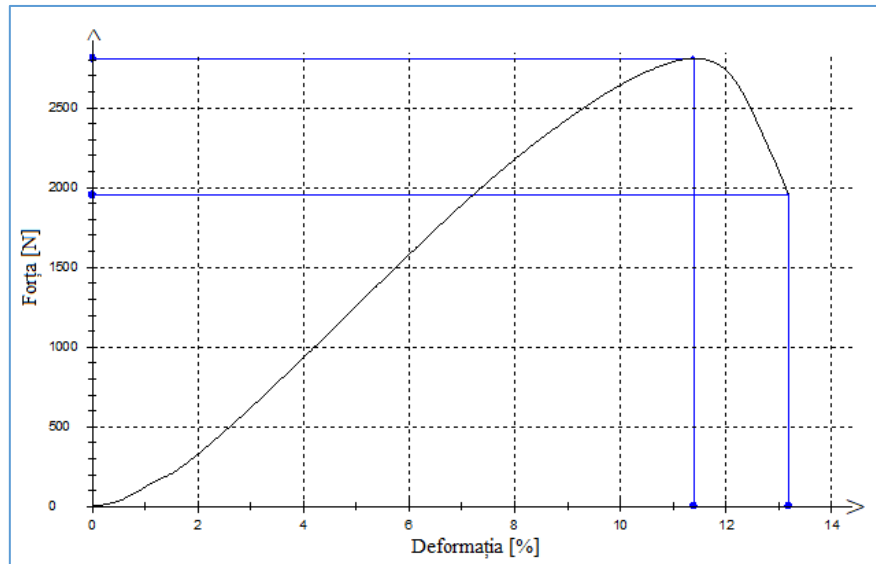


Fig.A.4.9 Dependența forță- deformație pentru proba 3 (rețeta 3)

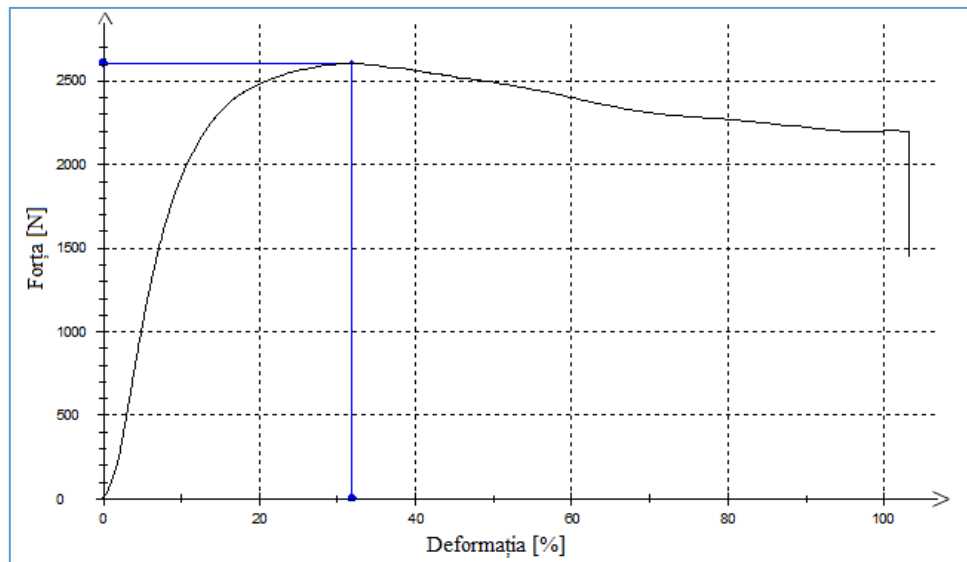


Fig.A.4.10 Dependența forță -deformație pentru proba 1 (rețeta 4)

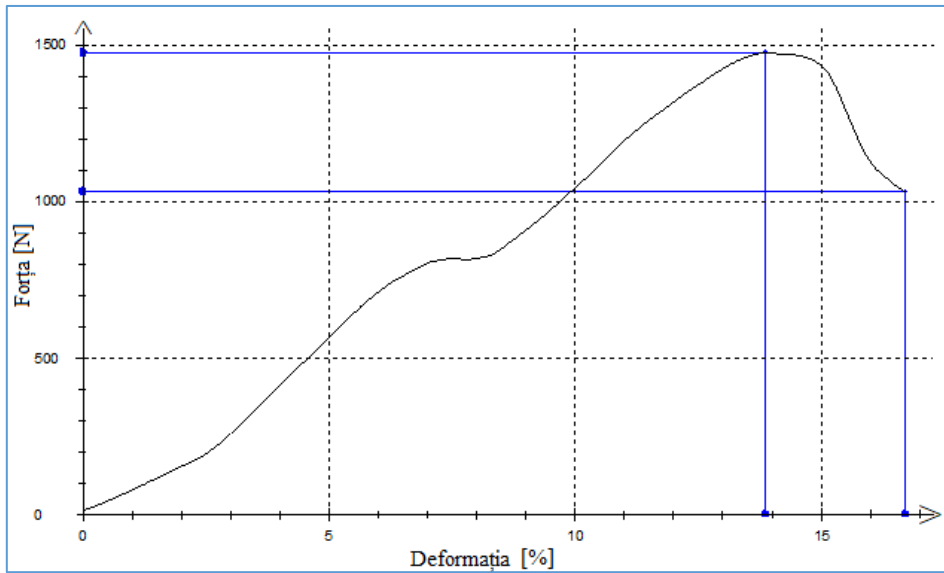


Fig.A.4.11 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 4)

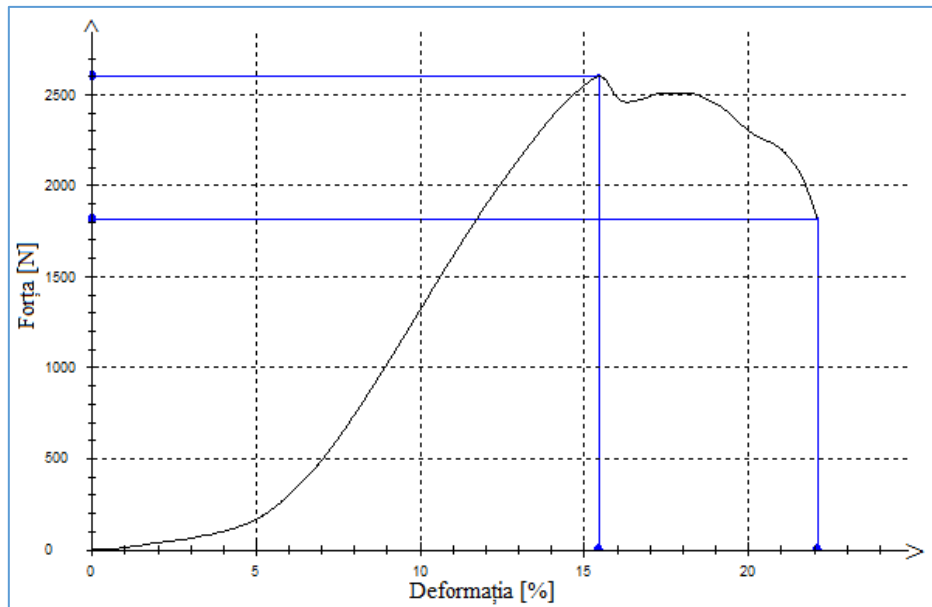


Fig.A.4.12 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 4)

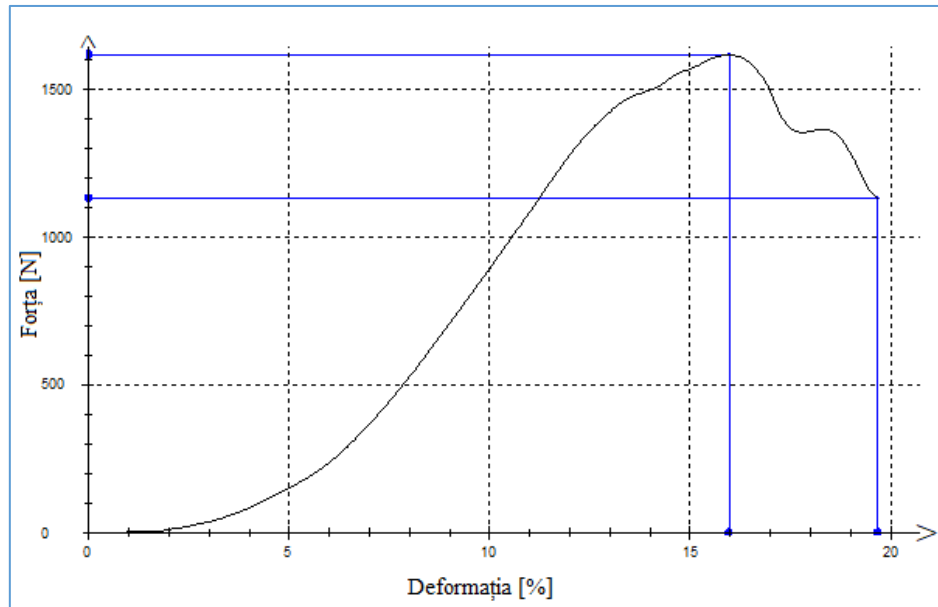


Fig.A.4.13 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 5)

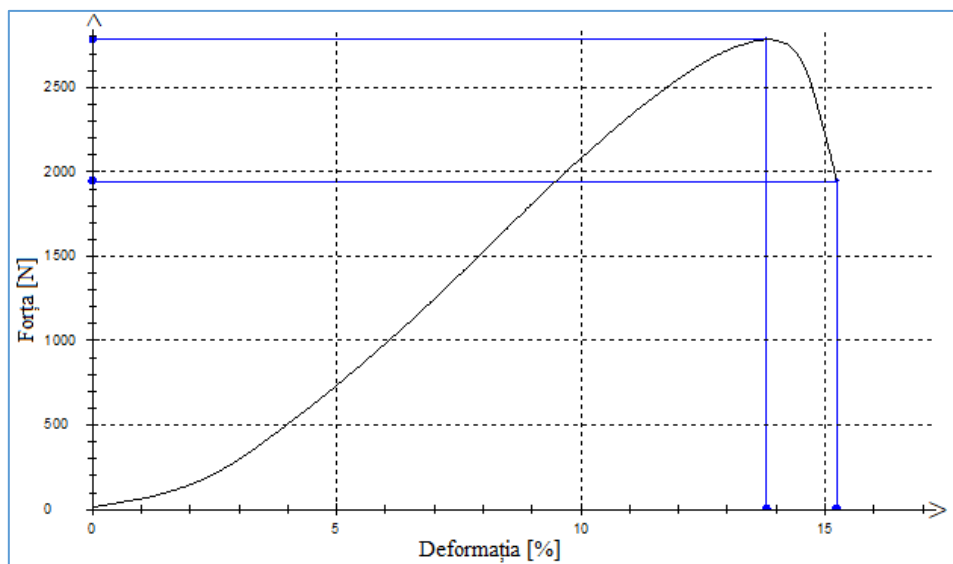


Fig.A.4.14 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 5)

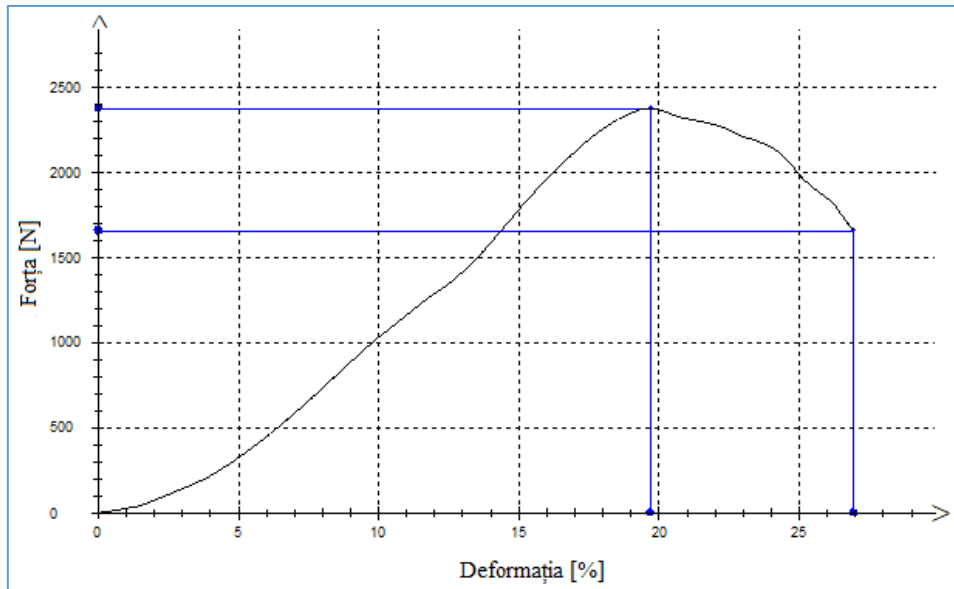


Fig.A.4.15 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 5)

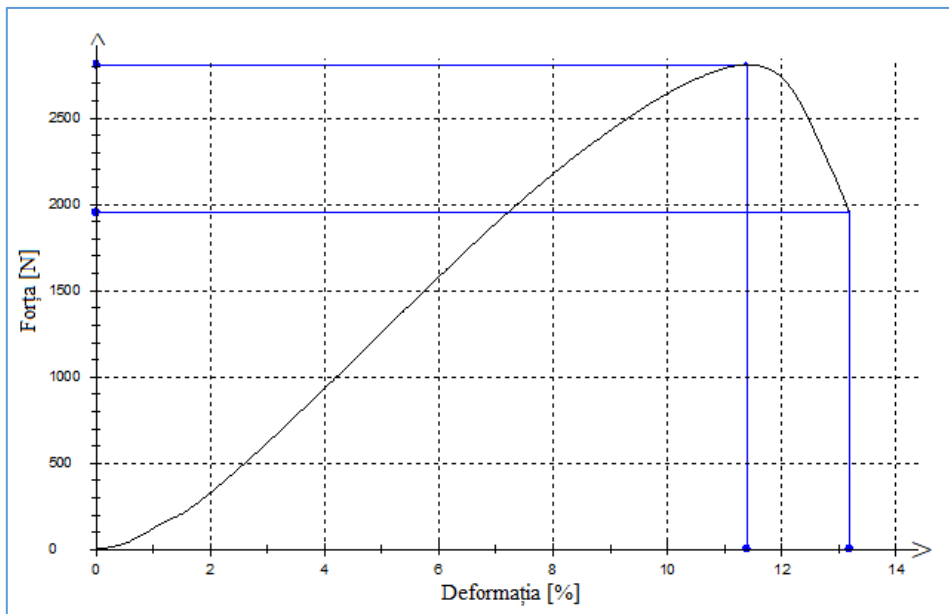


Fig.A.4.16 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 6)

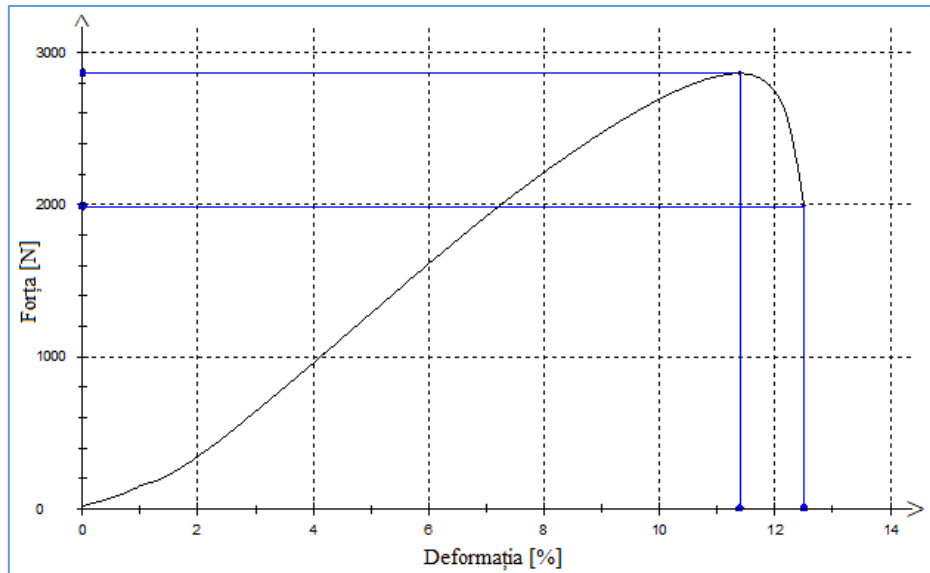


Fig.A.4.17 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 6)

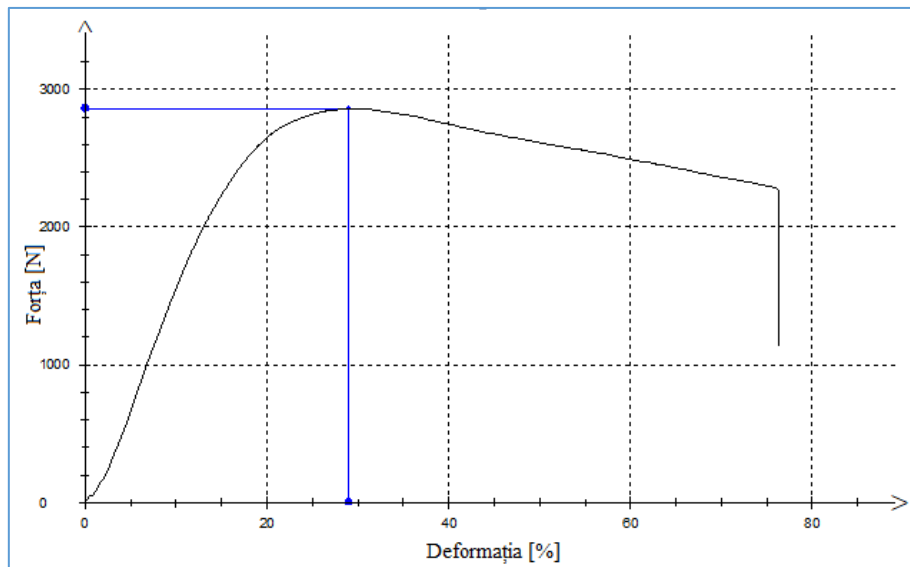


Fig.A.4.18 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 6)

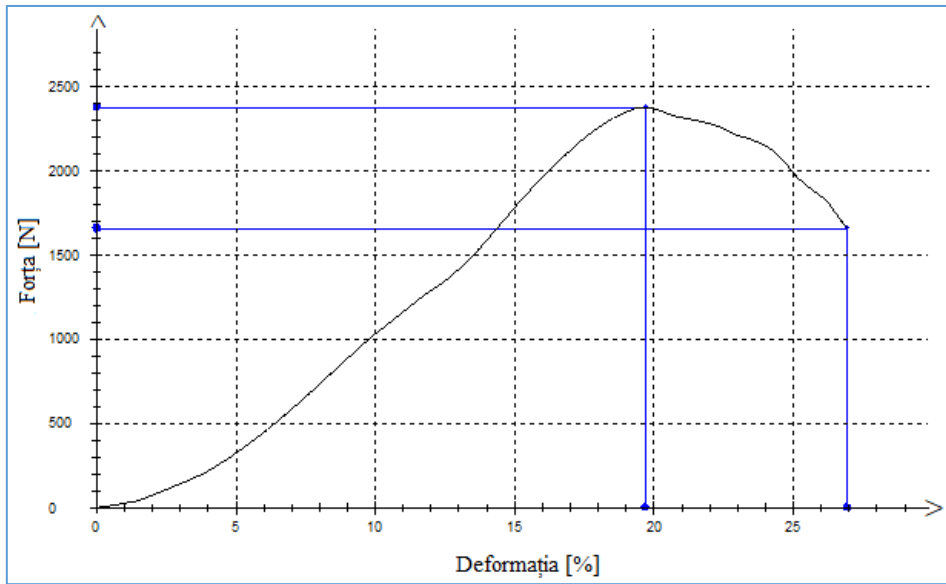


Fig.A.4.19 Dependența forță -deformație pentru proba 1(rețeta 7)

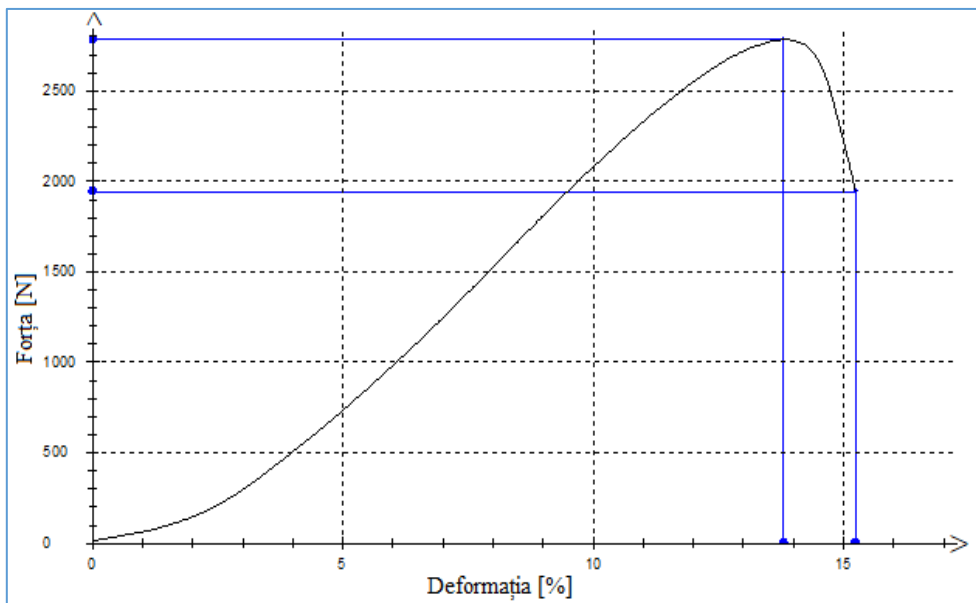


Fig.A.4.20 Dependența forță -deformație pentru proba 2(rețeta 7)

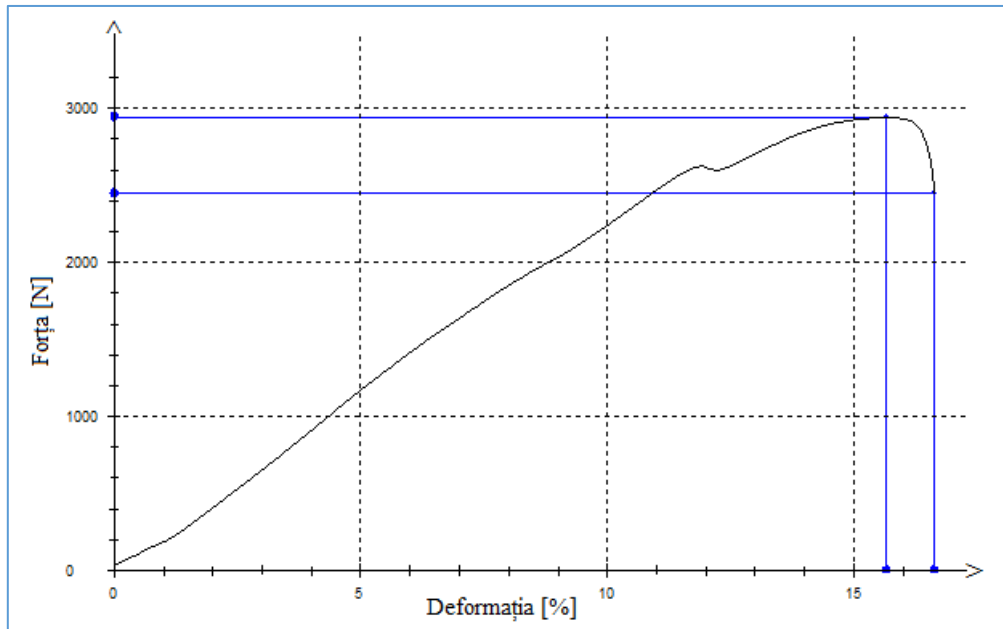


Fig.A.4.21 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 7)

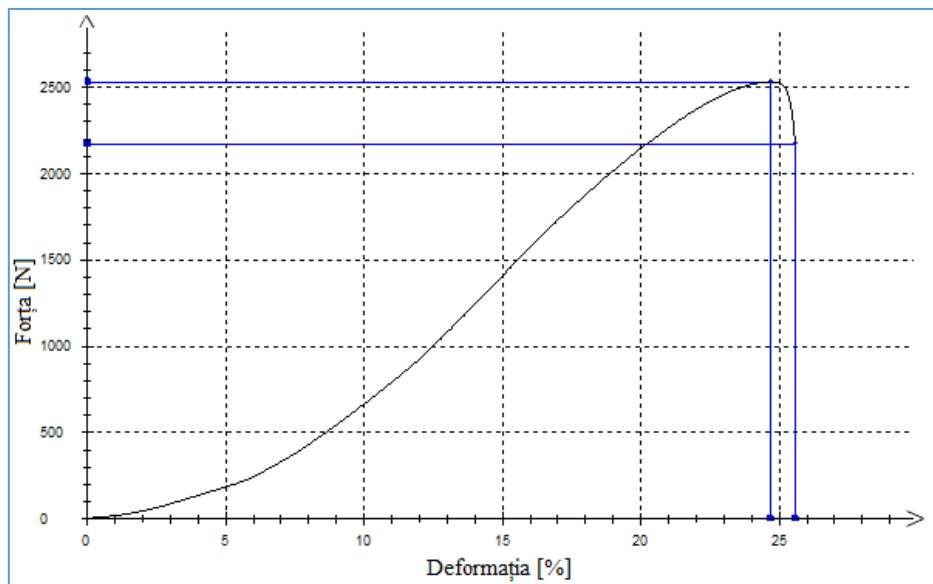


Fig.A.4.22 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 8)

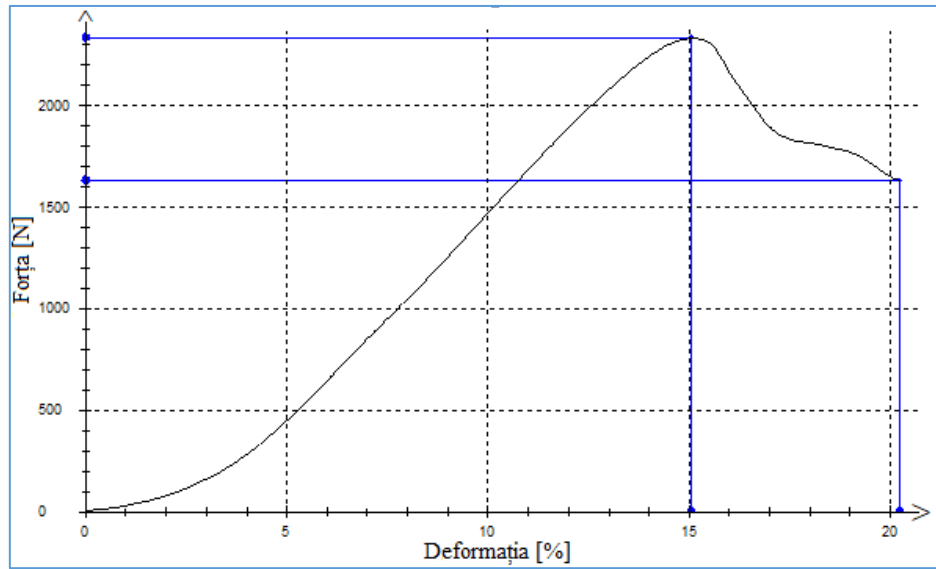


Fig.A.4.23 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 8)

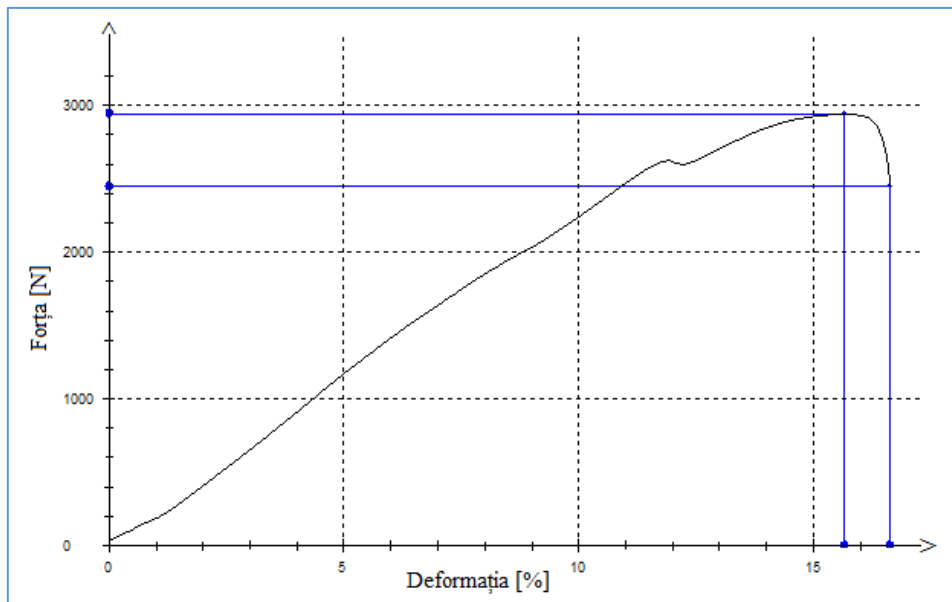


Fig.A.4.24 Dependența forță –deformație pentru proba 3(rețeta 8)

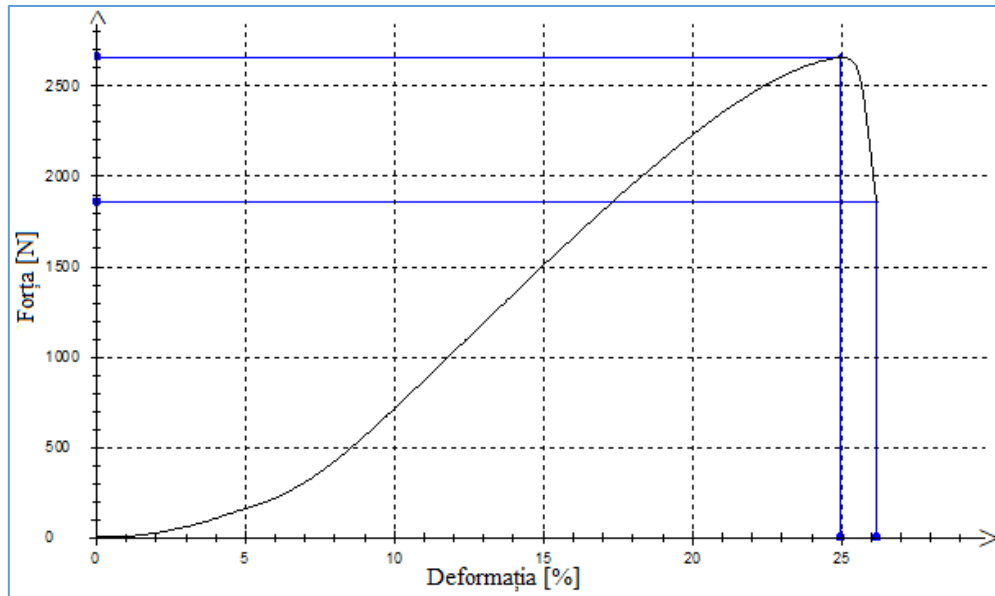


Fig.A.4.25 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 9)

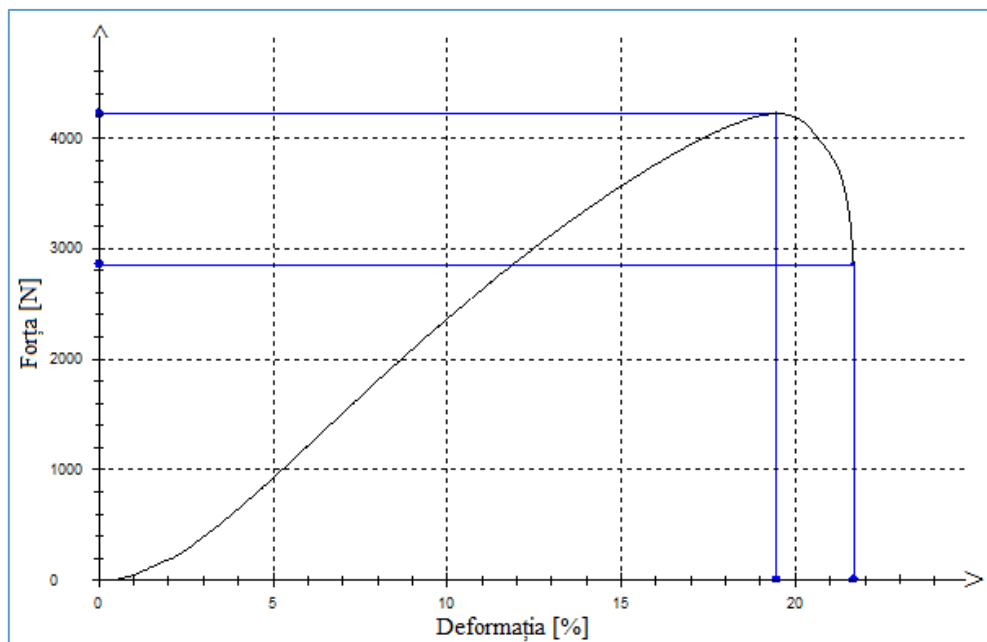


Fig.A.4.26 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 9)

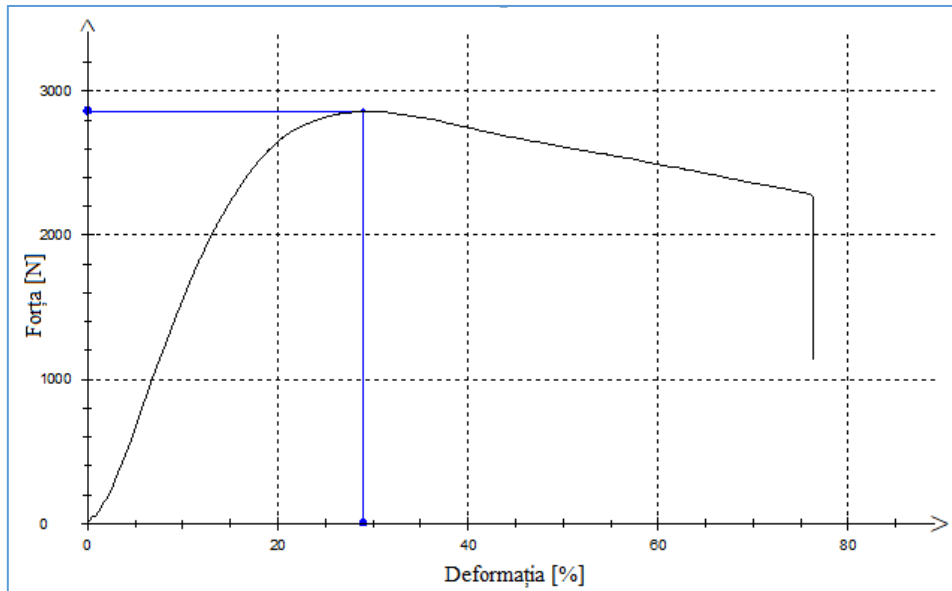


Fig.A.4.27 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 9)

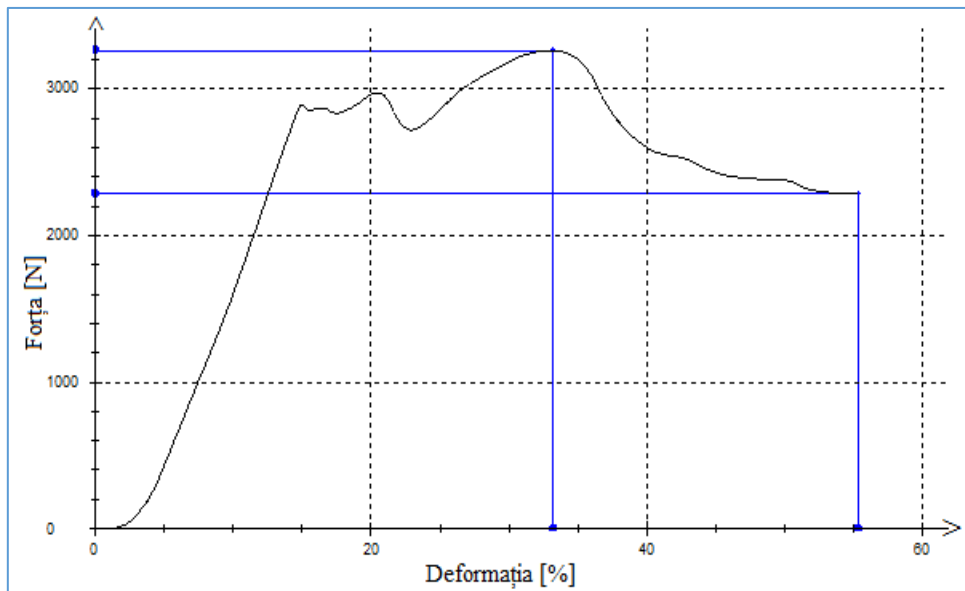


Fig.A.4.28 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 10)

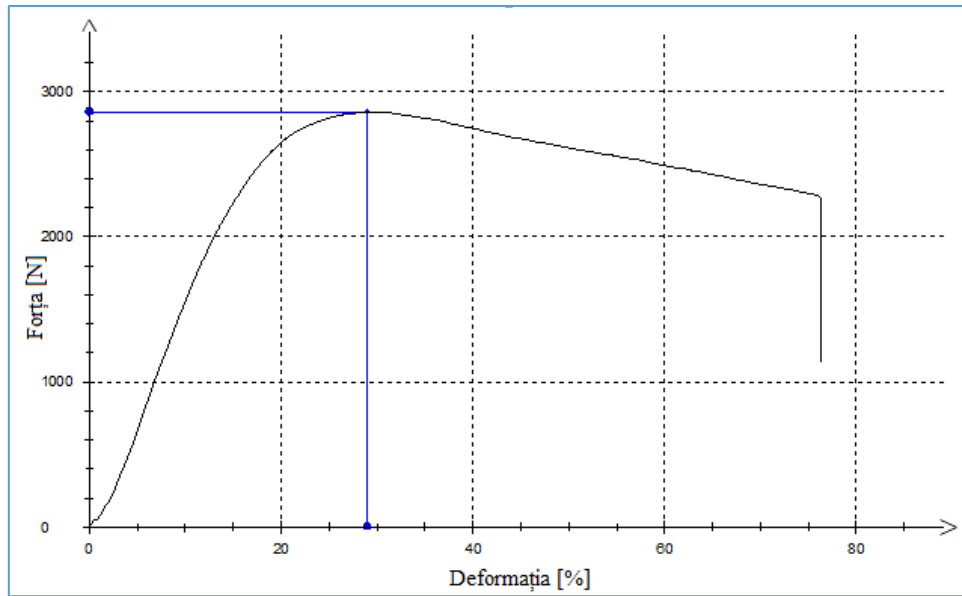


Fig.A.4.29 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 10)

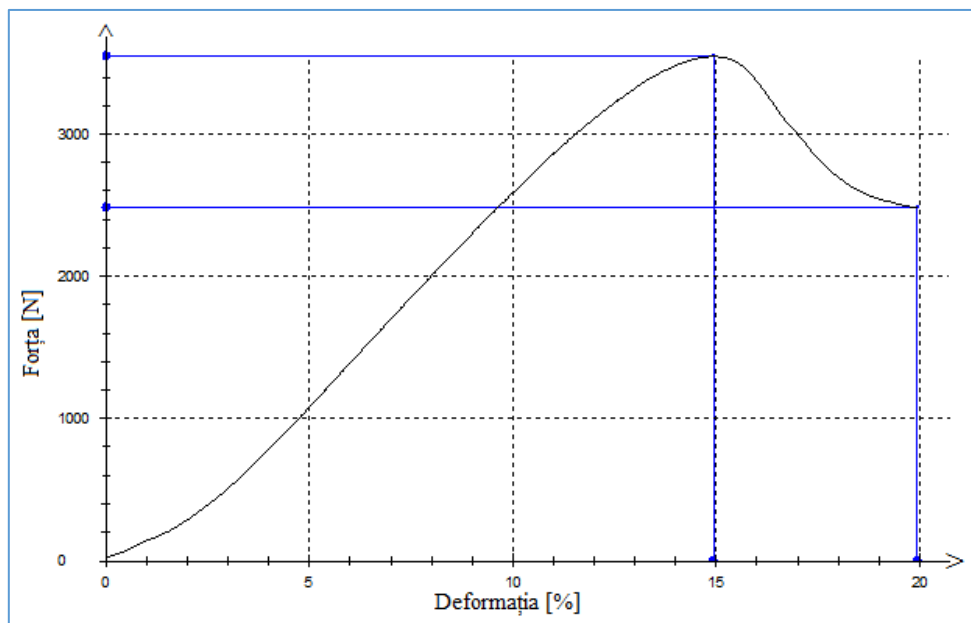


Fig.A.4.30 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 10)

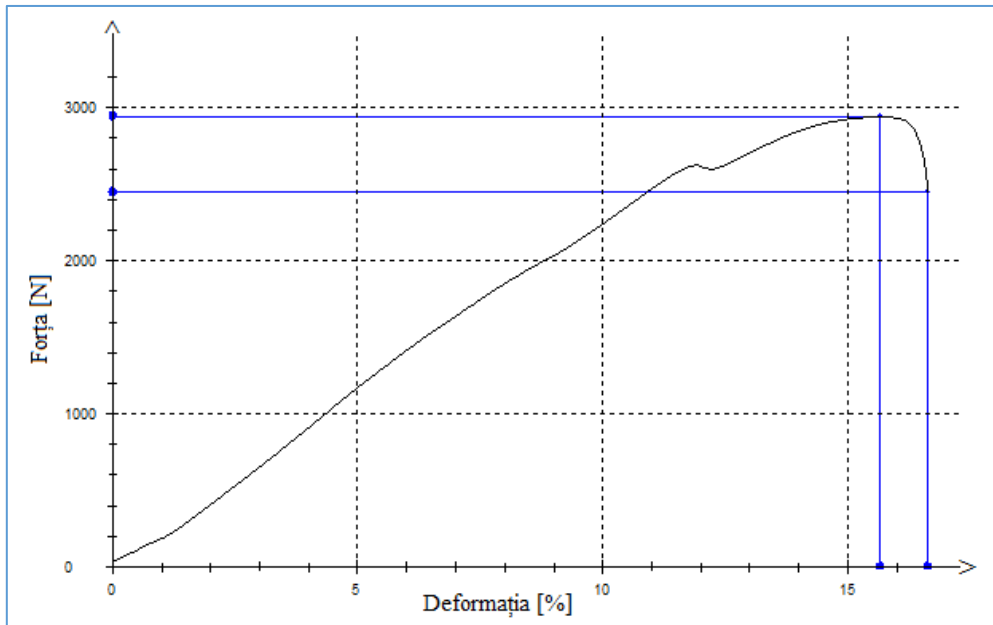


Fig.A.4.31 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 11)

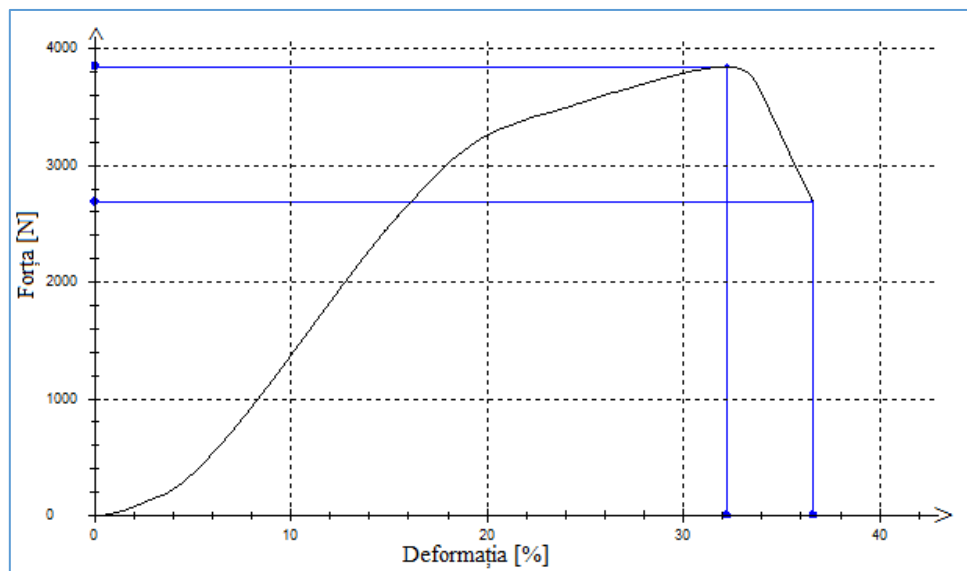


Fig.A.4.32 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 11)

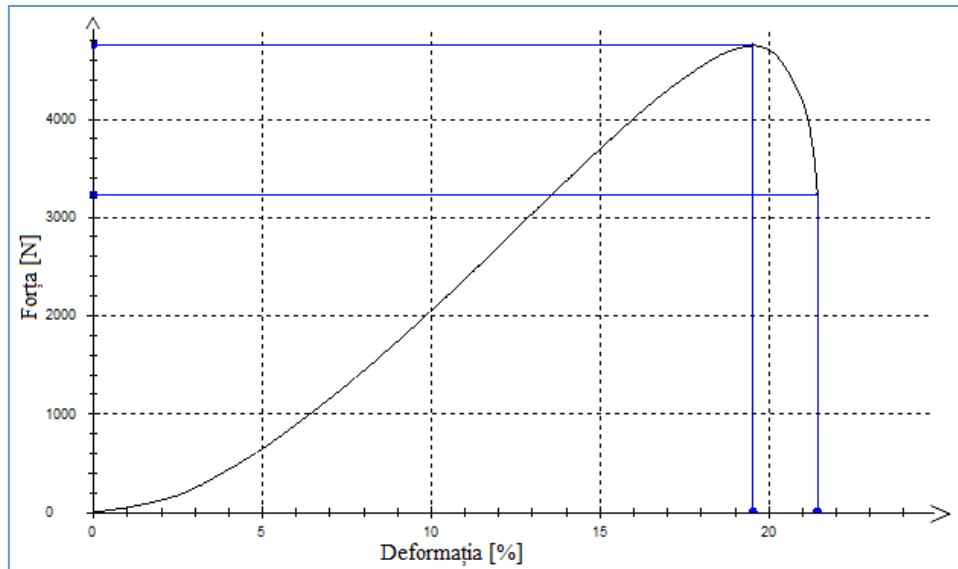


Fig.A.4.33 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 11)

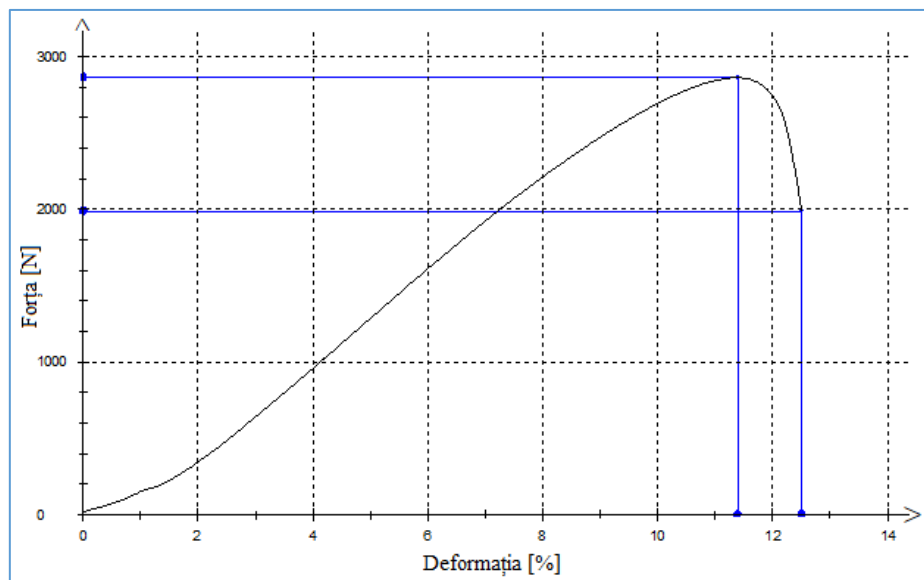


Fig.A.4.34 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 12)

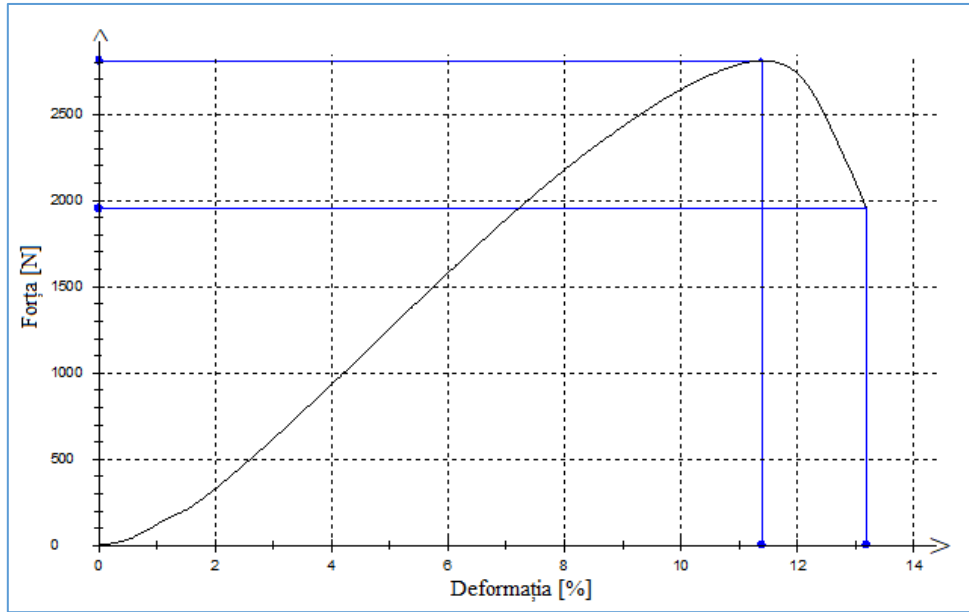


Fig.A.4.35 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 12)

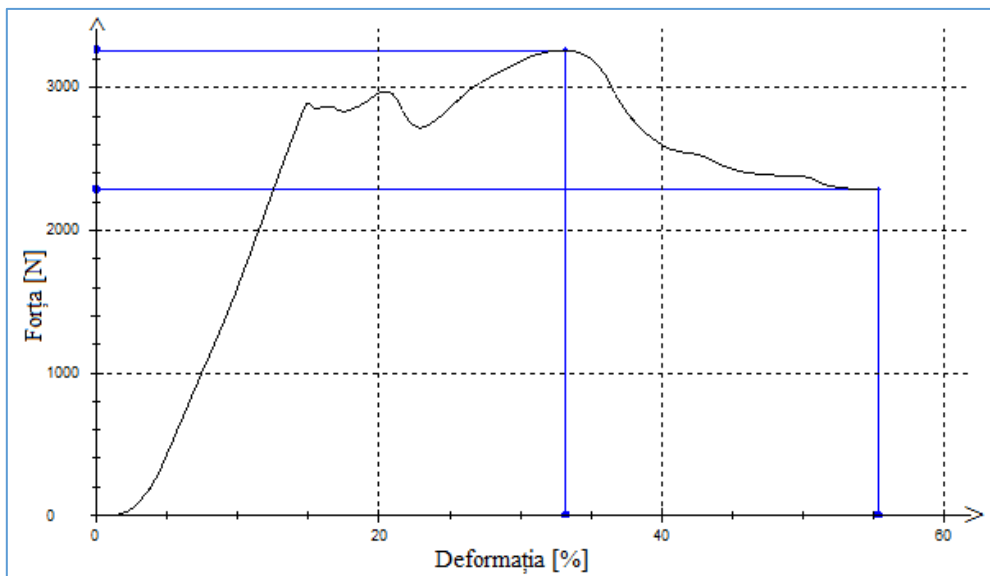


Fig.A.4.36 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 12)

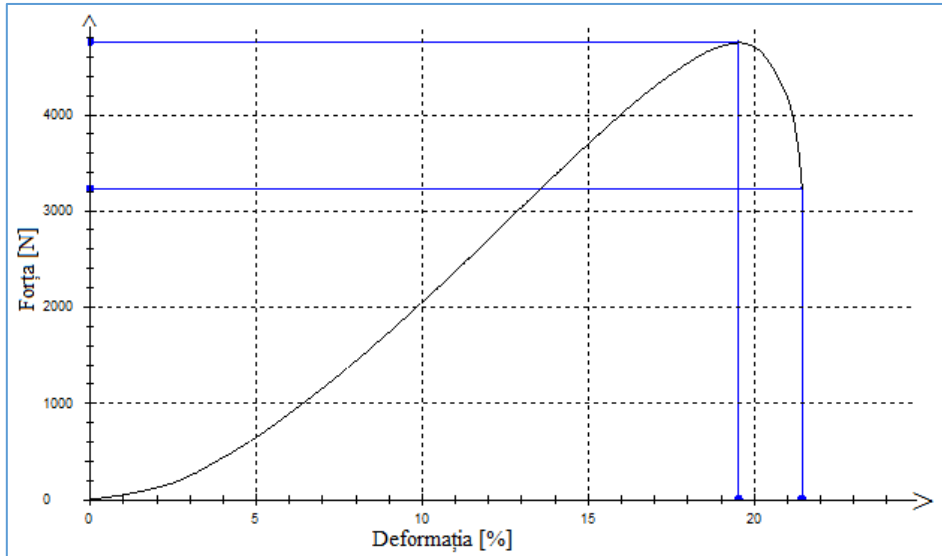


Fig.A.4.37 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 13)

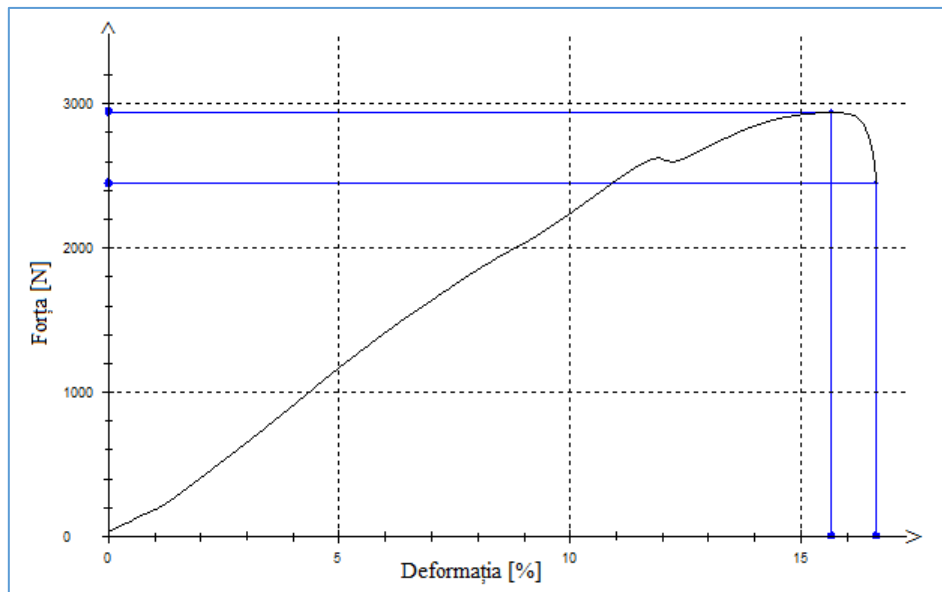


Fig.A.4.38 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 13)

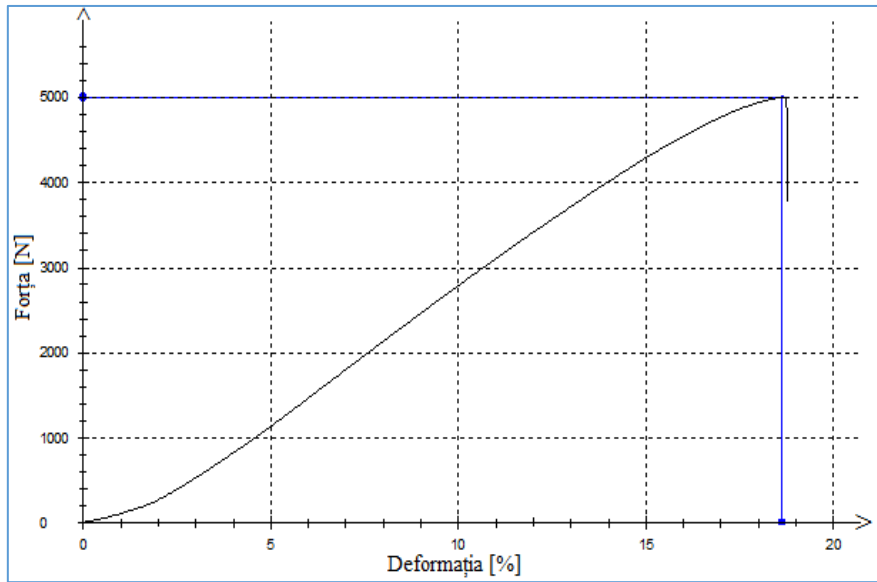


Fig.A.4.39 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 13)

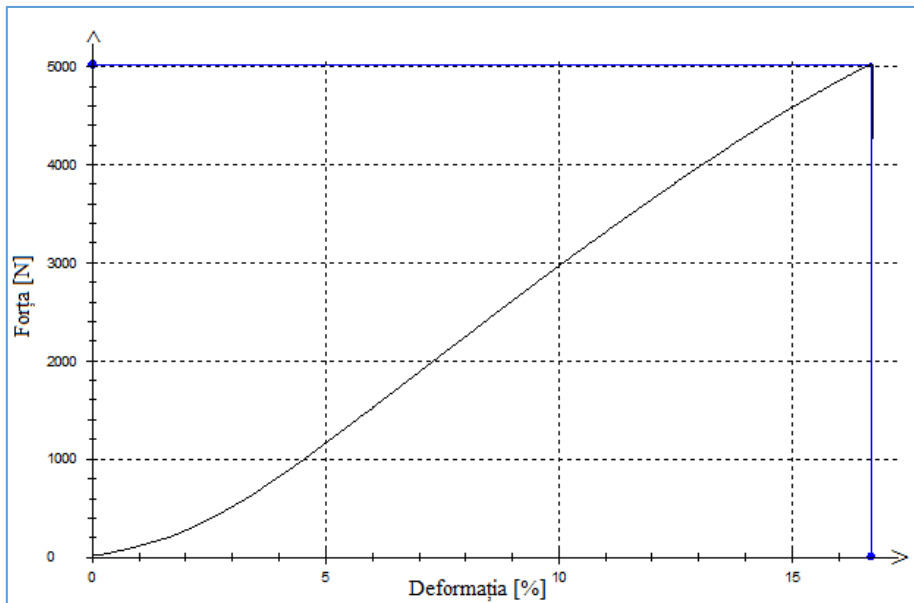


Fig.A.4.40 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 14)

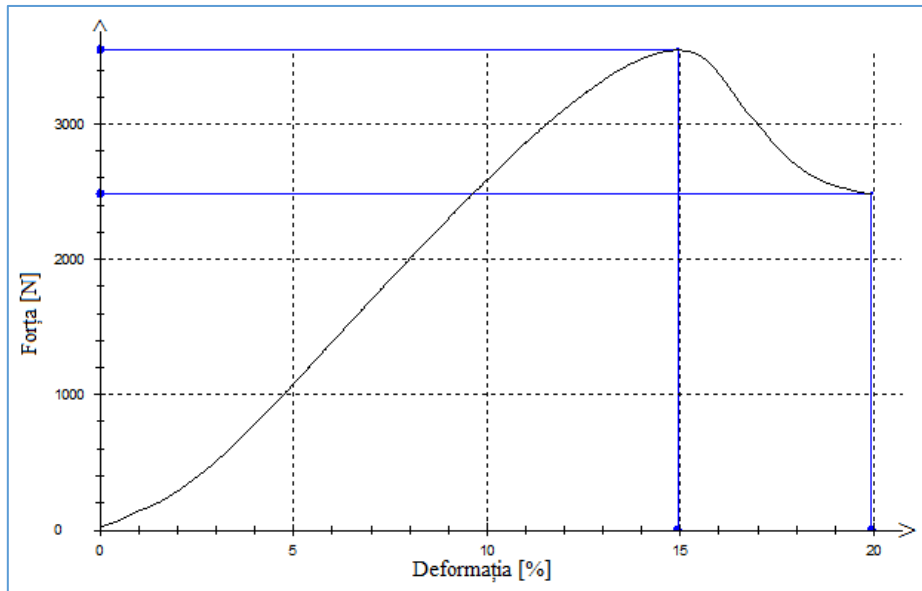


Fig.A.4.41 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 14)

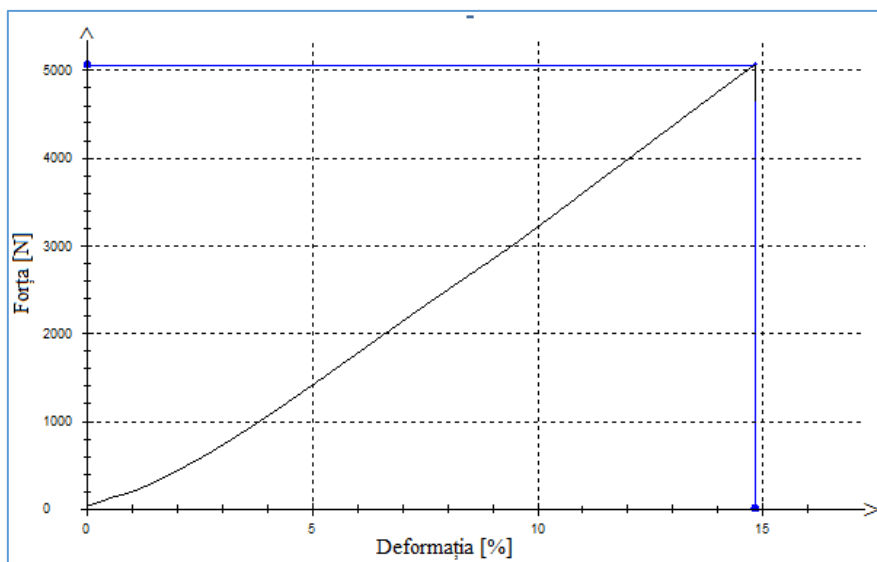


Fig.A.4.42 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 14)

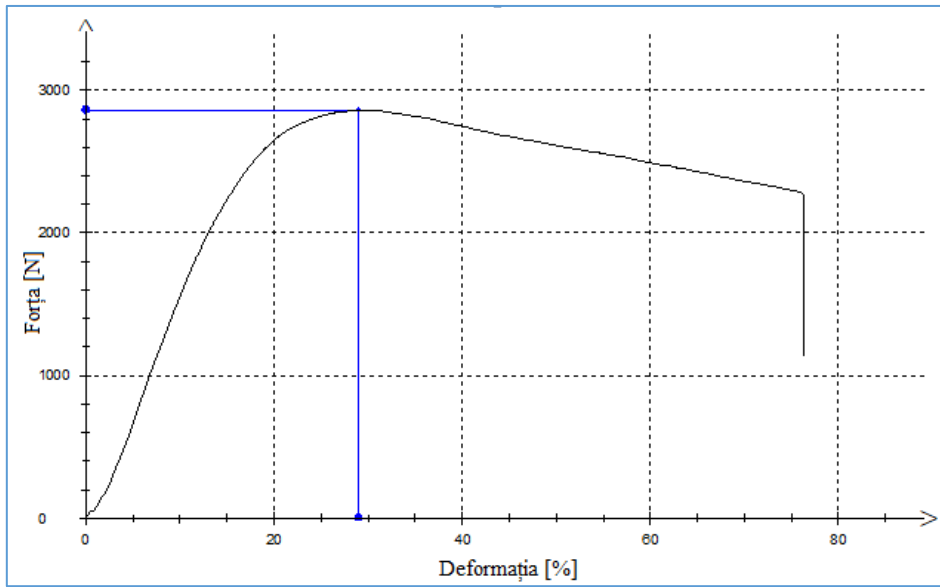


Fig.A.4.43 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 15)

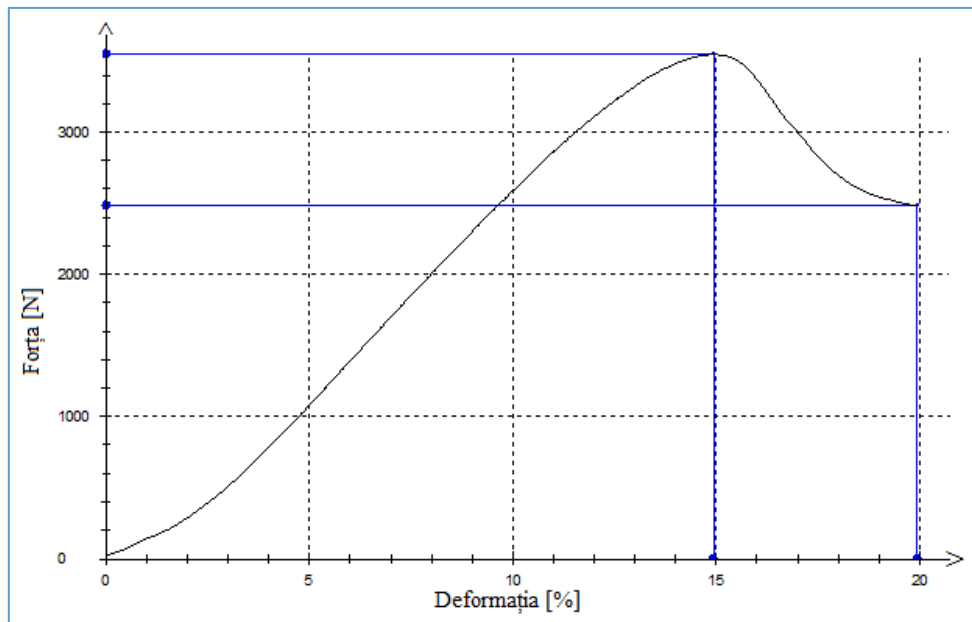


Fig.A.4.44 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 15)

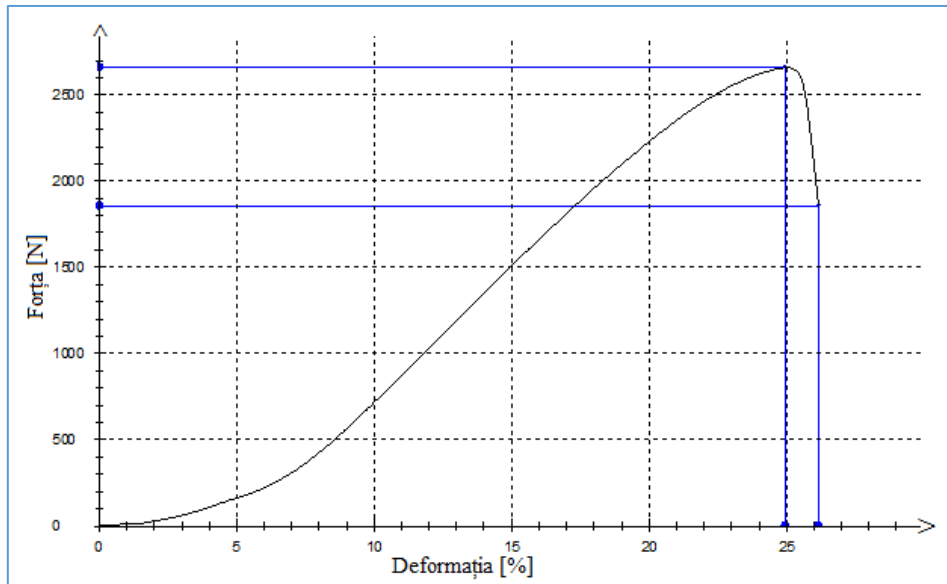


Fig.A.4.45 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 15)

**Dependența forță- deformație pentru rețetele produse pentru familia F2
(Rețete din tabelul 5.5)**

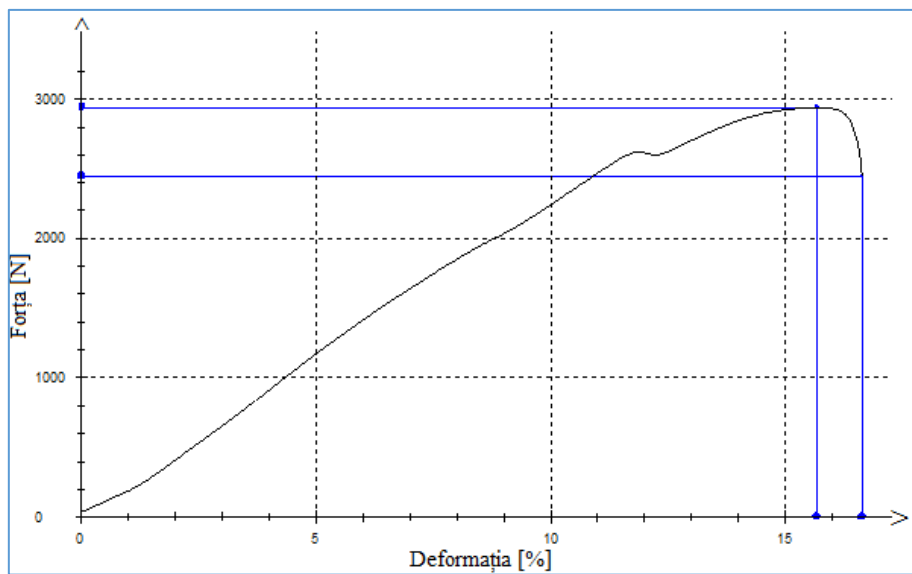


Fig.A.4.46 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 1)

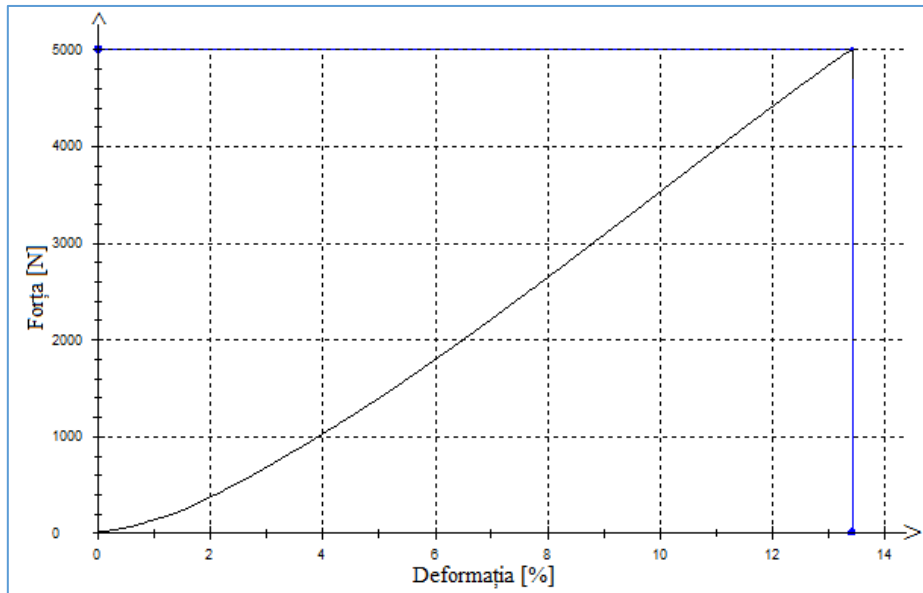


Fig.A.4.47 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 1)

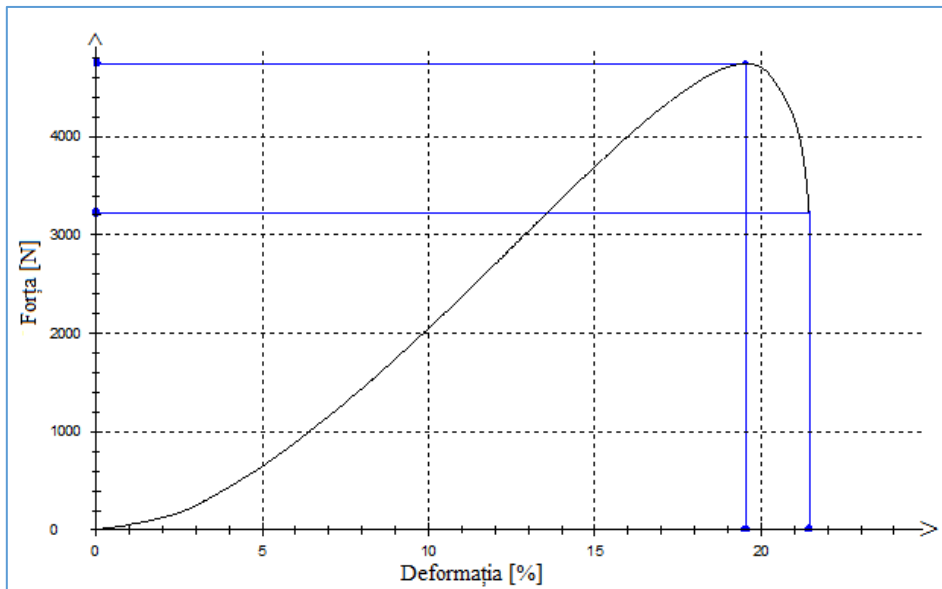


Fig.A.4.48 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 1)

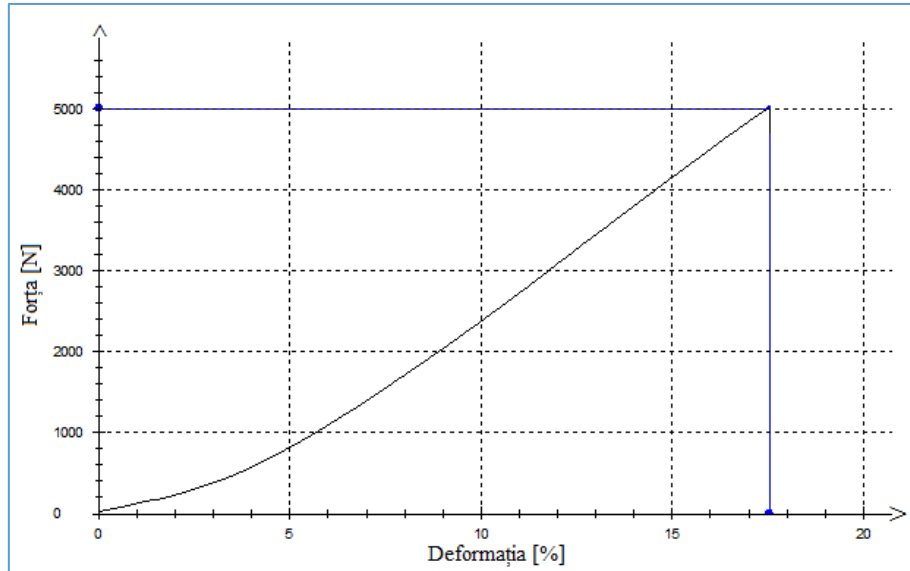


Fig.A.4.49 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 2)

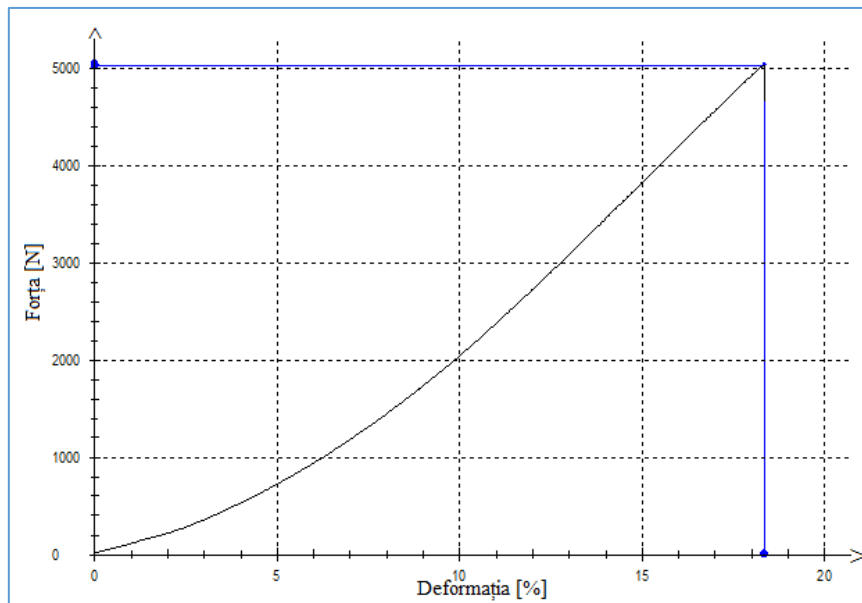


Fig.A.4.50 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 2)

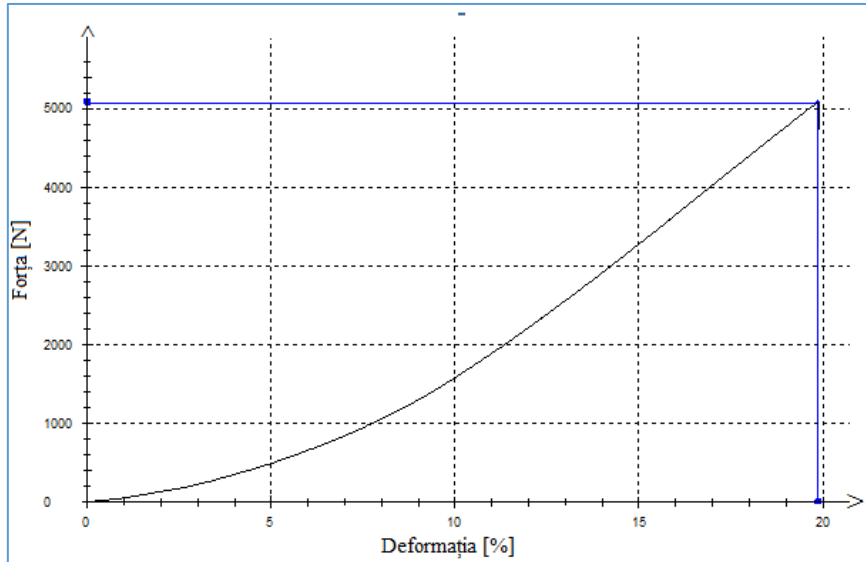


Fig.A.4.51 Dependența forță -deformație pentru proba 3 (rețeta 2)

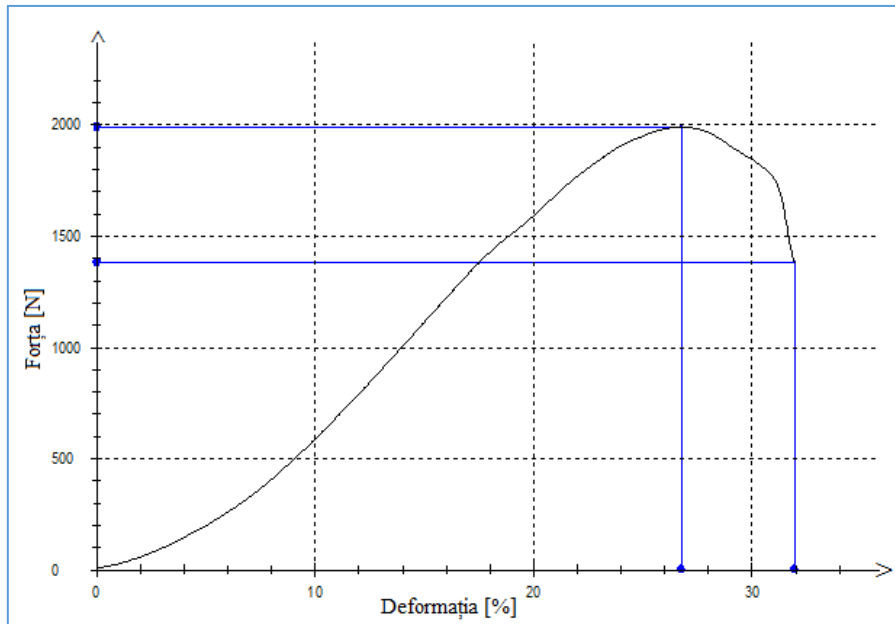


Fig.A.4.52 Dependența forță -deformație pentru proba 1 (rețeta 3)

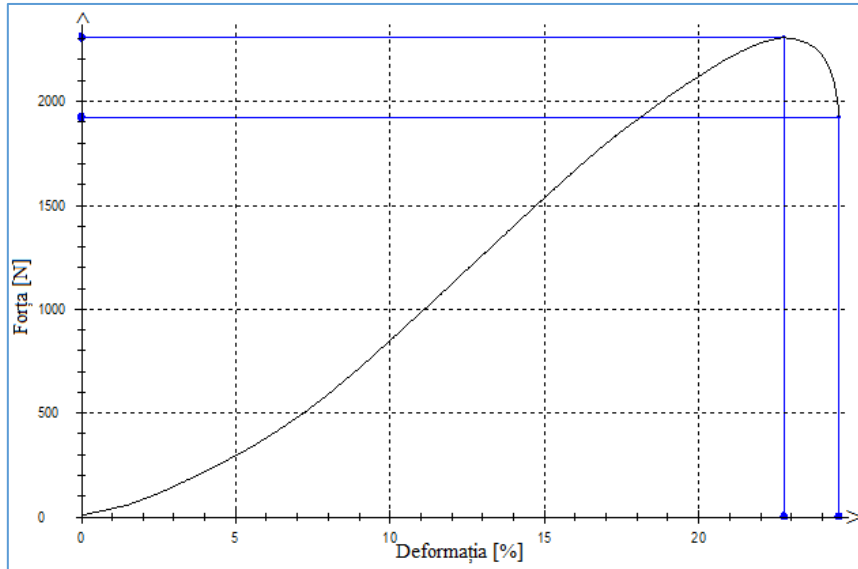


Fig.A.4.53 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 3)

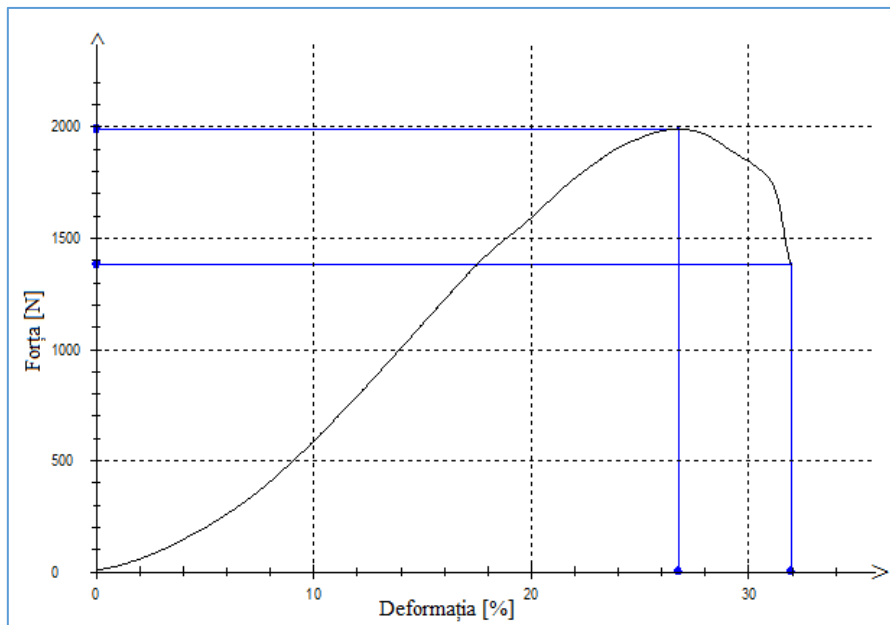


Fig.A.4.54 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta3)

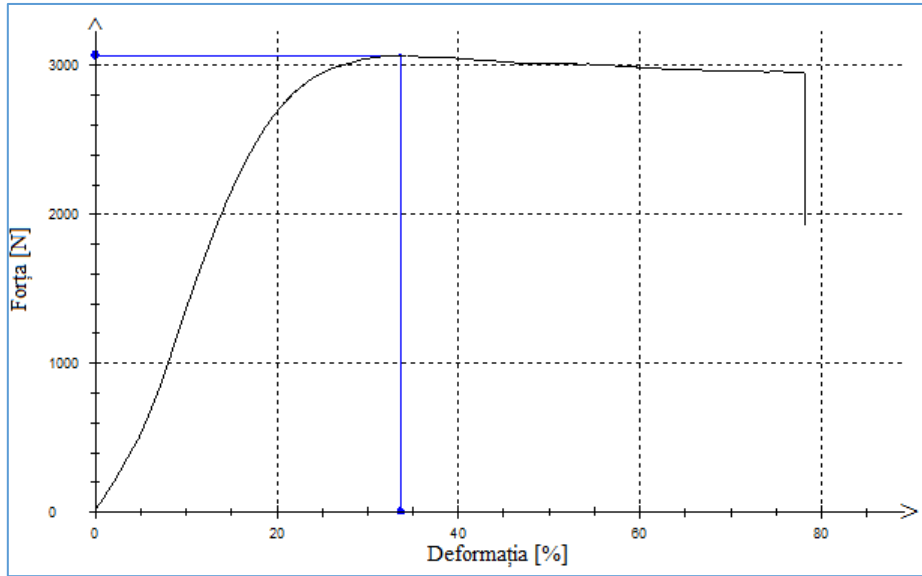


Fig.A.4.55 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 4)

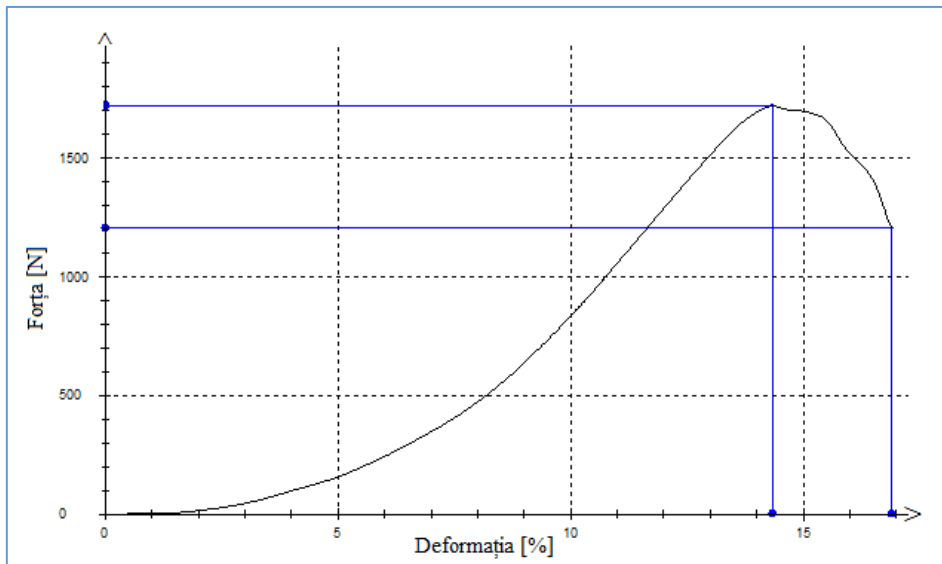


Fig.A.4.56 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 4)

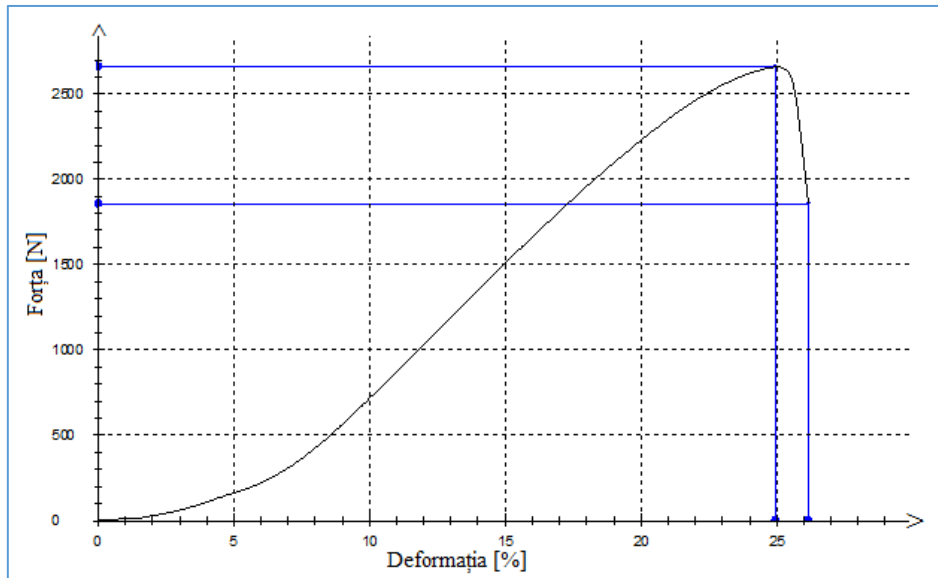


Fig.A.4.57 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 4)

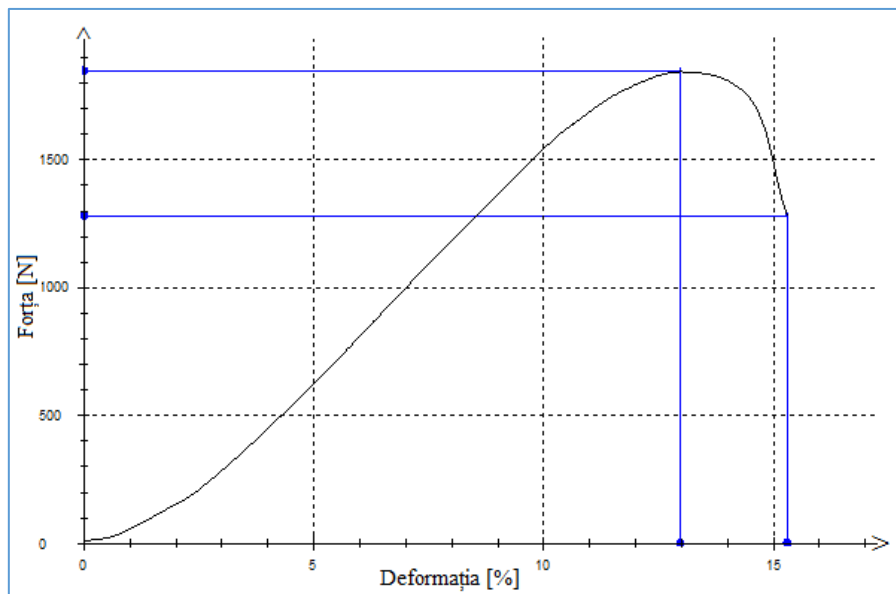


Fig.A.4.58 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 5)

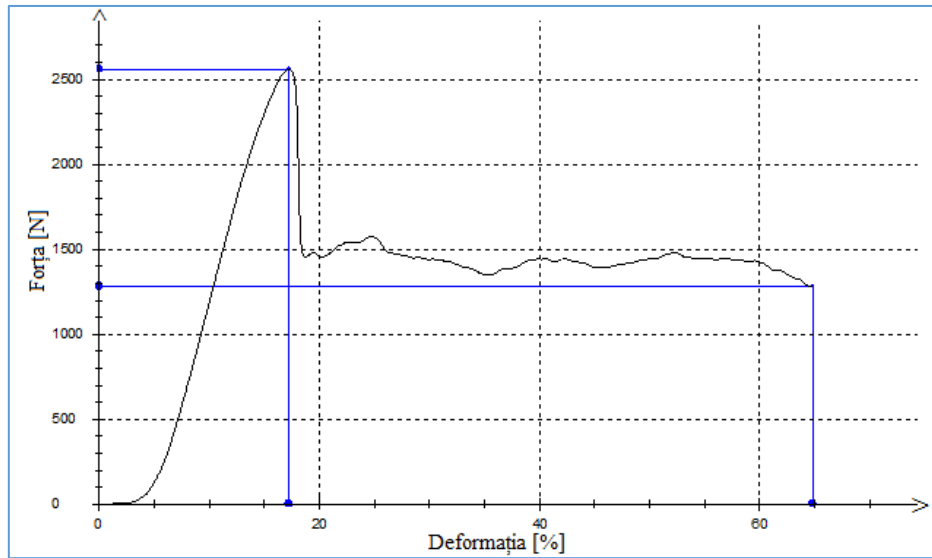


Fig.A.4.59 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 5)

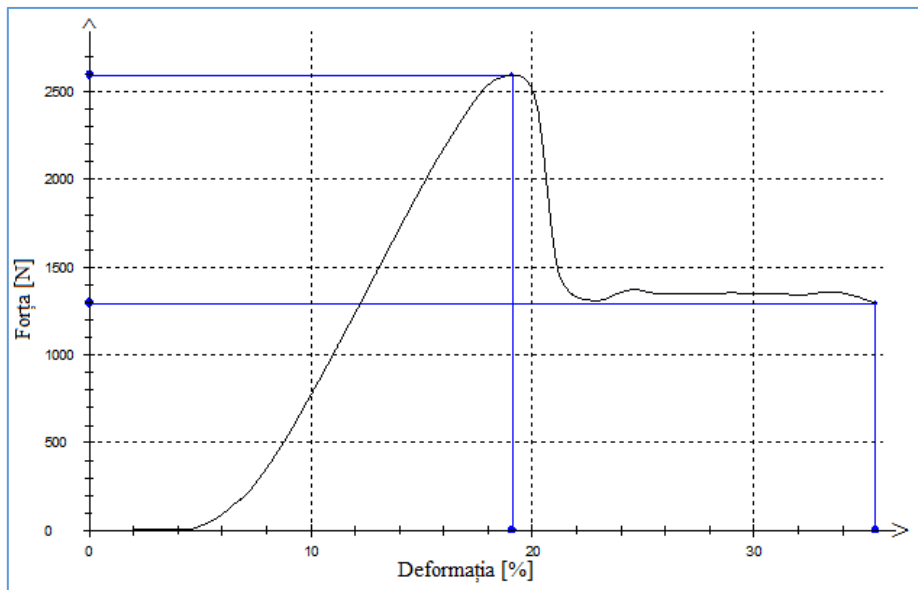


Fig.A.4.60 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 5)

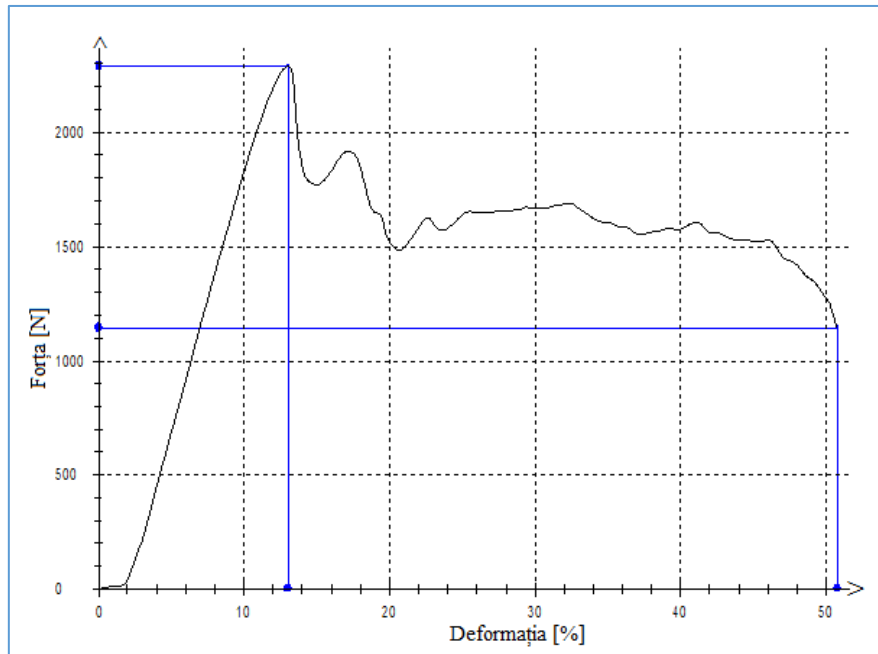


Fig.A.4.61 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 6)

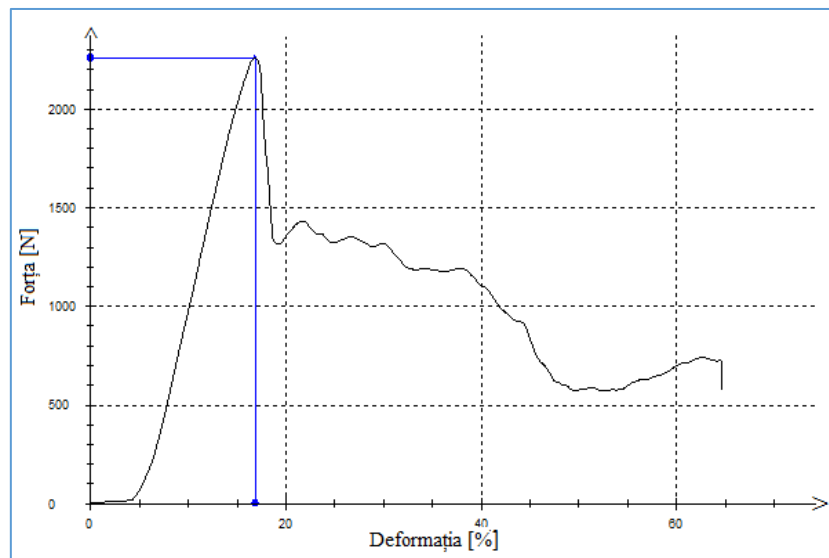


Fig.A.4.62 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 6)

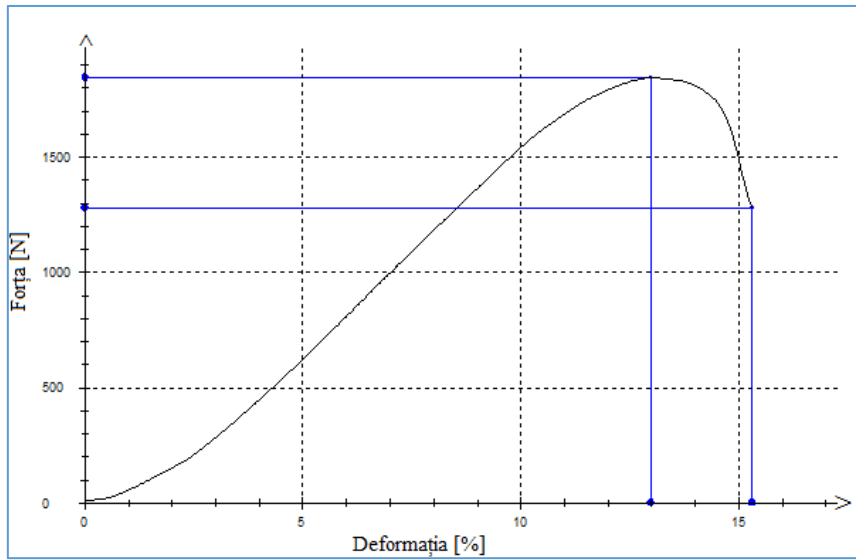


Fig.A.4.63 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 6)

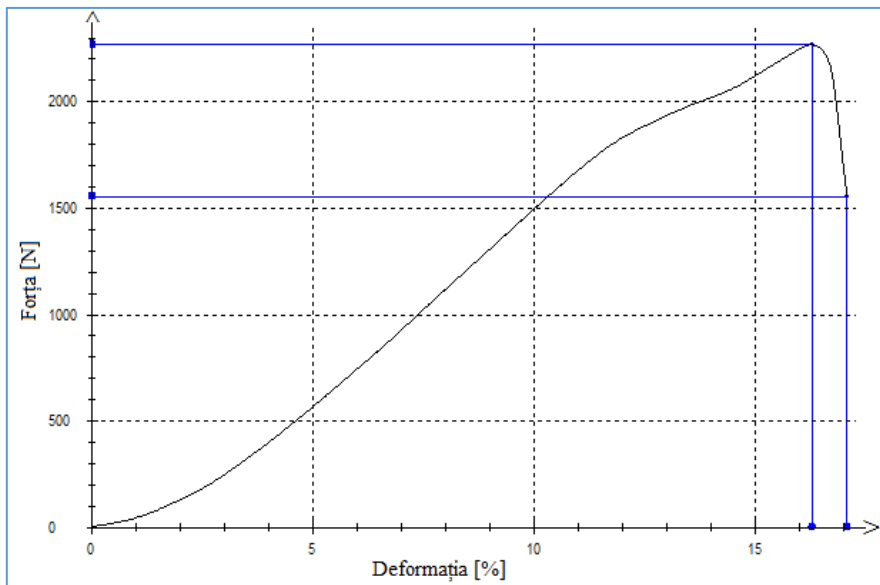


Fig.A.4.64 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 7)

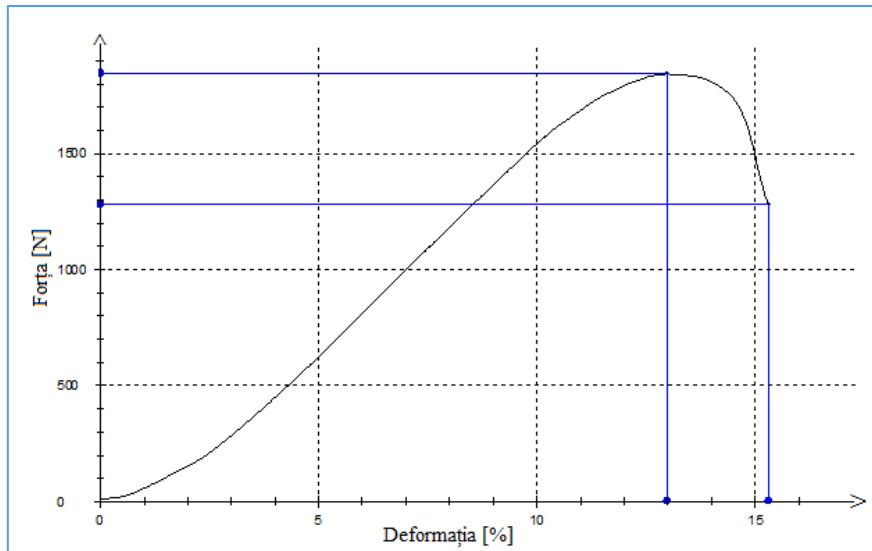


Fig.A.4.65 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 7)

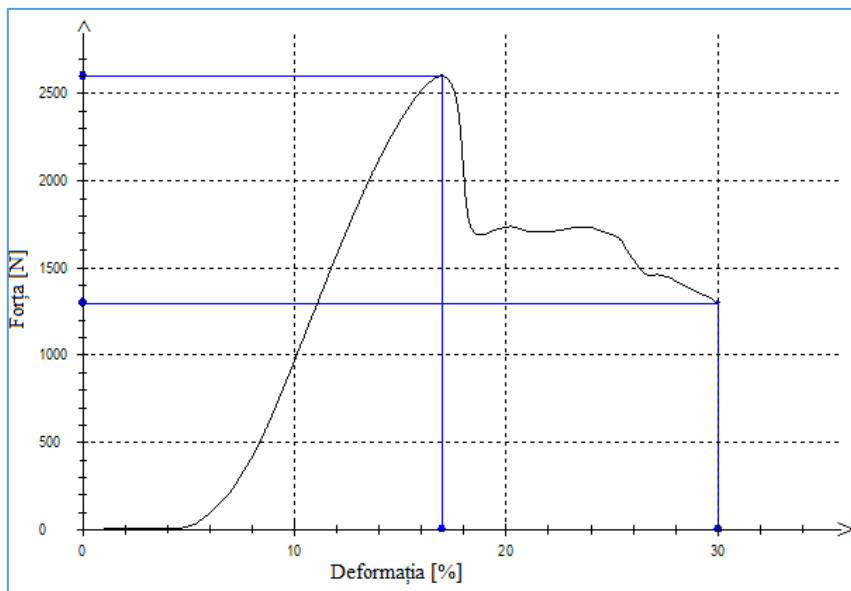


Fig.A.4.66 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 7)

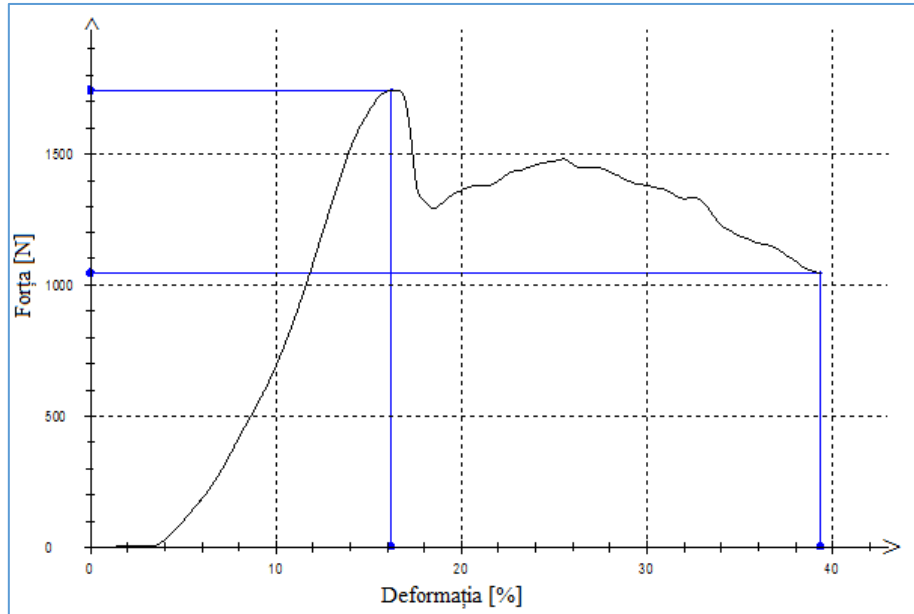


Fig.A.4.67 Dependența forță -deformație pentru proba 1 (rețeta8)

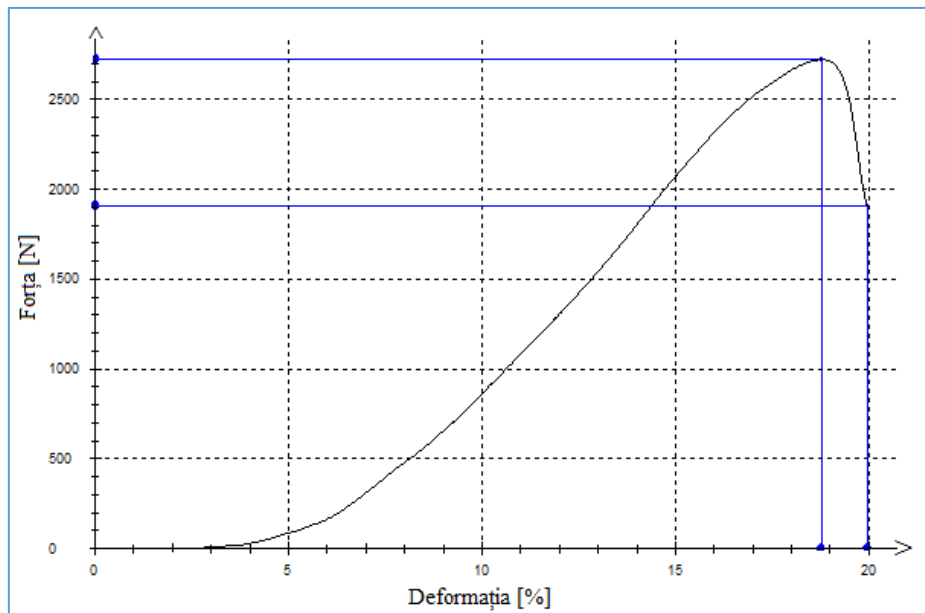


Fig.A.4.68 Dependența forță -deformație pentru proba 2 (rețeta 8)

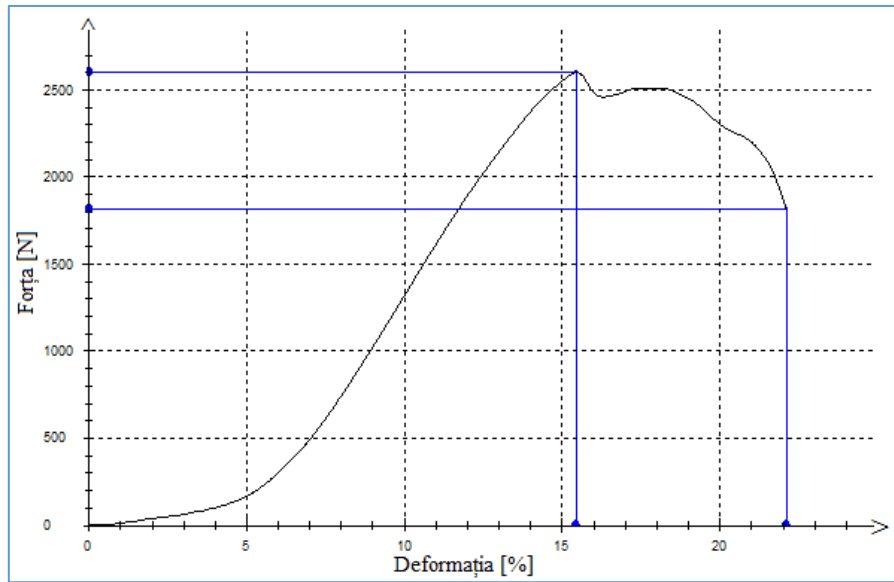


Fig.A.4.69 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 8)

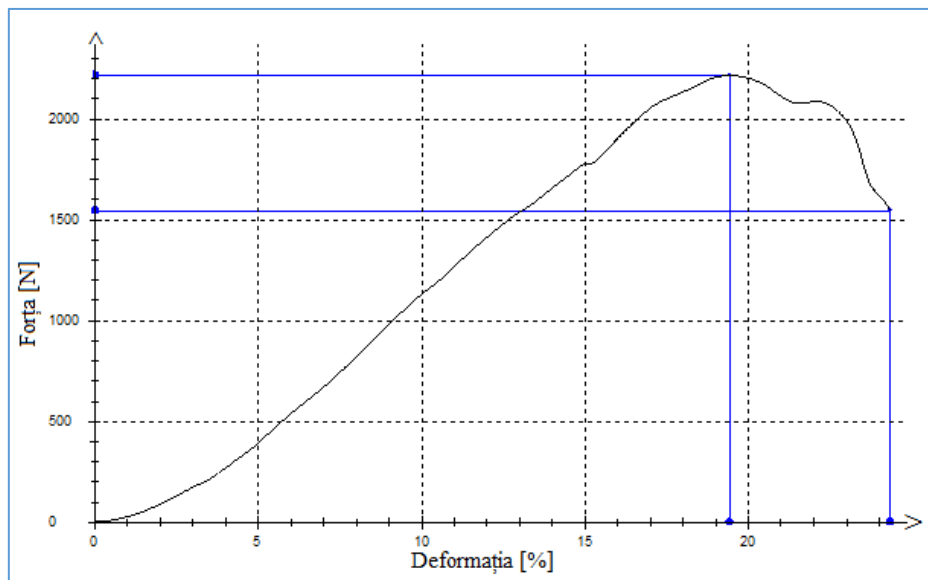


Fig.A.4.70 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 9)

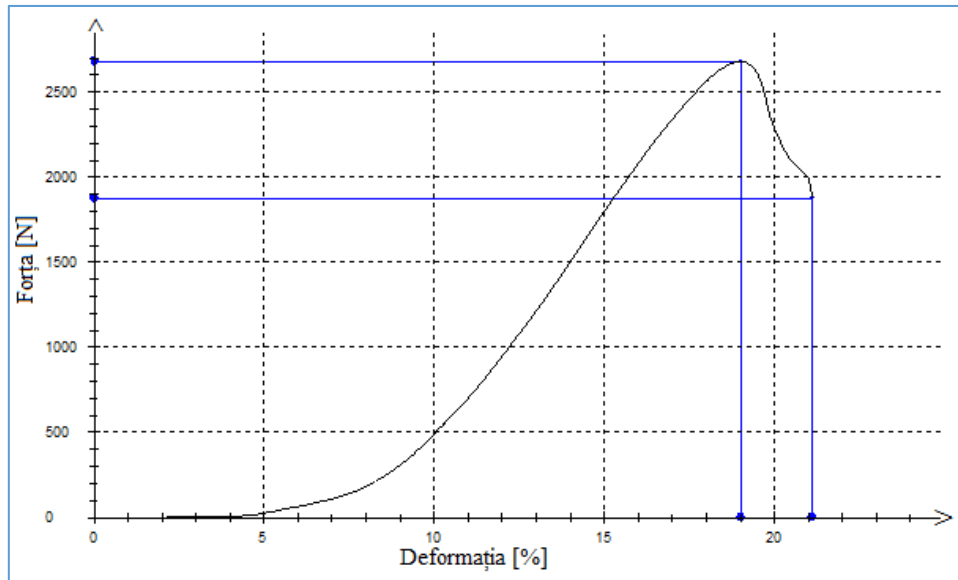


Fig.A.4.71 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 9)

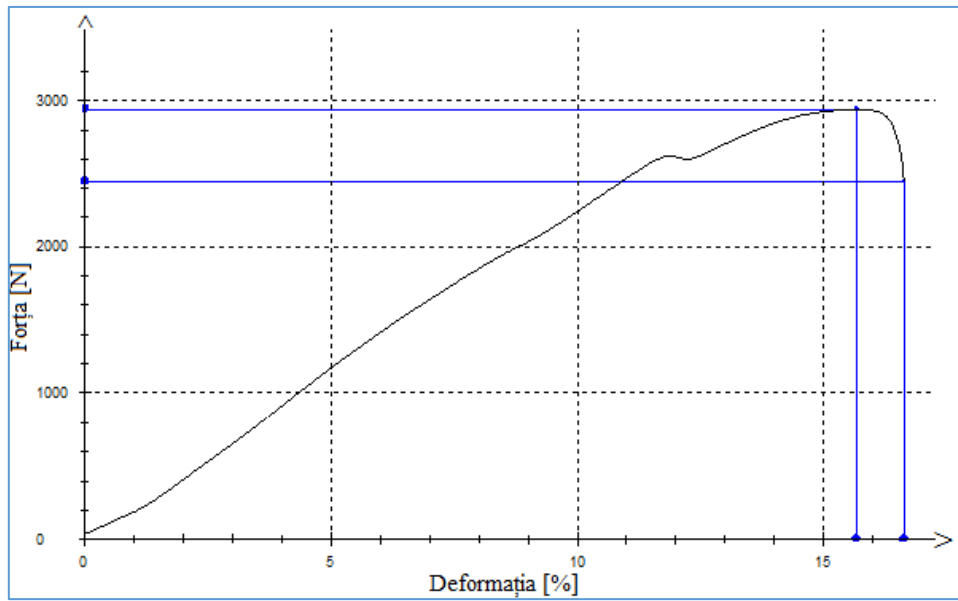


Fig.A.4.72 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 9)

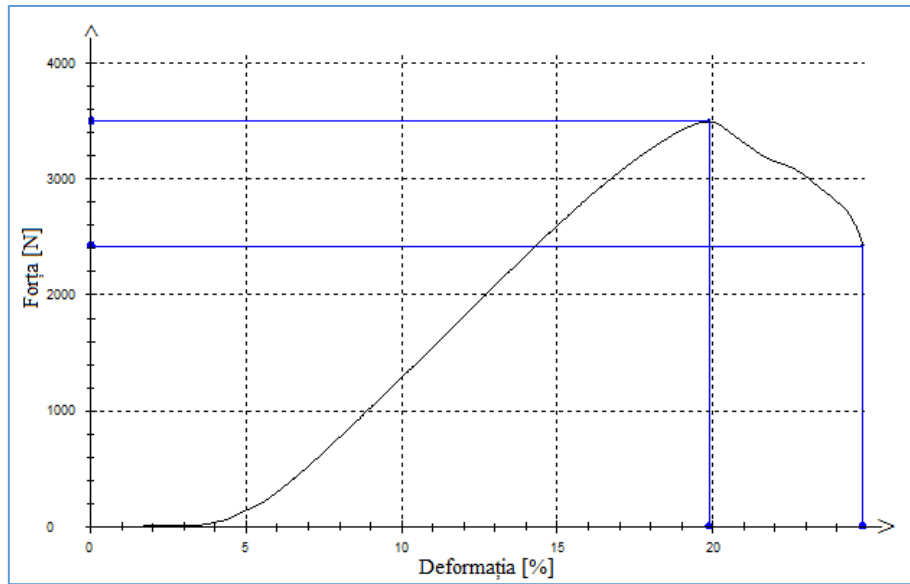


Fig.A.4.73 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 10)

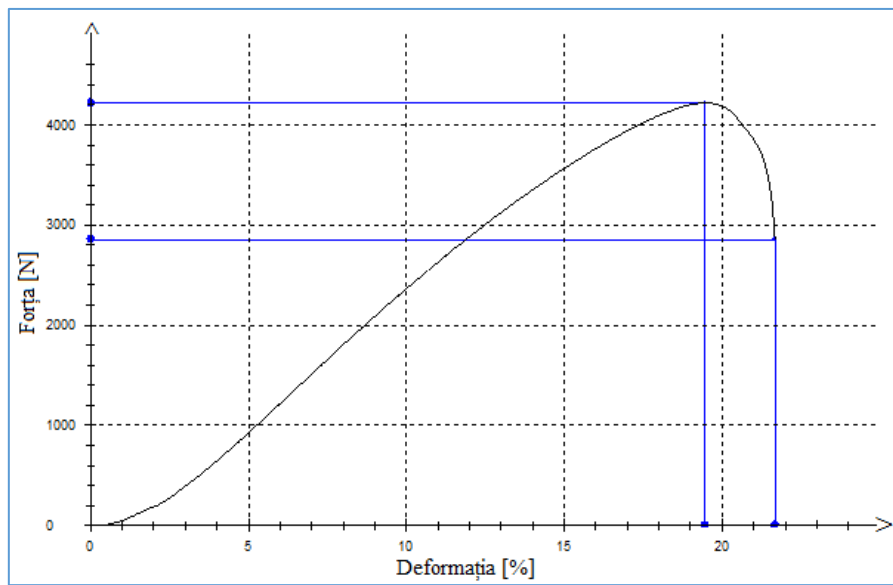


Fig.A.4.74 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 10)

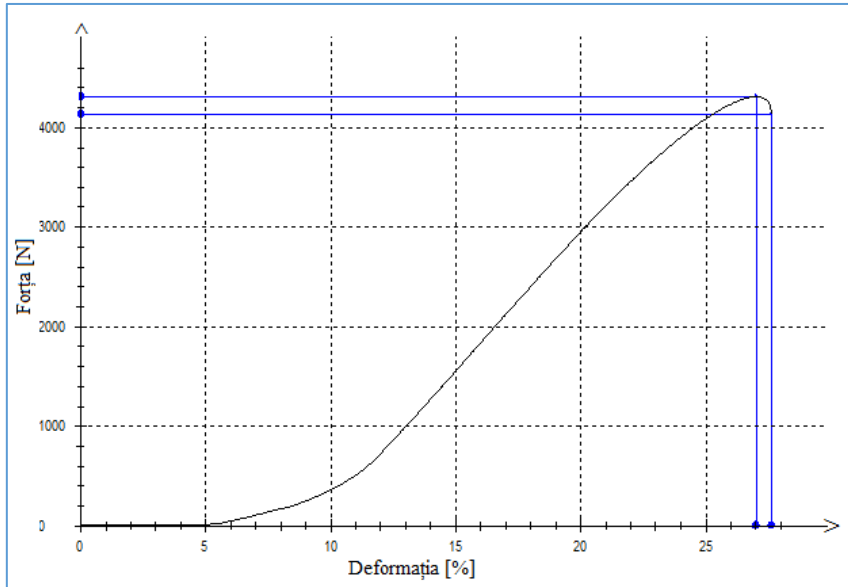


Fig.A.4.75 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 10)

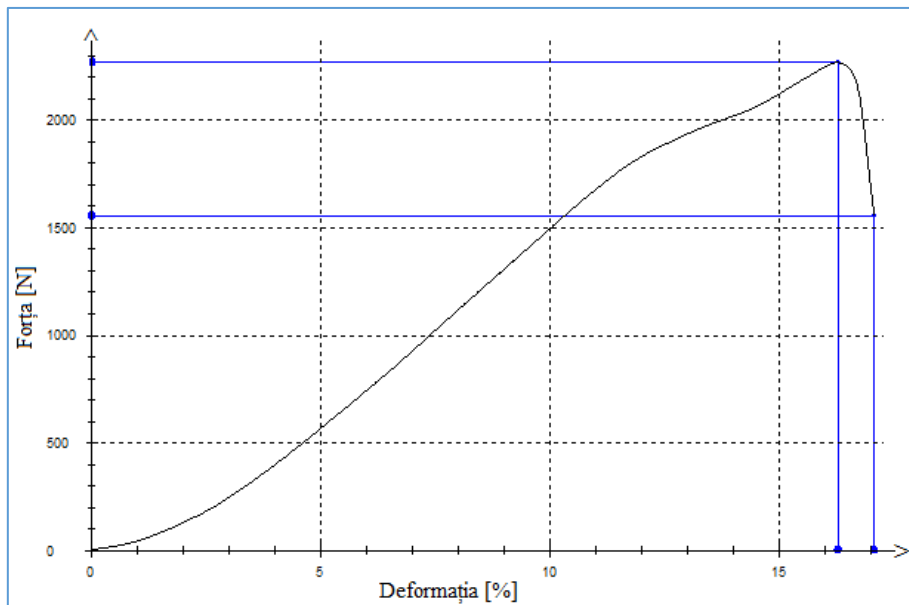


Fig.A.4.76 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 11)

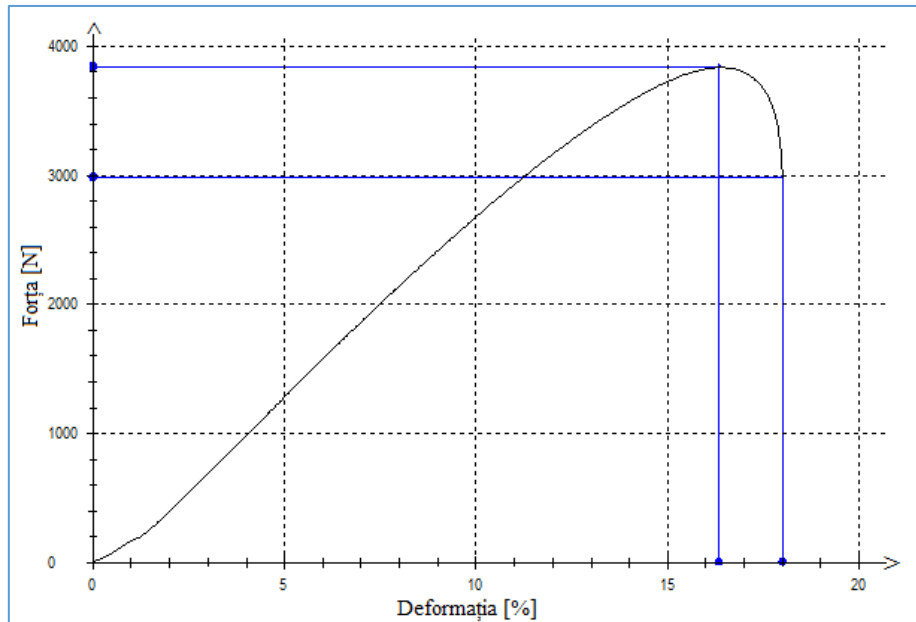


Fig.A.4.77 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 11)

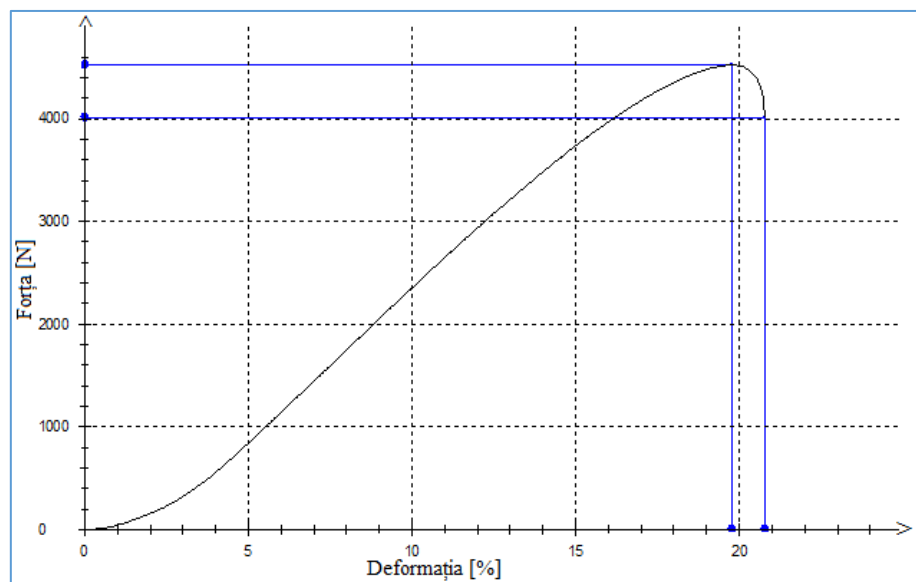


Fig.A.4.78 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 11)

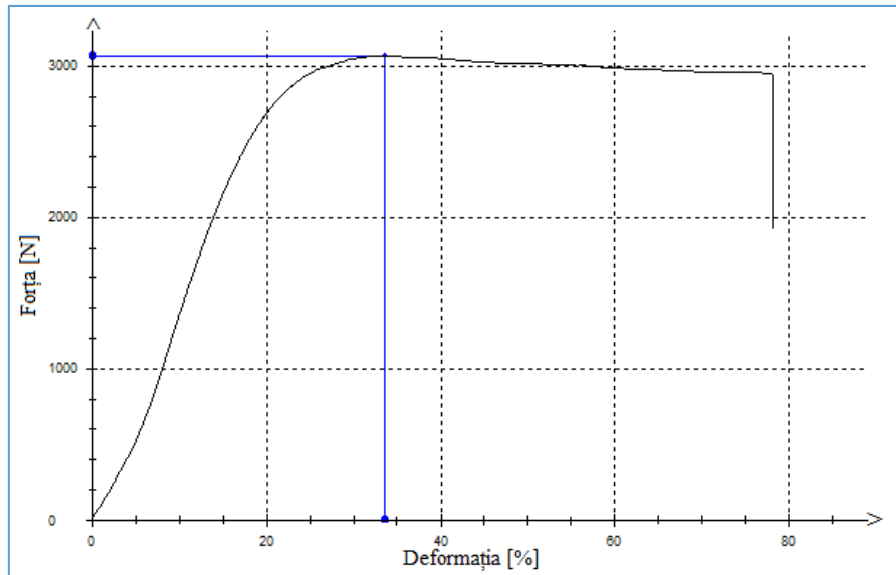


Fig.A.4.79 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 12)

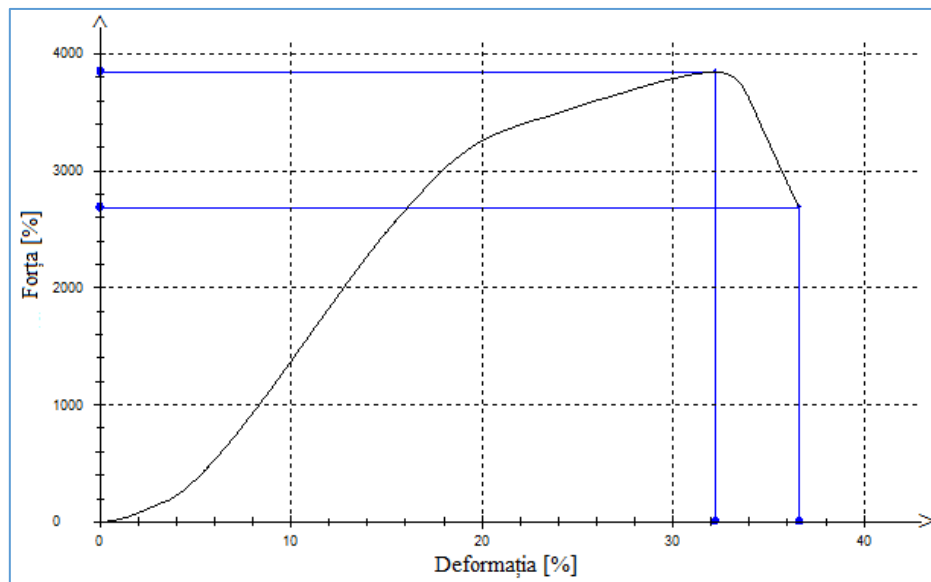


Fig.A.4.80 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 12)

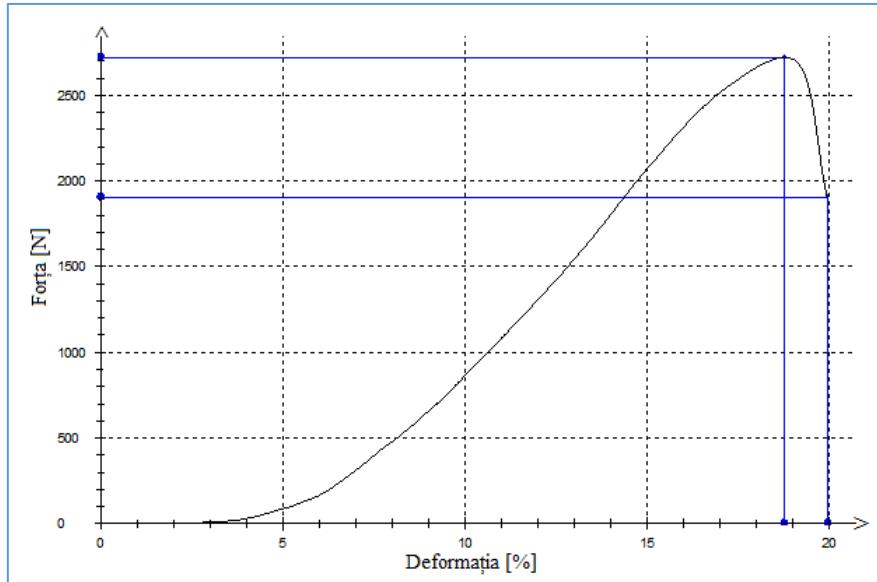


Fig.A.4.81 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 12)

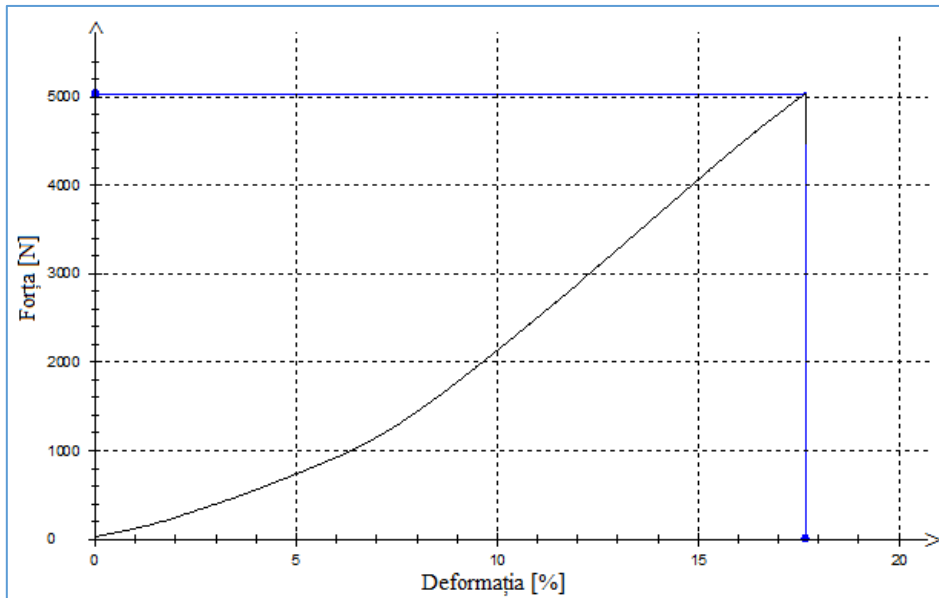


Fig.A.4.82 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 13)

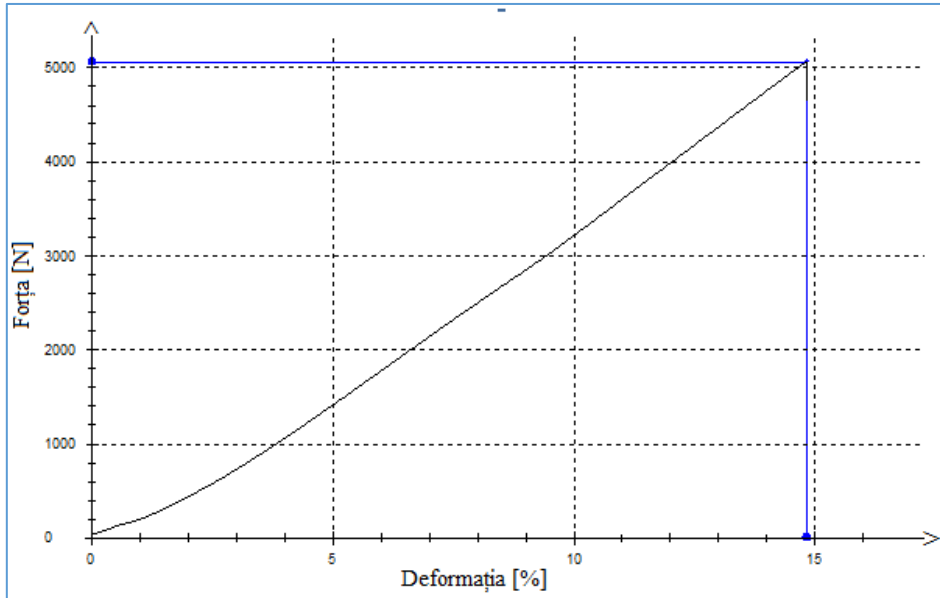


Fig.A.4.83 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 13)

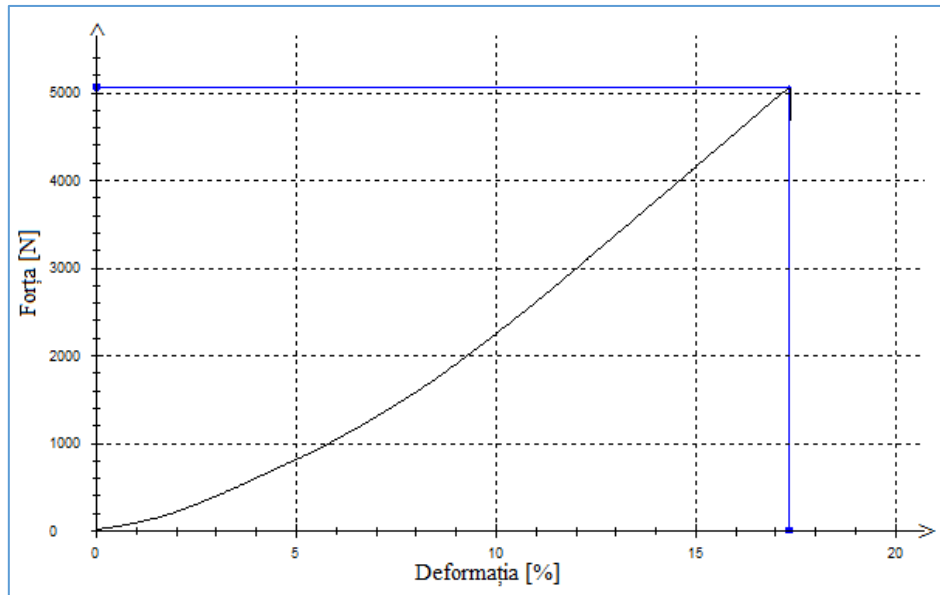


Fig.A.4.84 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 13)

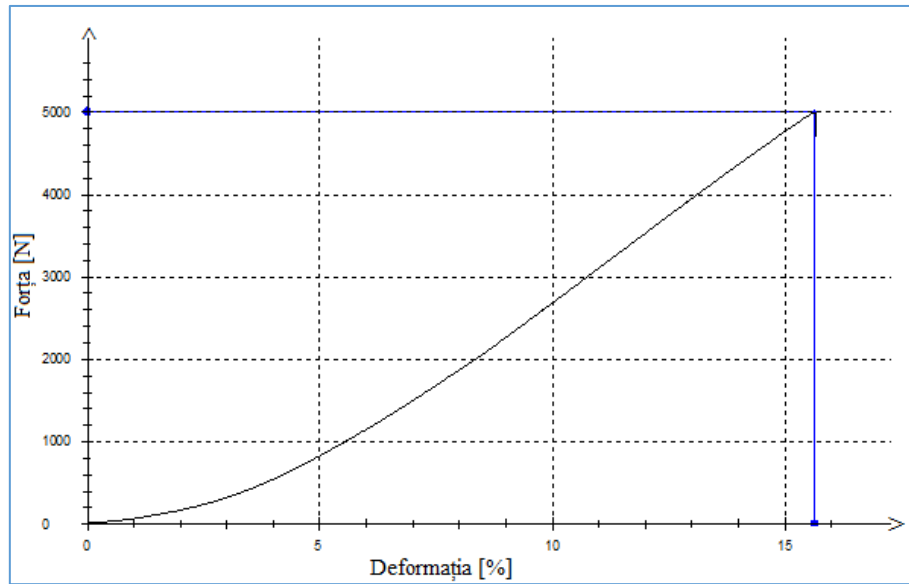


Fig.A.4.85 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 14)

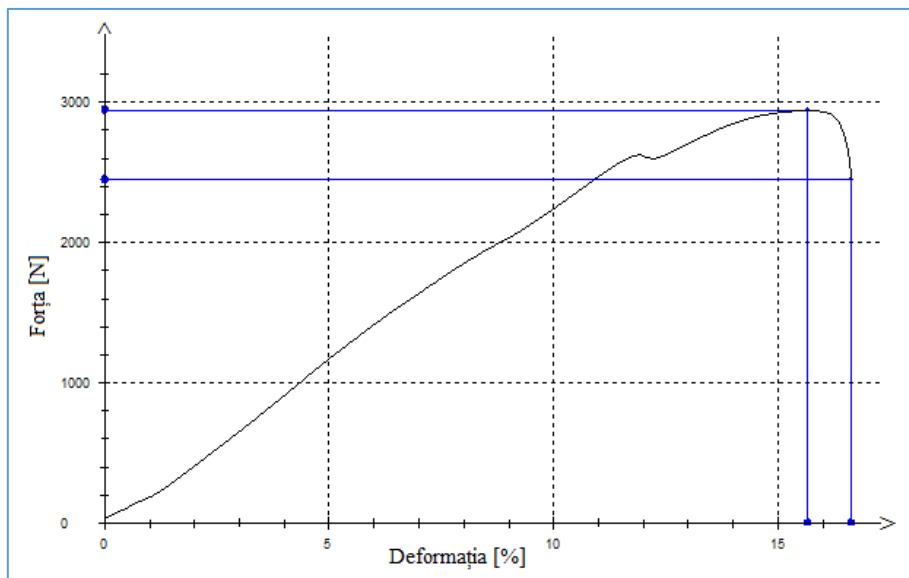


Fig.A.4.86 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 14)

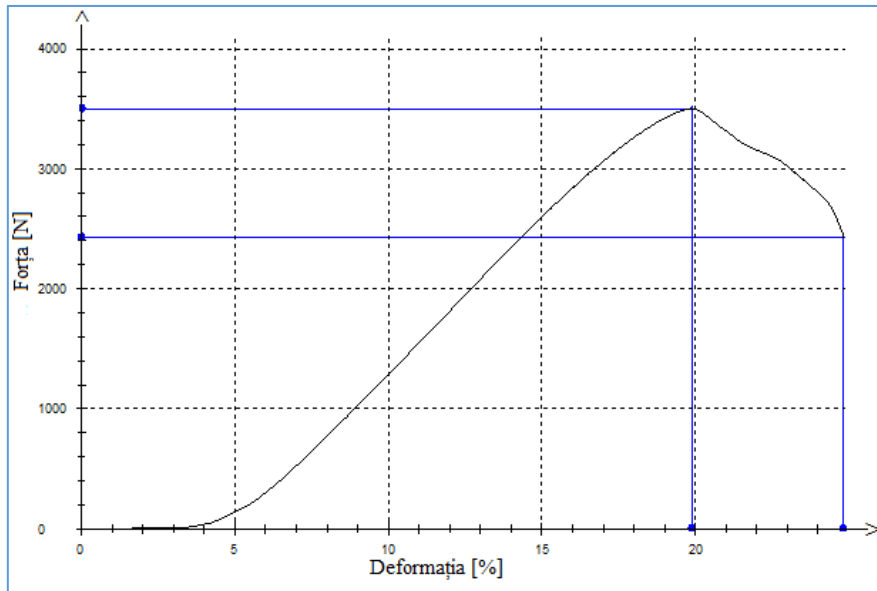


Fig.A.4.87 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 14)

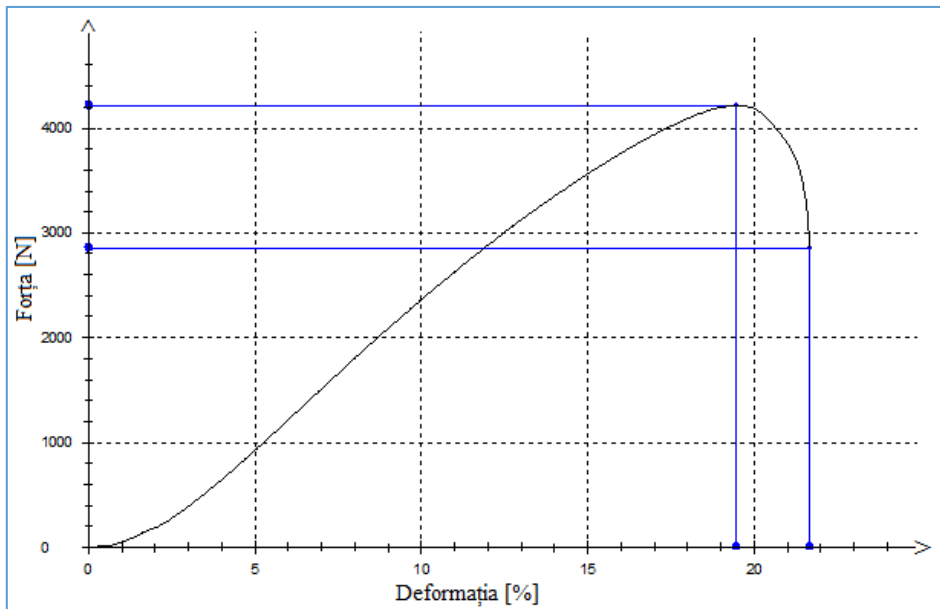


Fig.A.4.88 Dependența forță –deformație pentru proba 1 (rețeta 15)

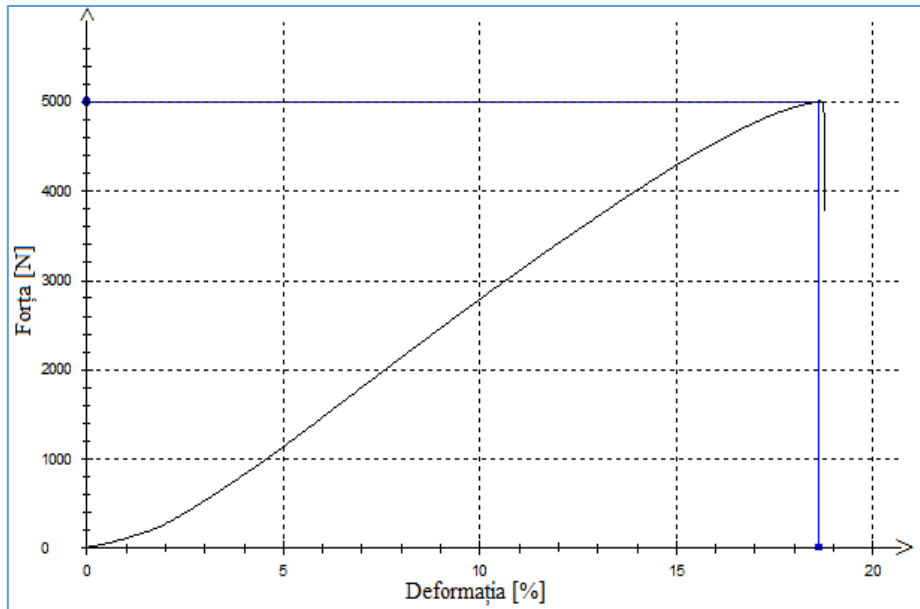


Fig.A.4.89 Dependența forță –deformație pentru proba 2 (rețeta 15)

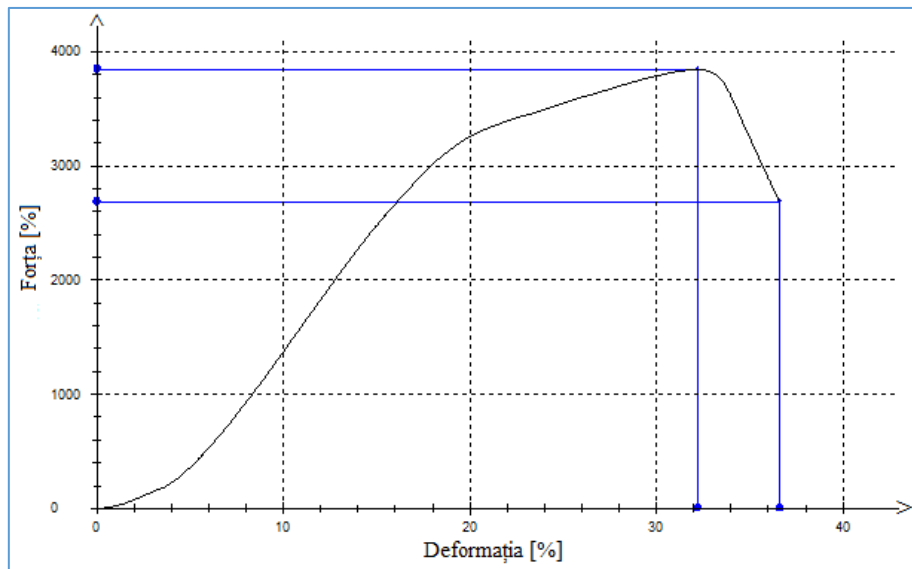


Fig.A.4.90 Dependența forță –deformație pentru proba 3 (rețeta 15)