UNIVERSITATEA TRANSILVANIA
DIN BRAȘOV

UNIVERSITÉ DE LIMOGES
FRANCE

Ing. Diana Cătălina CAZANGIU

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducători științifici

Prof.dr.ing. Ileana-Constanța ROȘCA
Universitatea Transilvania din Brașov

M.d.C. Hdr Ioan Octavian POP
Universitatea din Limoges, Franța

BRAȘOV, 2015

INVESTEŞTE ÎN OAMENI!
Investeşte în oameni!
FONDUL SOCIAL EUROPEAN
Programul Operaţional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013
Axa prioritară 1 „Educaţie şi formare profesională în sprijinul creşterii economice şi dezvoltării societăţii bazate pe cunoaştere”
Domeniul major de intervenţie 1.5. „Programe doctorale şi post-doctorale în sprijinul cercetării”
Titlul proiectului: Burse doctorale şi postdoctorale pentru cercetare de excelenta
Numărul de identificare al contractului: POSDRU/159/1.5/S/137516
Beneficiar: Universitatea Transilvania din Braşov

Ing. Diana Cătălina CAZANGIU

TEZĂ DE DOCTORAT

Titlu: STUDII ŞI CERCETĂRI PRIVIND DETECTAREA DEFECTELOR ÎN STRUCTURI

Title: STUDIES AND RESEARCHES REGARDIND DAMAGE DETECTION IN STRUCTURES

Titre: CARACTÉRISATION DES PROCESSUS D'ENDOMMAGEMENT DES MATÉRIAUX COMPOSITES À BASE DE FIBRES DE CARBONE

Domeniul de doctorat: Inginerie mecanică

Comisia de analiză a tezei:

Prof.dr.ing. Olimpiu MUNTEANU, Universitatea Transilvania din Braşov Decan al Facultăţii DPM	Preşedinte
Prof.dr.ing. Ileana-Constanţa ROŞCA, Universitatea Transilvania din Braşov	Conducător ştiinţific
M.d.C. Hdr. dr. Ioan Octavian POP, Université de Limoges, France	Conducător ştiinţific
Prof.dr.ing. Mariana ARGHIR, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, România	Referent oficial
M.d.C. Hdr.dr. Rostand MOUTOU-PITTI, Polytech Clermont-Ferrand, Institut Pascal (UBP-CNRS-IFMA), France	Referent oficial
M.d.C. dr. Fateh FAKHARI-TEHRANI, Conservatoire National des Arts et Métiers Limousin, France	Referent oficial

Data susţinerii: 06/11/2015

CUPRINS

Cuprins 1
Lista notațiilor și simbolurilor 3
Index de termeni 4
Figuri și tabele 5
Cap. **1. Introducere** 11
Cap. **2. Stadiul actual al cercetării privind detectarea defectelor în structuri** 15
2.1. Generalități privind conceptul de monitorizare a calității structurilor 15
2.2. Structuri în diverse domenii 38
2.3. Metode de analiză a calității structurilor 44
2.4. Concluzii 61
2.4.1. Concluzii privind monitorizarea calității structurilor 61
2.4.2. Concluzii privind analiza defectelor structurale 62
2.4.3. Concluzii privind analiza calității funcționării 64
Cap. **3. Obiectivele tezei de doctorat** 65
Cap. **4. Contribuții la modelarea/simularea structurilor** 67
4.1. Relații de calcul analitic la studiul și analiza plăcilor plane dreptunghiulare 67
4.1.1 Calculul analitic al materialelor compozite stratificate 69
4.1.2. Solicitarea la încovoiere a stratificatului cu simetrie tip oglindă 71
4.2. Generalități privind metodele numerice de analiză structurală 73
4.3. Alegerea structurilor pentru aplicații 78
4.4. Modelarea structurilor 81
4.5. Simularea răspunsului structurilor analizate 83
4.6. Rezultate. Discuții 90
4.6.1. Rezultate FEM pentru regimul de zbor staționar (hovering–grounding) 90
4.6.2. Rezultate ale analizei cu FEM pentru regimul de zbor cu înaintare 93
4.6.3. Rezultate ale analizei FEM pentru pala reculantă α=0,51° (F = 3800 N) 94
4.6.4. Rezultate ale analizei FEM pentru pala avansată α = 2,34° (F=3800 N) 95
4.6.5. Rezultate ale analizei FEM pentru cazul pală rotor oprit 97
4.6.6. Rezultate ale analizei comparative pentru cazurile de solicitare aplicate 97
4.6.7. Rezultate ale simulării solicitării epruvetei la încovoierea în 4 puncte 107
4.6.8. Analiză comparativă a valorilor parametrilor: simulare vs. experiment 108
4.7. Concluzii 110
4.7.1. Concluzii privind analiza FEM pentru regimul de zbor la punct fix 110
4.7.2. Concluzii privind analiza FEM în regimul de zbor cu înaintare 111
4.7.3. Concluzii privind analiza FEM a epruvetei din material compozit stratificat 112
Cap. **5. Contribuții experimentale** 113
5.1. Introducere 113
5.2. Proiectarea experimentului 113
5.2.1. Alegerea structurii 113

5.2.2. Alegerea metodei experimentale 115
5.2.3. Descrierea instalației experimentale 119
5.2.4. Condiții de mediu 126
5.3. Obținerea datelor experimentale 127
5.3.1. Încercarea la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici 127
5.3.2. Achiziționarea datelor experimentale în urma încercării de încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici 131
5.3.3. Achiziționarea datelor experimentale în urma încercării de încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acustici 133
5.3.4. Încercarea la tracțiune cu utilizarea traductorilor tensometrici 135
5.4. Prelucrarea datelor experimentale 136
5.4.1. Procesarea datelor obținute în urma încercării la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici 136
5.4.2. Procesarea datelor obținute în urma încercării la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acustici 143
5.4.3. Procesarea datelor obținute în urma încercării la tracțiune 150
5.5. Rezultate. Discuții. Concluzii 154
5.5.1. Rezultate pentru testul de încovoiere în 4 puncte cu traductori tensometrici 154
5.5.2. Rezultate pentru testul de încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acustici 158
5.5.3. Rezultate pentru încercarea la tracțiune 161
5.5.4. Analiza rezultatelor de la termografia în infraroșu 164
5.5. Analiza multicriterială pe baza soluțiilor selectate pentru compararea celor 3 sisteme de detectare a defectelor utilizate 173
5.5.1. Stabilirea criteriilor 173
5.5.2. Determinarea ponderii fiecărui criteriu 174
5.5.3. Identificarea tuturor variantelor 174
5.5.4. Acordarea unei note 177
5.5.5. Calcularea produselor dintre notele N şi coeficientul de pondere 177
5.5.6. Discuții 178
5.6. Concluzii 182
Cap. **6. Concluzii finale. Contribuții originale. Diseminarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare** 185
6.1. Concluzii finale 185
6.2. Contribuții personale și originale 191
6.2.1. Contribuții originale teoretice 191
6.2.2. Contribuții originale experimentale 192
6.3. Valorificarea cercetării 192
6.4. Direcții viitoare de cercetare 195
Bibliografie 196
Anexe 201

LISTĂ NOTAȚIILOR ȘI SIMBOLURILOR

C_D – Coeficientul de rezistenţă la înaintare
C_L – coeficientul de portanţă
C_m – coeficientul de moment al elementului de pală
E – modului lui Young
F_D – rezistenţa la înaintare
F_L – portanţa
F_{cf} – forţa centrifugă
G – modului de forfecare
M – momentul aerodinamic
m – masa palei pe tronson
R – raza rotorului
V – viteza aerodinamică (viteza aerului faţă de elicopter)
ν - coeficientul lui Poisson
σ_c – tensiunea transversală la compresiune
σ_t – tensiunea transversală la tracţiune
τ - tensiune tangenţială
α – unghiul de incidenţă
F - forța de rupere
L - distanța între reazeme
L_2 - distanța între elementele de încărcare ale maşinii
L_1 - distanța între primul punct de reazem și primul punct de încărcare
b - lățimea epruvetei,
h - grosimea epruvetei,
δ - deformația la mijlocul epruvetei
E - modulul de elasticitate la încovoiere al epruvetei
R_i, - rigiditatea la încovoiere
σ_{max} - tensiunea maximă la încovoiere
I_z - momentul de inerție față de axa principală
σ - rezistența la tracțiune
p - forța de rupere la tracțiune care se extrage din curba caracteristică forță – deformație
A - aria secțiunii
W_y, W_z - modulele de rezistență ale secțiunii plane în raport cu axa Oy, respectiv Ox
M_{iy}, M_{iz} - momentele de încovoiere pe axa Oy, respectiv Oz
$\Delta\ell$ - deplasarea extrasă din curba caracteristică forță – deplasare
ℓ_0 - lungimea inițială a epruvetei
ℓ_u - distanța ultimă între repere după alungire
p - suma punctelor obţinute pe linie de elementul luat în calcul
Δp - diferenţa dintre punctajul elementului luat în calcul şi punctajul elementului de la ultimul nivel
m - numărul criteriilor depăşite de către criteriul luat în calcul
N_{crt} - numărul de criterii considerat
$\Delta p'$ - diferenţa dintre punctajul elementului luat în calcul şi punctajul primului element

INDEX DE TERMENI

EXTRADOS- partea superioară a conturului unui profil de aviaţie cuprinsă între bordul de atac şi bordul de scurgere, pe care în timpul zborului se exercită o depresiune.

FORŢĂ AERODINAMICĂ - forţa exercitată de un fluid gazos în mişcare asupra unui corp aflat în întregime în acel fluid. Forţa aerodinamică totală este rezultanta tuturor forţelor de presiune care apar pe corpul introdus în fluid.

FUZELAJ - parte componentă a unei aeronave, profilată aerodinamic, constituind spaţiul util de transport. Fuzelajul uneşte celelalte părţi ale aeronavei (aripi, ampenaj, tren de aterizare etc.).

UNGHI DE INCIDENŢĂ - unghi format de linia de referinţă a profilului aripii unei aeronave (coarda profilului, axa de portanţă nulă sau bitangentă la intrados) cu direcţia ei de înaintare.

INTRADOS - a) faţa inferioară a aripii unei aeronave pe care se exercită presiuni în timpul zborului; b) linia inferioară a conturului unui profil aerodinamic (între bordul de atac şi de scurgere).

ÎNVELIŞ - îmbrăcămintea exterioară a elementelor aeronavei (aripi, fuzelaj, comenzi) confecţionată din pânză, lemn sau metal şi care preia în mare parte eforturile exercitate asupra aeronavei.

MOMENT AERODINAMIC - cuplul forţelor aerodinamice ce acţionează asupra unei aeronave în mişcare relativă faţă de mediul aerian, găsindu-se în raport cu centrul de masă al acesteia.

PALĂ - organ al unei elice, de forma unei aripi, încastrat sau articulat la unul din capete în butucul elicei / rotorului şi care are rolul de a transfera energia rotorului în mediul în care se roteşte.

PLANARE - a) plutire în aer cu un aparat de zbor fără ajutorul unui motor; b) coborâre a unei aeronave fără motor (sau redus) pe o traiectorie cu pantă foarte mică şi cu viteză redusă.

PORTANŢA - componenta verticală a forţei aerodinamice care acţionează asupra unui corp de profil aerodinamic care se deplasează prin aer, asigurându-i sustentaţia, stând la baza zborului planoarelor, elicopterelor etc. Portanţa apare ca urmare a diferenţei de presiune statică ce apare între cele două forţe opuse ale profilului, consecinţă a vitezelor diferite ale fileelor de aer în vecinătatea acestor feţe.

PROFIL AERODINAMIC - a) conturul secţiunii unei aripi (sau a unei pale), rezultată din intersecţia cu un plan perpendicular pe suprafaţa aripii şi paralel cu axa de zbor (trasarea profilului aerodinamic se face printr-o metodă teoretică sau empirică); Profilul aerodinamic este compus din: bord de atac - rotunjit, bord de fugă sau de scurgere - ascuţit, parte superioară/extrados şi parte interioară/intrados.

REZISTENŢĂ AERODINAMICĂ/LA ÎNAINTARE - forţă care acţionează asupra unui corp aflat în mişcare relativă faţă de aerul atmosferic, în sens opus deplasării, proporţională cu densitatea aerului, cu pătratul vitezei relative a corpului, cu suprafaţa caracteristică de referinţă a acestuia şi cu coeficientul de rezistenţă la înaintare. Rezistenţa aerodinamică contribuie la reducerea vitezei de coborâre în vederea aterizării unei aeronave sau a unei părţi recuperate a acesteia.

ROTOR - elice de mare diametru, cu pale mobile sau articulate (cu mai multe planuri de oscilaţie), care obţine forţa portantă necesară unui elicopter sau a altui tip de aeronavă, putând dezvolta această forţă şi când nu este angrenată de motor, întrând în autorotaţie, aparatul aterizând în deplină siguranţă când motorul este oprit sau defect.

SINCROPTER - aeronavă rezultat al combinării elicopterului cu rotoare coaxiale şi a elicopterului cu rotoare alăturate.

ZBOR LA PUNCT FIX - regim în care elicopterul se menţine la o anumită înălţime faţă de sol fără a înainta, e important în operaţiuni speciale (salvare, remorcare, desant aeropurtat şi antisubmarin etc.).

LISTĂ FIGURI

Fig. 2.1. Interconectarea multi – domeniu în vederea proiectării sistemelor SHM
Fig. 2.2. Interconectarea multi – disciplinară în vederea estimării duratei de viață a unei structuri
Fig. 2.3. Rolul sistemelor SHM în diagnoza și estimarea duratei de viață a structurilor
Fig. 2.4. Accidentul zborului 243 al companiei Aloha Airlines din 29 aprilie 1988 datorat coroziunii insuficient controlate în etapa de mentenanță
Fig. 2.5. Avantajul din punct de vedere economic al sistemelor SHM pentru utilizatori
Fig. 2.6. Senzor de emisie acustică utilizat în cadrul sistemului SHM montat în structura elicopterului
Fig. 2.7 Utilizarea metodei de emisie acustică ca metodă SHM pe un avion de luptă supus unor teste de oboseală
Fig. 2.8. Pelicula de senzori PZT
Fig. 2.9. Montajul realizat pentru determinarea comportării la impact a structurii aeronavei
Fig. 2.10. Montaj experimental pentru detectarea delaminării unei structuri de fuzelaj pentru elicopterul AW 139
Fig. 2.11 Schema ”benzii inteligente”
Fig. 2.12 Actuatori piezoceramici, lipiți pe învelișul compozit de carbon/epoxy al cozii unui aeronave tip F/A-18 pentru a reduce răspunsul vibrațiilor datorită fenomenelor aero-elastice (buffeting)
Fig. 2.13. Exemplu de structură naturală
Fig. 2.14. Exemplu de structură prelucrată
Fig. 2.15. Exemplu de structură arhitecturală
Fig. 2.16. Exemplu de structură mecanică
Fig. 2.17. Exemplu de structură masivă
Fig. 2.18. Exemplu de structură laminară
Fig. 2.18. Exemple de structuri cu cadre
Fig. 2.19. Exemplu de structură cu grinzi
Fig. 2.20. Exemplu de structuri suspendate
Fig. 2.21. Evoluția generală a materialelor/structurilor și poziția structurilor inteligente, inclusiv structurile cu sisteme SHM
Fig. 2.22. Exemplu al creșterii importanței materialelor compozite la aeronavele civile
Fig. 2.23. Ciclu universal de asigurare a calității funcționale
Fig. 2.24. Traductor rezistiv cu fire lipite
Fig. 2.25. Traductoare rezistive simple
Fig. 2.26. Rozete cu două direcții de măsurare
Fig. 2.27. Rozete cu trei direcții de măsurare
Fig. 2.28. Polariscop circular
Fig. 2.29. Franje Moiré obținute printr-o mică rotire a rețelei
Fig. 2.30. Principiul detectării defectelor cu ultrasunete
Fig. 2.31. Modul de așezare a două traductoare pentru utilizarea undelor Lamb
Fig. 2.32. Montaj realizat pentru detectarea defectelor prin metoda corelării imaginilor video
Fig. 2.33. Extragerea punctelor de calibrare
Fig. 2.34. Principiul de măsurare bazat pe procedura de scanare

Fig. 3.1. Motivația economică a integrării sistemelor moderne de detectare a defectelor
Fig. 4.1. Reprezentarea sistemului de referință la plăcile plane subțiri
Fig. 4.2. Modul de deformație al plăcii plane subțiri
Fig. 4.3. Stratificat plan cu simetrie tip oglindă, solicitat la încovoiere
Fig. 4.4. Cele patru forţe care acţionează asupra unei aeronave în zbor
Fig. 4.5. Dimensiunile principale ale epruvetei de material compozit
Fig. 4.6. Geometria şi dimensiunile palei de elicopter
Fig. 4.7. Caracteristicile straturilor de fibră de carbon din construcția epruvetei
Fig. 4.8. Modelul geometric al epruvetei de fibră de carbon
Fig. 4.9. Model 3D pala elicopter
Fig. 4.10. Model 3D pala elicopter – vedere ”render”
Fig. 4.11. Introducerea materialelor în modelul 3D al palei
Fig. 4.12 Aplicarea forței distribuite pe noduri
Fig. 4.13 Cazul solicitării la încovoiere în 4 puncte
Fig. 4.14 Aplicarea încărcărilor și stabilirea condițiilor la limită
Fig. 4.15 Stabilirea condițiilor de legătură (introducerea constrângerilor în sistem)
Fig. 4.16. Discretizarea palei de elicopter: a) pe toata lungimea; b) zona de încastrare lonjeron
Fig. 4.17. Introducerea constrângerilor pentru zona de încastrare
Fig. 4.18. Coarda profilului
Fig. 4.19. Grosimea maximă a profilului
Fig. 4.20. Polarele profilului BELL/WORTMANN FX 69-H-098
Fig. 4.21. Poziţia palei faţă de axa orizontală (poziţia de echilibru)
Fig. 4.22. Încărcările care au fost aplicate asupra palei de elicopter
Fig. 4.23. Poziţia palelor
Fig. 4.24. Deplasarea maximă totală δ = 226 mm (deplasare scalată)
Fig. 4.25. Deplasarea maximă $U_z\delta$ = 169 mm (deplasare scalată)
Fig. 4.26. Deformaţia locală pe lonjeron (ε = 0.006%)
Fig. 4.27. Tensiunea von Mises maximă pe lonjeron (σ = 78 N/mm^2)
Fig. 4.28. Tensiunea von Mises locală pe lonjeron (σ = 14 N/mm^2)
Fig. 4.29. Variaţia tensiunii echivalente în lungul palei
Fig. 4.30. Modelul pală avansantă – pală reculantă
Fig. 4.31. Unghiurile poziţiei de echilibru: a) pala reculantă, b) pala avansantă
Fig. 4.32. Tensiunea von Mises maximă pe lonjeron (σ = 57 N/mm^2)
Fig. 4.33. Tensiunea von Mises locală pe lonjeron (σ = 25 N/mm^2)
Fig. 4.34. Variaţia tensiunii echivalente în lungul palei
Fig. 4.35. Tensiunea von Mises maximă pe lonjeron (σ = 198 N/mm^2)
Fig. 4.36. Tensiunea von Mises locală pe lonjeron (σ= 48 N/mm^2)
Fig. 4.37. Variatia tensiunii echivalente in lungul palei
Fig. 4.38. Tensiune maximă pală σ = 66 N/mm^2
Fig. 4.39. Variația tensiunilor echivalente: învelis vs. lonjeron
Fig. 4.40. Variaţia tensiunilor echivalente pe *înveliş*
Fig. 4.41. Variaţia tensiunilor echivalente pe *lonjeron*
Fig. 4.42. Variatia tensiunilor echivalente pe *înveliş*
Fig. 4.43. Variaţia tensiunilor echivalente pe *lonjeron*

Fig. 4.44. Variaţia tensiunilor σ_1 pe înveliș și lonjeron pentru cele 4 cazuri de solicitare
Fig. 4.45. Variaţia tensiunilor σ_3 pe înveliș și lonjeron pentru cele 4 cazuri de solicitare
Fig. 4.46. Harta deformațiilor pentru epruveta din compozit stratificat
Fig. 4.47. Harta tensiunilor von Mises la nivel macroscopic
Fig. 4.48. Harta tensiunilor la nivel microscopic (interlaminar)
Fig. 4.49 Curba caracteristică deformație – tensiune: comparație simulare vs. experiment
Fig. 5.1. Configuraţia lamelelor stratificatului compozit
Fig. 5.2. Epruveta D1 utilizată la încercarea la încovoiere în 4 puncte
Fig. 5.3. Epruvetă din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon - încercarea la tracțiune
Fig. 5.4. Curba tipică efort – deformație la încercarea de încovoiere
Fig. 5.5. Curba caracteristică la tracţiune a unui material compozit
Fig. 5.6. Stand de testare la încovoiere în 4 puncte a epruvetei din compozit armat cu fibră de carbon
Fig. 5.7. Placa de achiziție SPIDER 8
Fig. 5.8. Sistem de detectare a microfisurilor bazat pe metoda emisiei acustice
Fig. 5.9. Mașina de încercări la tracțiune/compresiune tip ZWICK/ROELL Z010
Fig. 5.10. Montaj experimental pentru încercarea la tracțiune a epruvetei din fibră de carbon
Fig. 5.11. Camera de termografie în infraroșu – SC FLIR 7000
Fig. 5.12. Detalii camera de termografie în infraroșu
Fig. 5.13. Montaj experimental – detectarea defectelor la încovoierea în 4 puncte prin termografia în infraroșu
Fig. 5.14. Montaj experimental pentru detectarea defectelor la tracțiune prin termografia în infraroșu
Fig. 5.15 Mărci tensometrice utilizate pentru determinarea deplasărilor în cazul încercării epruvetei la încovoierea în 4 puncte: tip N11–FA–8–350–11 (a); tip N11–MA–5–120–11 (b)
Fig. 5.16. Vizualizare cu ajutorul microscopului a mărcii tensometrice aplicate pe lățimea epruvetei
Fig. 5.17. Vizualizare mărci tensometrice aplicate pe grosimea epruvetei
Fig. 5.18. Montaj experimental pentru încercarea la încovoiere în 4 puncte
Fig. 5.19. Detaliu cu modul de poziționare al senzorilor pe suprafața epruvetei în timpul încercării la încovoiere
Fig. 5.20. Încercarea la încovoiere în 4 puncte – etapa intermediară
Fig. 5.21. Încercarea la încovoiere în 4 puncte – etapa finală de rupere a epruvetei
Fig. 5.22. Modul de distrugere a senzorilor aplicați pe suprafața epruvetei
Fig. 5.23. Curba caracteristică forță – deformație în cazul încovoierii în 4 puncte a epruvetei din material compozit pe bază de fibră de carbon
Fig. 5.24. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața superioară și inferioară a epruvetei
Fig. 5.25. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața laterală a epruvetei
Fig. 5.26. Modul de plasare a senzorilor acustici pe suprafața epruvetei
Fig. 5.27. Montajul experimental pentru încercarea la încovoiere în 4 puncte – epruveta D2
Fig. 5.28. Variația semnalelor acustice provenite de la cei 3 senzori (*Hits* vs *Timp*)
Fig. 5.29. Curba caracteristică forță – deplasare pentru încercarea la încovoiere în 4 puncte
Fig. 5.30. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața laterală a epruvetei
Fig. 5.31. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața superioară și inferioară a epruvetei

Fig. 5.32. Curba caracteristică la tracțiune pentru epruveta D3
Fig. 5.33. Variația deformației longitudinale și transversale la tracțiune în funcție de timp
Fig. 5.34. Reprezentarea grafică a forței de rupere, energiei totale, energiei elastice și energiei disipate în funcție de forța de rupere
Fig. 5.35. Trasarea pantei F/δ necesare în calculul modulului de elasticitate la încovoiere al epruvetei D1
Fig. 5.36. Panoul aplicației LabVIEW pentru calculul la încovoiere în 4 puncte (program DC_1)
Fig. 5.37. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere secvență I (program DC_1)
Fig. 5.38. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere secvența II (program DC_1)
Fig. 5.39. Panoul aplicației LabVIEW pentru calculul la încovoiere în 4 puncte program DC_2
Fig. 5.40. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere secvență I (program DC_2)
Fig. 5.41. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere secvență II (program DC_2)
Fig. 5.42. Analiza statistică – BOXPLOT – de comparare a rezultatelor achiziționate de la 3 senzori
Fig. 5.43. Codul programului LabVIEW DC_3 de analiza frecvențială
Fig. 5.44. Panoul programului DC_3 pentru realizarea analizei frecvențiale
Fig. 5.45. Analiză spectrală - reprezentarea semnalelor de la cei 3 senzori
Fig. 5.46. Poziția senzorilor pe suprafața epruvetei
Fig. 5.47. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la 0–100 s
Fig. 5.48. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la150–250 s
Fig. 5.49. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la 0–450 s
Fig. 5.50. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la 500 – 700 s
Fig. 5.51. Analiza spectrală a semnalelor acustice obținute de la cei 3 senzori la începutul experimentului
Fig. 5.52. Analiza spectrală a semnalelor acustice obținute de la cei 3 senzori la finalul experimentului
Fig. 5.53. Cod LabVIEW pentru calculul la tractiune compusă – secvență I (program DC_4)
Fig. 5.54. Cod LabVIEW pentru calculul la tractiune compusă – secvență II (program DC_4)
Fig. 5.55. Cod LabVIEW pentru calculul la tractiune compusă – secvență III (program DC_4)
Fig. 5.56. Panoul aplicației de calcul la tracțiune excentrică (program DC_4)
Fig. 5.57. Rezultate numerice ale variabilelor calculate în cazul încercării de încovoiere în 4 puncte – cazul forței maxime
Fig. 5.58. Rezultate numerice ale variabilelor calculate în cazul încercării de încovoiere în 4 puncte – cazul forței maxime
Fig. 5.59. Variația tensiunii la încovoiere în funcție de forța de încărcare
Fig. 5.60. Variația modulului de elasticitate la încovoiere în funcție de forța de încărcare
Fig. 5.61. Variația rigidității la încovoiere în funcție de forța de încărcare
Fig. 5.62. Variația tensiunii la încovoiere în raport cu forța de rupere
Fig. 5.63. Variația modulului de elasticitate în funcție de forța de rupere
Fig. 5.64. Variația rigidității în funcție de forța de rupere
Fig. 5.65. Reprezentarea grafică a forței de rupere, energiei totale, energiei elastice și energiei disipate în funcție de forța de rupere
Fig. 5.66. Trasarea pantei F/δ necesare în calculul modulului de elasticitate la încovoiere al epruvetei D2

Fig. 5.67. Afișarea rezultatelor finale ale calculului la tracțiune excentrică pentru epruveta testate
Fig. 5.68. Variația rezistenței la tracțiune în funcție de forța de rupere
Fig. 5.69. Variatia alungirii specifice la tracțiune în funcție de forța de rupere aplicată
Fig. 5.70. Variația modulului de elasticitate la tracțiune în funcție de forța de rupere
Fig. 5.71. Harta termică epruvetei inainte de încercarea la încovoiere – faza initială
Fig. 5.72. Harta termică epruvetei după de încercarea la încovoiere – faza finală
Fig. 5.73. Harta termică a zonei critice înainte de producerea primei fisuri
Fig. 5.74. Variația temperaturii medii în timp în zona 2
Fig. 5.75. Harta termică a epruvetei la producerea unei fisuri în material
Fig. 5.76. Harta termică a epruvetei la producerea delaminării în material
Fig. 5.77. Variația temperaturii medii în zona cu delaminare
Fig. 5.78. Starea finală a epruvetei după efectuarea experimentului
Fig. 5.79. Harta termică epruvetei inainte de încercarea la tracțiune – faza inițială
Fig. 5.80. Harta termică epruvetei după încercarea la tracțiune – faza finală
Fig. 5.81. Harta termică a epruvetei in zona de delaminare – momentul initial
Fig. 5.82 Harta termică a epruvetei in zona de delaminare – faza finală
Fig. 5.83. Variația temperaturilor medii in zona de delaminare – momentul initial
Fig. 5.84. Variația temperaturilor medii in zona de delaminare – etapa finală
Fig. 5.85. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – momnetul initial
Fig. 5.86. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – etapa finală
Fig. 5.87. Variația temperaturilor maxime înainte și după producerea delaminării
Fig. 5.88. Harta termică a epruvetei in zona de rupere (aria critică) – momentul initial
Fig. 5.89. Harta termică a epruvetei in zona de rupere – faza finală
Fig. 5.90. Variația temperaturilor medii in zona de rupere (aria critică) – inițial
Fig. 5.91. Variația temperaturilor medii in zona de rupere – etapa finală
Fig. 5.92. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – initial
Fig. 5.93. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – etapa finală
Fig. 5.94. Variația temperaturilor maxime înainte și după producerea fisurii
Fig. 5.95. Panoul aplicației de realizare a analizei multicriteriale – program DC_5
Fig. 5.96. Codul grafic (diagrama) al aplicației de realizare a analizei multicriteriale – secvența 1 (program DC_5)
Fig. 5.97. Codul grafic (diagrama) al aplicației de realizare a analizei multicriteriale – secvența 2 (program DC_5)
Fig. 5.98. Codul grafic (diagrama) al aplicației de realizare a analizei multicriteriale – secvența 3 (program DC_5)
Fig. 5.99. Panoul programului DC_4 cu afișarea rezultatelor finale
Fig. 5.100. Rezultate comparative obținute de la sistemul acustic și camera de termografie
Fig. 5. 101. Evoluția magnitudinii medii pentru cele trei semnale
Fig. 5.102. Variația amplitudinii semnalelor acustice provenite de la cei 3 senzori
Fig. 5.103. Variația temperaturilor medii și maxime la suprafața epruvetei în timpul încercării la tracțiune
Fig. 5.104. Simulare vs. Experiment – validarea rezultatelor
Fig. 5.105. Curba caracteristică deformație – tensiune la încovoiere – simulare vs. experiment

LISTĂ TABELE

Tabel 2.1. Clasificarea generală a defectelor fizice (structurale)
Tabel 2.2. Clasificarea standard a defectelor privind produsele laminate şi trase din oţel [STAS 6656-80]
Tabel 2.3. Clasificare standard a defectelor privind profilele şi sârmele laminate la cald [STAS 6656-80]
Tabel 4.1 Dimensiunile epruvetelor de material compozit stratificat (fibră de carbon UD)
Tabel 4.2. Valorile rezultatelor parametrilor necesari analizei statice
Tabel 4.3 Valori ale tensiunii echivalente pentru cele 4 cazuri studiate
Tabel 4.4. Rezultate ale diferenţei de tensiuni pentru cazurile studiate
Tabel 4.5. Simulare vs experiment, rezultate numerice
Tabel 5.1. Dimensiunile epruvetelor testate la încovoierea în 4 puncte
Tabel 5.2. Principalele dimensiuni de gabarit ale epruvetei
Tabel 5.3. Etapele aplicării mărcilor tensometrice pe suprafaţa epruvetei
Tabel 5.4. Valori ale variabilelor utilizate în analiza statistică
Tabel 5.5. Valorile numerice ale forţei de rupere şi deformaţiei la mijlocul epruvetei în puncte semnificative de pe curba forţă – deplasare
Tabel 5.6. Valorile numerice ale forţei de rupere şi deplasării extrase din curba caracteristică forţă – deplasare
Tabel 5.7. Valorile numerice ale forţei de rupere şi deformaţiei la mijlocul epruvetei
Tabel 5.8. Rezultate numerice ale variabilelor în cazul încovoierii în 4 puncte a epruvetei testate
Tabel 5.9. Rezultate numerice ale variabilelor în cazul încovoierii în 4 puncte a epruvetei testate
Tabel 5.10. Rezultate numerice ale variabilelor în cazul tracţiunii a epruvetei testate
Tabel 5.11. Calculele asociate coeficienţilor de pondere
Tabel 5.12. Notele acordate variantelor
Tabel 5.13. Coeficienţii de pondere calculaţi

CAPITOLUL **1**

INTRODUCERE

Detectarea şi evaluarea defectelor este un proces care se utilizează pentru a se putea estima durata de viaţă rămasă a unei structuri a cărei performanţă trebuie să rămână peste pragul stabilit. După [Pullan, 2000], prin structură de fabricaţie se înţelege totalitatea mijloacelor materiale şi componente nemateriale din care este realizat un produs şi care sunt grupate în timp şi în spaţiu într-un mod bine determinat. Orice structură este alcătuită din componente iar la rândul lor componentele sunt fabricate din materiale.

În inginerie și arhitectură, structura este considerată ca un corp sau un ansamblu de corpuri în spațiu care formează un sistem capabil să suporte solicitări.

Un material compozit reprezintă o combinație între două sau mai multe materiale diferite din punct de vedere chimic, cu o interfață între ele. Materialele constituente își mențin identitatea separată (cel puțin la nivel macroscopic) în compozit, totuși combinarea lor generează ansamblului proprietăți și caracteristici diferite de cele ale materialelor componente în parte. Unul din materiale se numește matrice iar celălalt poartă numele de armătură (ranforsare) și se adaugă matricei pentru a-i îmbunătăți sau modifica proprietățile. Fibrele sunt elementul care conferă ansamblului caracteristicile de rezistență la solicitări. În comparație cu matricea, efortul care poate fi preluat este net superior, în timp ce alungirea corespunzătoare este redusă. Matricea prezintă o alungire și o reziliență la rupere mult mai mari, care asigură că fibrele se rup înainte ca matricea să cedeze.

Conform standardului SR ISO 9000 – 2000, defectul este definit ca ”*nesatisfacerea unei cerinţe sau a unei aşteptări rezonabile privind utilizarea prevăzută, inclusiv a celor referitoare la securitate*”.

Conceptul de Monitorizare a Integrității Structurilor (Structural Health Monitoring – SHM) se referă la diagnosticarea stării integrității materialelor constituente ale unei structuri. Această stare poate fi alterată de-a lungul timpului, datorită mai multor factori ca: uzura structurii datorată oboselii materialelor, acţiunea factorilor de mediu precum şi a unor evenimente accidentale.

Pornind de la aceste consideraţii, teza de doctorat intitulată ***„Studii și cercetări privind detectarea defectelor în structuri”*** îşi propune dezvoltarea unui studiu original, cu potenţial în

determinarea unui sistem optim pentru detectarea defectelor din materialele compozite încă din faza incipientă. În realizarea acestei lucrări doctorale se parcurge sistematic un traseu de cercetare teoretic şi experimental. Acesta porneşte de la general cu studiul metodelor de defectoscopie cunoscute și utilizate la ora actuală, se continuă cu studiul senzorilor și sistemelor de senzori care pot fi integrate în materialele compozite cu precădere a celor utilizate în industrie. Se fac teste experimentale utilizând trei metode diferite de detectare a defectelor și în final se elaborează o analiză multicriterială pentru identificarea metodei optime de detectare a defectelor care poate fi utilizată atât în controlul defectoscopic cât și în monitorizarea în timp real.

Lucrarea de cercetare teoretică şi experimentală, este structurată pe **6 capitole** în care se parcurge gradual subiectul de cercetare ştiinţifică. Se începe cercetarea cu o introducere în temă şi se finalizează cu prezentarea sistemică a concluziilor generale și descrierea contribuţiilor originale.

Primul capitol intitulat *„Introducere”* prezintă sistematic importanţa efectuării lucrării de cercetare pentru domeniul industrial.

În ***Capitolul doi,*** *„Stadiul actual al cercetării în domeniu”* prezintă sinteza stadiului actual al cercetărilor privind metodele de detectarea a defectelor, metodele de analiză a calității funcționării și descrierea detaliată a conceptului de monitorizare a integrității structurilor.

Capitolul trei intitulat *„Obiectivele tezei de doctorat”* prezintă atât motivaţia efectuării lucrării ştiinţifice de cercetare cât și obiectivele tezei de doctorat. Acestea sunt reflectate prin studii teoretice, metode de simulare şi cercetări experimentale privind comportamentul materialelor compozite stratificate armate cu fibre de carbon.

În ***Capitolul patru:*** *„Contribuții la modelarea și simularea de structuri”* care este structurat pe şapte subcapitole se analizează următoarele faze de cercetare teoretică:

- studiul și analiza plăcilor plane dreptunghiulare cu precădere al stratificatelor compozite;
- simularea comportamentului compozitului stratificat armat cu fibră de carbon în condiții de solicitare la încovoiere în 4 puncte;
- comportamentul mecanic unei pale de elicopter ușor în diferite scenarii de simulare a zborului (zbor staționar, zbor cu înaintare, încărcarea greutății proprii);

Capitolul cinci intitulat *„Contribuţii experimentale”* este divizat în trei subcapitole. În subcapitolul 5.2, ”***Proiectarea experimentului***” este prezentată structura etapelor parcurse în cadrul testelor experimentale pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale compozitului stratificat armat cu fibre de carbon la două categorii de încercări mecanice: încovoiere în 4 puncte şi tracţiune. În scopul detectării defectelor interne ale materialului în timpul experimentului s-au utilizat trei metode de defectoscopie: tensometria electrorezistivă, metoda acustică şi termografia IR. Încercările mecanice la încovoiere în 4 puncte au fost efectuate, pe maşina de încercare tip **ZWICK/ROELL Z 300**, iar pentru testele la tracţiune s-a utilizat maşina de încercări la tracţiune/compresiune tip **ZWICK/ROELL Z010**, ambele instalaţii fiind în laboratorul ”*Groupe d’Etude de Materiaux Heterogenes*” din cadrul departamentului „*Genie Civil d’Egletons*” al Universităţii din Limoges, Franţa. De asemenea toate sistemele de detectare a defectelor utilizate (mărci tensometrice, senzori acustici, camera de termografie IR) aparţin aceluaşi laborator de încercări mecanice din Egletons.

În ***Capitolul şase*** intitulat *„Concluzii”* se prezintă concluziile obţinute în urma cercetării ştiinţifice teoretice şi experimentale, elementele de originalitate şi contribuţiile aduse de autor în cadrul tezei doctorale. Totodată se evidenţiază valorificarea cercetării şi diseminarea rezultatelor prin participarea la conferinţe internaţionale şi publicarea de articole în reviste de specialitate.

Bibliografia inclusă la sfârşitul tezei doctorale prezintă lucrările, articolele şi sursele de informaţii utilizate pe perioada cercetării.

De asemenea, teza de doctorat cuprinde la sfârşit şi un număr de anexe necesare calculelor, prezentate sub forma de tabele şi grafice.

În primul rând doresc să mulţumesc, în mod deosebit, conducătorilor ştiinţifici ai tezei de doctorat, Prof.univ.dr.ing. Ileana Constanţa Roşca şi Prof.univ.dr. ing. Octavian Pop pentru contribuţia deosebită la formarea, coordonarea şi ajutorul acordat pe toată perioada elaborării tezei de doctorat.

Mulţumesc colectivului de profesori: Prof.univ.dr.ing. Luciana Cristea, Prof.univ.dr.fiz. Sorin Zamfira, şef lucr. dr. ing. Barbu Braun, şef lucr. dr. ing. Cornel Drugă din cadrul Departamentului Design de produs, Mecatronică şi Mediu, Universitatea *Transilvania* din Braşov.

Mulţumesc cadrelor didactice şi personalului tehnic de la Universitatea din Limoges, Franţa pentru susţinerea din perioada stagiilor efectuate acolo.

De asemenea, multumesc d-lui şef lucrări dr. Cotfas Petru din cadrul departamentului de Electronică şi Calculatoare, Universitatea *Transilvania* din Braşov, pentru ajutorul pe care mi l-a oferit de-a lungul conceperii tezei.

Mulţumesc personalului din cadrul Departamentului de doctorate de la Universitatea *Transilvania* Braşov pentru conceperea şi buna derulare a programului: POSDRU/159/1.5/S/137516, realizat şi finanţat parţial în colaborare cu Uniunea Europeană.

Multumesc familiei mele pentru încurajarea şi sprijinul moral pe toata durata pregătirii doctorale precum şi prietenilor care m-au susţinut de-a lungul acestei perioade.

Mulţumesc în mod deosebit referenţilor care, cu răbdare şi îngăduinţă, au analizat teza de doctorat şi m-au sfătuit astfel încăt, lucrarea să prezinte un nivel ştiinţific ridicat.

Nu în ultimul rând, doresc să mulţumesc celor care mi-au fost alături în această perioadă dificilă şi tuturor celor care, în mod direct sau indirect, m-au susţinut pe durata activităţii mele doctorale.

CAPITOLUL **2**

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PRIVIND DETECTAREA DEFECTELOR ÎN STRUCTURI

2.1. GENERALITĂȚI PRIVIND CONCEPTUL DE MONITORIZARE A CALITĂȚII STRUCTURILOR

Încă din cele mai vechi timpuri, oamenii de știință și cercetătorii au fost preocupați de dezvoltarea de instrumente sau sisteme complexe care să poată monitoriza și evalua o structură cu grad de risc fără să afecteze construcția sau funcționarea acesteia. Numeroase teste s-au efectuat încă de la începutul secolului 19 având ca scop detectarea defectelor la roțile de tren [Farrar et al, 2001] sau monitorizarea vibrațiilor la mașinile rotative [Dawson, 1976].
Cunoștințele din domeniul comportamentului mecanic și termic al structurilor industriale stau la baza cercetărilor teoretice și/sau experimentale în cadrul procesului de monitorizare a calității structurilor (**S**tructural **H**ealth **M**onitoring – **SHM**).

Conform [Roșca & Radu, 2009], prin calitatea unui produs se înțelege ” expresia gradului de utilitate socială a produsului, măsura în care – prin ansamblul caracteristicilor sale tehnico – funcționale, psiho – senzoriale și al parametrilor economici – satisface nevoia pentru care a fost creat și respectă restricțiile impuse de interesele generale ale societății privind eficienta social – economică , protecția mediului natural și social”.

După [Balageas et al, 2010], conceptul de Monitorizare a Calității Structurilor (Structural Health Monitoring – SHM) se referă la diagnosticarea stării integrității materialelor constituente ale unei structuri. Această stare poate fi alterată de-a lungul timpului, datorită mai multor factori ca: uzura structurii datorată oboselii materialelor, acțiunea factorilor de mediu precum și a unor evenimente accidentale. Cu ajutorul sistemelor SHM se poate oferi o prognoză referitoare la evoluția în timp a defectelor.

Totodată, conceptul de monitorizare a calității structurilor reprezintă o metodă îmbunătățită de a efectua o evaluare nedistructivă a unei structuri. Această metodă implică integrarea senzorilor, a materialelor inteligente, transmisiei de date, capacitatea computațională și abilitatea de procesare în interiorul structurilor.

Evaluarea defectelor este un proces care se utilizează pentru a se putea estima durata de viață rămasă a unei componente/structuri a cărei performanta trebuie să rămână peste pragul stabilit. Sistemele de evaluare a defectelor utilizează informații legate de dimensiunile și localizarea defectului.

Estimarea duratei de viață rămasă a structurii are la bază un model predictiv care achiziționează atât de la sistemul de monitorizare a uzurii cât și de la sistemul de monitorizare a calității structurilor, informații referitoare la condițiile de mediu și la gradul de solicitare care ar putea afecta structura în timp.

Apariția unui defect este caracteristică oricărei componente/structuri a cărei utilizare este afectată într-o oarecare măsură.

În sfera industrială, procedeul de monitorizare a integrității structurilor se poate aplica atât în ingineria civilă cât și în domeniul mecanic. Se pot monitoriza o serie de structuri din domeniul industrial, cum ar fi:

- poduri și drumuri;
- clădiri și stadioane;
- aeronave;
- vase și platforme marine;
- turbine eoliene, etc.

După [Worden et al, 2007] s-a afirmat că această tehnică de monitorizare a integrității structurilor a avut la bază o serie de axiome fundamentale sau principii generale. Dintre acestea se pot enumera:

- Axioma I: Toate materialele au imperfecțiuni sau defecte;
- Axioma II: Pentru a se evalua un defect este necesar să se facă o comparație între două stări diferite ale sistemului;
- Axioma III: Identificarea existenței și locului defectului se poate face într-un mod neasistat dar identificarea tipului de defect și severitatea acestuia se poate face doar în mod asistat;
- Axioma IV: Senzorii nu pot măsura defectul. Extragerea trăsăturilor prin procesarea semnalului și clasificarea statistică trebuie să transforme datele furnizate de senzori în informații despre defectul respectiv;
- Axioma V: Scalele de lungime și timp asociate cu inițierea defectului și evoluția acestuia determină proprietățile necesare ale unui sistem de monitorizare a calității structurilor;

- Axioma VI: Există un compromis între sensibilitatea unui algoritm de identificare a defectului și capacitatea de îndepărtare a zgomotului;
- Axioma VII: Mărimea defectului care poate fi detectată de modificările dinamicii sistemului este invers proporțională cu ordinul de frecvență al excitației.

În practică, se pot întâlni o serie de circumstanțe care pot conduce la apariția unui defect într-o structură. În acest context, defectele pot fi:

- structurale;
- funcționale.

Defectele structurale pot rezulta în urma procesului de proiectare (proiectare greșită) sau în urma prelucrării (prelucrare incorectă, alegerea materialului nepotrivit, etc.).

Defectele funcționale sunt acelea care se referă la starea funcțională a unei structuri. De regulă, acest tip de defecte nu se întâlnesc în faza incipientă (proiectare și prelucrare). Acestea apar și se propagă în timp, datorită oboselii și coroziunii materialului din care este fabricată structura, și dacă nu sunt detectate la timp pot afecta structura în mod permanent.

Conform SR ISO 9000 – 2000, defectul este definit ca ”*nesatisfacerea unei cerințe sau a unei așteptări rezonabile privind utilizarea prevăzută, inclusiv a celor referitoare la securitate*”.

Deoarece defectele unei structuri determină într-o anumită măsură calitatea structurală și funcțională a acesteia, detectarea, măsurarea, evaluarea și analiza defectului constituie o premise importante pentru estimarea nivelului de calitate a unei anumite structuri. Cunoașterea și evaluarea defectelor presupune parcurgerea mai multor etape, ca [Pană & Pastramă, 2004]:

- cunoașterea tipurilor de defecte care se pot întâlni în cadrul unei structuri raportate la natura materialului structurii, de modul de proiectare al acesteia, de procesul tehnologic de prelucrare a componentelor unei structuri;
- cunoașterea metodelor de detectare a defectelor și a localizării acestora;
- localizarea defectelor apărute în structură raportate la un sistem de referință ales;
- măsurarea și estimarea formei și volumului unui defect;
- estimarea vitezei de evoluție în timp, de propagare a defectelor (defectele bidimensionale, cum ar fi fisurile, au viteza de propagare mai mare decât defectele cele tridimensionale);
- compararea caracteristicilor reale ale structurii afectate de prezența defectelor detectate cu valorile stabilite la proiectare sau prescrise pentru acele caracteristici;
- analizarea modului în care defectele inacceptabile pot sau nu fi remediate.

Conceptul de defect este general și poate fi extins pe o plajă largă de domenii. Drept urmare, pentru a se efectua o analiză a comportării structurilor, din punct de vedere al siguranței în funcționare, este necesar să se realizeze o identificare corectă a defectelor apărute în structuri și a cauzelor acestora.

Astfel, un defect fizic (structural) apare atunci când structura nu mai este aptă de funcționare, sau nu mai este operațională.

Conform [Pană & Pastramă, 2004] defectele fizice (structurale) pot fi clasificate după o serie de criterii, conform Tabelului 2.1.

Tabel 2.1. Clasificarea generală a defectelor fizice (structurale), adaptat după [Pană & Pastramă, 2004]

Nr. crt.	**Criteriul de clasificare**	**Denumire defect**	**Descriere**
1	Importanța și gradul de periculozitate al defectului	Defect critic	Este acel defect care poate conduce la accidentarea utilizatorilor sau a acelora care exploatează structura respectivă
		Defect major	Acest tip de defect nu este considerat critic dar reduce posibilitățile de exploatare ale structurii
		Defect minor	Este un tip de defect care afectează doar unele caracteristici sau conduce la reducerea nesemnificativă a gradului de exploatare a structurii
2	Caracteristica pe care o afectează	Abatere dimensională	Abaterea dimensională este diferența algebrică dintre o dimensiune efectivă maximă sau minima și dimensiunea nominală corespunzătoare.
		Defect de formă și poziție relativă a suprafețelor	Este abaterea formei suprafeței reale fată de forma suprafeței nominale sau abaterea formei profilului real fată de forma profilului nominal.
		Abatere de la calitatea suprafețelor	Este abaterea de la calitatea standard a suprafeței piesei/structurii exprimată prin valoarea rugozității.
		Defect de structură	Este reprezentat de lipsa unei/sau mai multor componente din ansamblul unei structuri.
		Abatere de la compoziția chimică și gradul de puritate	Este un defect ce caracterizează materialul din care este realizată structura și se referă la abaterea față de compoziția chimică standard a materialului.
		Abatere de la caracteristicile mecanice	Este reprezentată de orice abatere de la caracteristicile mecanice ale materialului structurii.

		Discontinuitate	Este considerată o intermitență sau o lipsă de continuitate în funcționarea unei structuri.
3	Gradul de accesibilitate la detecție	Defect exterior	Este de regulă situat la suprafața structurii și sunt ușor accesibile.
		Defect interior	Acesta poate fi situat pe suprafețele interioare sau pe interiorul pereților unei componente la o adâncime de suprafața accesibilă.
		Defect greu detectabil	Este considerat acel defect care nu poate fi detectat prin metodele clasice standard.
4	Frecvența de apariție raportată la un lot sau la o singură piesă	Defect fără tendințe de propagare	Este acel defect care nu se dezvoltă (propagă) în timpul exploatării structurii.
		Defect cu tendință de propagare	Acesta este reprezentat de un defect care se propagă în materialul structurii până la ruperea acesteia. Poate fi defect bidimensional sau tridimensional (fisură, crăpătură, delaminare)

În industria aerospațială dar și în transporturi rutiere se întâlnesc cu precădere structuri laminate pe bază de oțel, aluminiu sau aliaje, materiale compozite și materiale avansate, table, benzi, țevi, etc.

Defectele de laminare sunt reprezentate de orice abatere de la dimensiunile, forma, masa, aspectul exterior și mini structura prevăzute în standardele tehnice ale acesteia.

Terminologia, clasificarea și simbolizarea defectelor privind produsele laminate și trase din oțel au fost standardizate, ele fiind cuprinse în STAS 6656 – 80, în șase grupe (Tabelul 2.2, și Tabelul 2.3).

Tabel 2.2. Clasificarea standard a defectelor privind produsele laminate și trase din oțel [STAS 6656-80].

Cod	**Categorii de dedefecte**	**Denumire defect**	**Descriere**
DL1	Defecte de suprafață	Crăpături superficiale, încrețituri (DL132)	-fisuri capilare – crăpături fine, observabile numai pe suprafață neoxidată; - fisuri - pentru crăpături fine; -crăpături – atunci când compactitatea oțelului este deteriorată prin despicare.
		Pelicule, solzi, așchii (DL112-113)	- părți de materiale cu grosimi relativ mici aplatizate prelaminate pe suprafața prefabricatelor care prezintă aderență slabă sau parțială pe materialul de bază.
		Inegalități de suprafață (DL12)	- denivelări superficiale generalizate sau localizate. Inegalitățile superficiale pot fi provocate de defectele de suprafață ale lingoului, de calitatea și uzura cilindrilor de laminare.

		Deteriorări ale suprafeței (DL13)	-
DL2	Abateri geometrice	Secțiuni transversale deformate (DL221)	- defectul de oblicitate, caracterizat prin diagonale inegale. Cauzele apariției oblicității sunt: - laminarea într-un calibru cutie mai mare decât cel adecvat; - distanța prea mare dintre fălcile de ghidare; - poziția oblică a cutiei față de fălcile de ghidare;
		Răsucire (DL213)	Răsucirea se poate produce imediat după introducerea barei între cilindrii. Factorul principal care provoacă răsucirile este instabilitatea barei introduse între cilindrii din cauza raportului prea mare între axa orientată vertical și cea orientată orizontal a secțiunii transversale.
		Curbare, ondulare (DL213-214)	-
		Capete și margini deformate la tăiere (DL215)	-
		Neumplerea calibrelor (DL211)	-
		Bavuri (DL 222)	Bavurile sunt principalele defecte care provin din nerespectarea tehnologiei de laminare. Acestea sunt prezentate sub forma unor proeminențe relativ înguste și prelungite în lungul produsului laminat, pe ambele părți sau numai pe o parte. Cauzele apariției bavurilor sunt: - supraumplerea calibrului datorită unei lățiri prea mari din calibrul anterior; - reducerea prea mare în calibrul în care se formează bavura; - fălcile de ghidare sau axul cutiei de ghidare cu role sunt deplasate față de axa calibrului.
		Adâncimi, amprente proeminențe (DL231)	-sunt cauzate de deteriorările mai pronunțate ale suprafeței cilindrilor și calibrelor în urma defecțiunilor în cursul exploatării
		Suprapuneri (DL232)	-
		Capete deteriorate la laminare (DL235, 236)	-
DL 3	Defecte de compactitate	Retasuri (DL311)	-
		Porozități (DL312)	-
		Sufluri (DL313)	-

		Stratificări (DL 314)	- apariția de straturi separate prin crăpături orientate de obicei paralel cu planul de laminare ;
		Crăpături, spărturi, rupturi (DL321-322-323)	-crăpături provenite din suduri la rece și întreruperi de turnare; - crăpături termice; - crăpături prin laminare în calibre; - crăpături și ruperi interne; - spărturi.
DL4	Abateri ale compoziției chimice și purității	Compoziții chimice necorespunzătoare (DL411)	Compoziția chimică necorespunzătoare este atunci când conținutul privind unul sau mai multe elemente depășește valoarea din compoziția chimică prescrisă.
		Segregații (DL412)	Aprecierea gradului de segregare se face cu ajutorul unor etaloane, prin comparație.
		Material amestecat (DL413)	-
		Incluziuni macroscopice (de natură metalică și nemetalică) (DL42)	-
DL5	Abateri ale caracteristicilor mecanice și fizice	Fragilitatea la cald	-este cauzată de conținutul de sulf și oxigen (DL521), de conținutul de cupru (DL522), de structura bifazică a oțelului (DL523).
		Fragilitatea la rece	-este determinată de nitrura de aluminiu (DL524)
		Abateri ale caracteristicilor mecanice și proprietăți tribologice (DL51)	-
		Îmbătrânirea (DL521)	-se manifestă după deformarea plastică la cald sau la rece într-un interval de timp care depinde în cea mai mare parte de condițiile de temperatură.
		Pete moi și tari (DL523)	- apar din cauza răcirii locale prea intense
DL6	Defecte de structură	Defecte de macrostructură (DL61)	-
		Defecte de microstructură (DL62)	-
		Supraîncălzire și ardere (DL631-632)	-
		Decarburare (DL633)	Fenomenul de decarburare se manifestă la încălzirea oțelurilor prin scăderea conținutului de carbon în zonele de suprafață.

Conform STAS 6656-80, defectele tablelor și benzilor laminate la cald se pot clasifica astfel:

DL1 Defecte de suprafață

Defectele de suprafață pot apărea datorită stării cilindrilor de laminare, armăturilor de la caje, rolelor și instalațiilor auxiliare.

- *Pelicule, coji, așchii, solzi* (DL11)

Defectele profilurilor și sârmelor laminate la cald sunt clasificate în mai multe categorii principale, după STAS 6656-80, și sunt prezentate în Tabelul 1.3.

Tabel 2.3. Clasificare standard a defectelor privind profilele și sârmele laminate la cald [STAS 6656-80].

Cod	Categorii de defecte	Denumire defect	Descriere
DL1	Defecte de suprafață	Fisuri superficiale, încrețituri (DL132)	-
		Pelicule, solzi, așchii (DL112-113)	-
		Țunder (DL114)	Rezultă din oxidarea oțelului în timpul încălzirii lui în cuptoare
		Pete și urme de materiale nemetalice (DL115-116)	-
		Inegalități ale suprafeței (DL12)	-
		Deteriorări ale suprafeței (DL13)	-
DL2	Abateri geometrice, dimensionale și de masă	Secțiuni transversale necorecte, neumplerea calibrelor (DL211, DL221)	-
		Curbare, ondulare, strâmbare (DL213-214)	-
		Capete deformate la tăiere (DL215)	-
		Bavuri (DL222)	-
		Adâncituri, amprente, proeminențe (DL231),	-
		Abateri ale dimensiunii și masei (DL24)	-
DL3	Defecte de compactitate	Retasuri, porozități (DL311-312)	-

		Sufluri (DL313)	-
		Stratificări (DL314)	-
		Fulgi (DL324)	-
DL4	Abateri ale compoziției chimice si purității	Compoziție chimică necorespunzătoare (DL411)	-
		Segregații (DL412)	-
		Material amestecat (DL413)	-
		Abateri ale compoziției chimice (DL43)	-
		Țunder, culori de revenire, rugină (DL114)	-
		Pete, straturi și urme de impurități nemetalice (DL115-116)	-straturi superficiale, cauzate de incluziuni de materiale nemetalice apropiate de suprafața tablei sau benzii, care se întind sub formă de fâșii sau pete mai late sau mai înguste, în direcția laminării.
		Pete și depuneri de la tratamente termice, reziduuri de la decapare (DL117)	-
		Rugozitate (DL121)	Cauzele principale ale lipsei de netezime sunt: - suflurile marginale prea apropiate de suprafața lingoului, care se deschid în timpul încălzirii și laminării; - duritatea insuficientă a cilindrilor; - rectificarea neîngrijită a cilindrilor.
		Adâncituri, amprente, proeminențe (DL122)	-
		Pori de decapare (DL133)	-

Pe lângă oțel, aluminiu sau alte aliaje metalice, în majoritatea domeniilor industriale dar și în aria civilă se utilizează din ce în ce mai mult materialele compozite.

Structura unui „*material compozit*” este caracteristică multor produse naturale, ceea ce explică rezistența mecanică deosebită a acestora. De asemenea, se știe faptul că aliajele metalice prezintă proprietăți net superioare față de cele ale componentelor constituente. Același lucru se întâmplă și în cazul materialelor compozite ceramice sau polimerice.

Conform [Bejinaru Mihoc et al, 2010] și [Mazumdar, 2002] un material compozit este alcătuit dintr-o matrice în care este dispersat agentul de armare sau agentul de umplutură.

Materialele compozite metalice înlocuiesc adesea compozitele polimerice, deoarece rezistă mai bine la temperaturi înalte și nu sunt inflamabile sau higroscopice.

După [Kaw, 2005] și [Matthews & Rawlings, 1999] defectele specifice ale materialelor compozitelor metalice sunt:

- *micro cavități de contracție*, specifice compozitelor turnate: în aliajele obișnuite, având un coeficient de contracție la solidificare de 3...6%, prezența particulelor sau fibrelor în matrice frânează procesul de compensare a golurilor de contracție cu material lichid din zonele adiacente;
- *sufluri*, caracteristice compozitelor obținute prin procedeul „Vortex" de înglobare a materialului complementar, când, o dată cu acesta, sunt antrenate în baia metalică și gaze din mediul înconjurător;
- *aglomerări de particule sau fibre discontinue*, care apar la o dispersare insuficientă a materialului complementar;
- *segregații ale materialului dispersat*, produse în urma flotării sau sedimentării particulelor sau fibrelor discontinue cu densități diferite de cele ale matricelor sau în timpul procesului de solidificare, în urma rejecției în fața frontului de fază solidă;
- *deteriorarea materialului complementar* prin procese de dizolvare și topire sau în urma unor reacții chimice intense la interfață;
- *fragmentarea fibrelor* în timpul infiltrării sau al amestecării cu matricea în stare semisolidă;
- *fisuri, crăpături la cald*, din cauza tensiunilor interne apărute la răcirea aliajelor turnate, respectiv frânării contracției;
- *porozitatea*, specifică materialelor compozite obținute prin tehnica metalurgiei pulberilor.

Defectul funcțional apare în momentul în care structura este operațională dar nu își poate realiză funcția specificată. Acest tip de defecte pot fi clasificate în două mari categorii:

- defecte permanente;
- defecte tranzitorii.

Defectele permanente sunt cauzate de avarierea permanentă a una sau mai multor componente ale unei structuri. Pentru remedierea acestor defecte este necesară înlocuirea componentei sau a componentelor avariate.

Defectele temporare (tranzitorii) sunt de durată limitată fiind cauzate de nefuncționări temporare ale componentelor sau de interferențe externe, structura revenind la parametrii normali de funcționare fără o intervenție externă.

Multe dintre defectele funcționale apar datorită erorilor din faza de proiectare dar și din alte cauze cum ar fi: oboseala materialelor, condițiile de mediu în care este exploatată structura și cauze accidentale.

Din literatura de specialitate [Reifsneider, 1991], s-a afirmat că materialele rezistă la solicitări variabile mai puțin decât la solicitări statice, datorită fenomenului de oboseală a materialelor; valorile caracteristicilor de rezistență a materialelor scad datorită solicitărilor variabile.

Conform [Reifsneider, 1991] acest fenomen a fost prima dată studiat de către cercetătorul german August Wohler (1819 – 1914). Acesta a demonstrat că cedarea prin oboseală se produce prin propagarea unei fisuri inițiale la suprafața structurii datorită unor defecte, concentratori de tensiune. După [Reifsneider, 1991] rezistența la oboseală se definește ca fiind cea mai mare valoare a tensiunii maxime la care materialul nu se rupe.

În figura 2.1 [Stepinski, 2013] este prezentată o schemă de interconectare multi-domeniu în realizarea sistemelor SHM. Se pot identifica cele 4 domenii esențiale atât pentru analiza defectelor cât și pentru evaluarea acestora în vederea obținerii unei prognoze privind starea de sănătate a structurii.

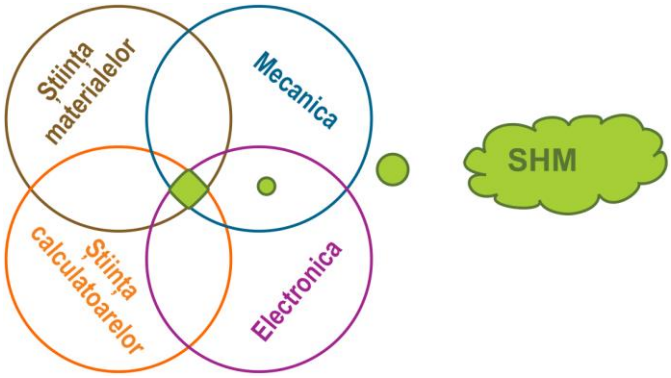


Fig. 2.1. Interconectarea multi – domeniu în vederea proiectării sistemelor SHM, după [Stepinski, 2013].

După cum se observă în figura 2.2, alături de cele două domenii principale, un rol important îl joacă alegerea senzorilor și actuatorilor potriviți pentru a culege informații de la structurile vizate. De altfel, între procesul de monitorizare a sănătății structurale (SHM) și cel al detectării și analizei defectelor (DAD) există o strânsă interdependență. Deci, nu se poate vorbi despre procesele SHM fără să se implice procesele DAD și invers. În final, detectarea și analiza defectelor are un rol esențial în procesul de estimare a duratei de viață a unei structuri.

După [Reifsneider, 1991], oboseala materialelor reprezintă o modificare structurală permanentă, localizată, progresivă, care apare în materialele supuse unor tensiuni alternante. Acest proces poate avea ca rezultat fisurarea sau ruperea materialului după un număr suficient de cicluri.

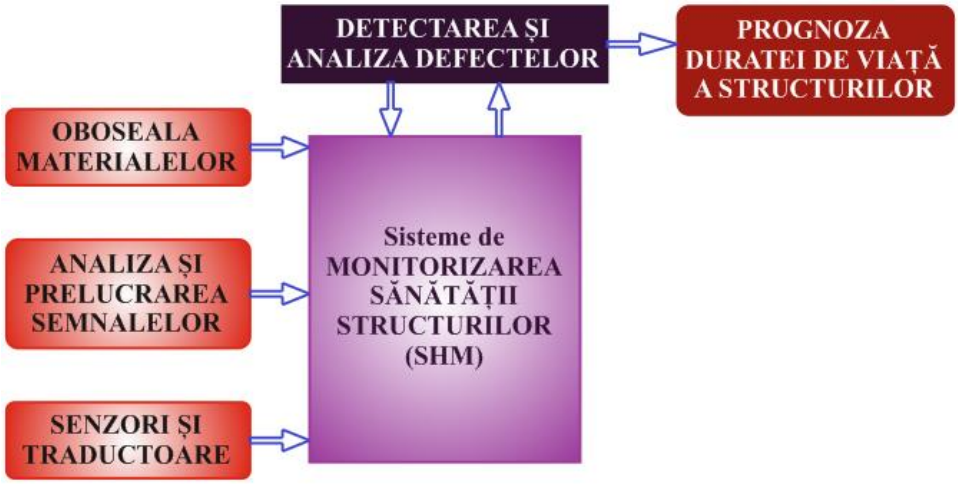


Fig. 2.2. Interconectarea multi – disciplinară în vederea estimării duratei de viață a unei structuri.

În mod normal, fisurarea apare sub acțiunea tensiunilor ciclice de valori cu mult sub limita de curgere statică a materialului din care este fabricată structura. Fisurile de oboseală se inițiază și se propagă în regiuni în care deformația este maximă (zone cu defecte structurale).

Durata de viață la oboseală a unei structuri este furnizată de numărul de cicluri de solicitare după care se produce ruperea. Acest număr este o funcție de mai multe variabile și de aceea proiectanții preferă să se bazeze mai mult pe experiența cu componente similare din exploatare, decât pe rezultatele încercărilor de laborator.

Prelucrarea semnalelor este o tehnologie care se bazează pe resursele date de electronică, informatică și fizica aplicată și are ca scop generarea și interpretarea semnalelor.

Analiza semnalelor este procesul prin care un semnal analogic este preluat din mediu, convertit în semnal digital și căruia i se aplică o serie de algoritmi matematici în scopul extragerii informației conținute de acesta [Zamfira, 2003]. Acest proces se realizează cu ajutorul sistemelor numerice de achiziție și prelucrare a datelor (calculator, microcontroler, procesor de semnal, interfață și sistem de achiziție).

Este acceptat pe scară largă că operația de întreținere a structurilor are rolul de a asigura integritatea și funcționarea acestora. Această operație presupune controlul și analiza defectelor (structurale sau funcționale) care pot apărea, la un moment dat, în interiorul sau la suprafața structurilor. Procesul de întreținere a structurilor este relevant atât pentru domeniul civil cât și

pentru cel al transporturilor (aerian sau rutier). Structurile aerospațiale sunt inspectate în mod regulat iar aeronavele de ultimă generație sunt monitorizate în scopul detectării micro fisurilor datorate oboselii materialelor.

În ultimii ani s-au dezvoltat o serie de tehnici noi de detectare a defectelor din structuri. Aceste metode permit, la nivel global, monitorizarea în timp real a structurilor mari și sunt incluse în cadrul procesului de monitorizare a sănătății structurilor (STRUCTURAL HEALTH MONITORING – SHM). Dezvoltatorii sistemelor de monitorizare a defectelor, care deseori utilizează tehnologia senzorilor integrați, au fost preocupați de adoptarea unei noi filozofii de proiectare a acestora. SHM implică integrarea senzorilor și actuatorilor, a materialelor inteligente, achiziția și transmisia de date și mecanismele computaționale într-o structură nouă, capabilă să detecteze, să localizeze, să evalueze și să estimeze propagarea unui defect în interiorul unei structuri [Balageas et al., 2010]. Un sistem SHM tipic este asociat cu identificarea în timp real a defectelor din structuri; astfel de sisteme pot fi aplicate cu succes în domeniul aerospațial dar și în ingineria civilă.

Figura 2.3 subliniază rolul esențial al sistemelor SHM, implicate în etapa de diagnoză, în cadrul detectării și analizei defectelor. în etapa de estimare, pe baza unor modele ale structurii și defectului coroborate cu informațiile referitoare la starea structurii, primite prin intermediul sistemelor SHM, se poate face o prognoză a evoluției defectelor. Rezultatul final poate conduce sau nu la etapa de inspecție și reparare a structurii.

Rolul sistemelor SHM sunt strâns legate de procesul de diagnoză a structurii și conduce în mod implicit la estimarea duratei de viață a unei componente/structuri din cadrul unui sistem.

Defectele, sănătatea și monitorizarea structurilor pot fi descrise printr-o serie de definiții. Astfel, sănătatea reprezintă capacitatea unei structuri de a-și menține integritatea până la sfârșitul vieții sale; monitorizarea procesul de diagnosticare a structurii în vederea identificării defectelor iar defectul poate fi descris ca o deteriorare materială, structurală și funcțională. Integritatea structurală este condiția la limită între siguranța și deteriorarea structurilor inginerești.

Există diferite conotații ale termenului ”*defect*” în structurile mecanice, prin acesta înțelegându-se o imperfecțiune care afectează condițiile funcționale și de lucru ale structurilor inginerești. O definiție mai precisă a acestui termen poate fi furnizată prin analiza sistemului. Conform teoriei sistemelor, structurile pot fi modelate ca sisteme care au intrări, sub formă de excitații (forță, presiune, accelerație, etc.) și ieșiri sub formă de semnale măsurabile. În acest context, defectul poate fi considerat ca o excitare adițională care rezultă din fluxul de energie și

transformarea acesteia, conducând la modificări vizibile ale semnalului de ieșire. Altfel spus, procesul de detectare a defectelor este o problemă inversă; în prima etapă se măsoară semnalele de ieșire și în etapa următoare se detectează defectul. Din punct de vedere structural, defectul poate fi privit ca o modificare a proprietăților materialului și/sau a parametrilor fizici ai structurii. Aceste proprietăți și parametrii pot fi modificate datorită sedimentării și plasticității materialului sau oboseală și coroziunea acestuia. În acest caz, detectarea defectelor devine o problemă de identificare. Proprietățile materialului și parametrii fizici trebuie să fie extrase pentru a se putea evalua defectul.

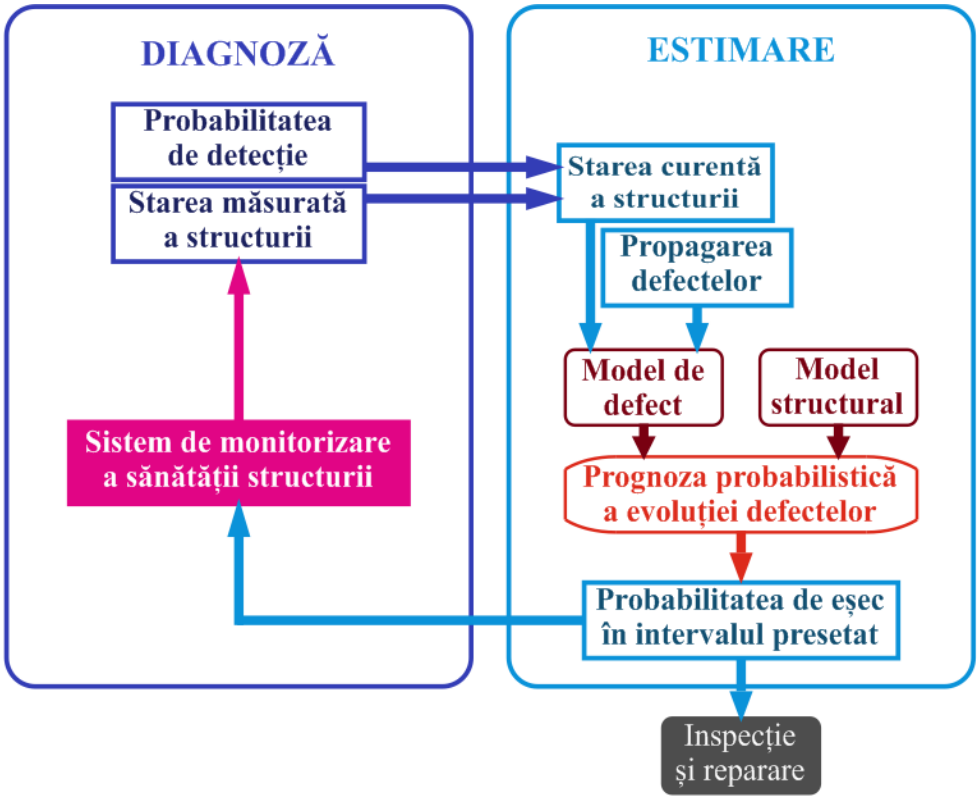


Fig. 2.3. Rolul sistemelor SHM în diagnoza și estimarea duratei de viață a structurilor, adaptat după [Balageas et al., 2010].

În ultimii zece ani, s-au dezvoltat diferite metode de detectare a defectelor din structuri. Aceste metode pot fi clasificate în abordări bazate pe model și abordări bazate pe semnale. În scopul detectării defectelor, metodele modale, bazate pe vibrații utilizează deseori parametrii fizici și/sau modele obținute de la structurile fizice. Modelele sunt de asemenea esențiale când se monitorizează încărcările pentru a se obține informații despre uzura structurii. Metodele bazate pe semnale se bazează pe diferite tipuri de măsurări directe ca: zgomotul, vibrațiile, ultrasunetele sau temperatura.

Ambele abordări, atât cele bazate pe modele cât și cele bazate pe semnale, necesită tehnici de procesare a semnalului; în primul rând se dezvoltă modele exacte și se analizează modificările care au loc în cadrul acestor modele care sunt relevante pentru detectarea defectelor, apoi se extrag trăsăturile (semnalele de interes) și se stabilește o relație între acestea și un posibil defect. Majoritatea abordărilor bazate pe semnale utilizează o relație între condițiile structurale și trăsăturile semnalelor sau simptomele. Relația condiție – simptom nu este ușor de analizat datorită complexității structurilor inginerești, sofisticării de proiectare precum și a utilizării materialelor avansate. În vederea analizei sistemului trebuie utilizate metode diferite de procesare a semnalelor. În prima etapă se utilizează trăsături simple ca momentele spectrale statistice sau parametrii fizici/modali, iar în etapa finală se utilizează trăsături multidimensionale (vectori, matrice, imagini) ca și caracteristici de spectru, semnale sau distribuții frecvență – timp.

În acest context, detectarea defectelor poate fi privită ca o problemă de recunoaștere a trăsăturilor. Acest proces necesită proceduri de selecție a trăsăturilor bazate pe abordări statistice, sintactice sau neurale. Cele mai recente studii în acest domeniu se bazează pe procesul de dezvoltare bazat pe prelucrarea semnalelor [Staszewski & Worden, 2009] și pe mașini de învățare [Worden et al., 2011]. Prin intermediul metodelor modale se poate monitoriza întreaga structură, prin detectarea modificării frecvențelor naturale, fiind mai ridicate la amortizare sau prin detectarea vibrațiilor modale.

Motivația introducerii sistemelor SHM în domeniul industrial

Evaluarea și cunoașterea în timp real a integrității și sănătății structurilor este un obiectiv foarte important pentru producători, utilizatori dar și echipele de întreținere. Astfel, monitorizarea sănătății structurale oferă o serie de avantaje, ca:

- utilizarea optimă a structurilor, reducerea perioadelor de nefuncționare și evitarea accidentelor datorate structurilor care operează în condiții de nesiguranță;
- producerea unor modificări drastice în organizarea muncii și a serviciilor de întreținere, cum ar fi:
  - înlocuirea inspecției de întreținere periodică a structurii cu mentenanța automatizată pe termen lung;
  - reducerea drastică a implicării factorului uman și în consecință a erorilor umane îmbunătățind astfel siguranța și fiabilitatea structurilor.

Conform [Balageas et al, 2010] îmbunătățirea siguranței structurilor este o motivație puternică în special după unele accidente spectaculoase datorate:

- întreținerii nesatisfăcătoare a structurilor din domeniul aerospațial (Fig. 2.4);
- proceselor de prelucrare prost controlate.

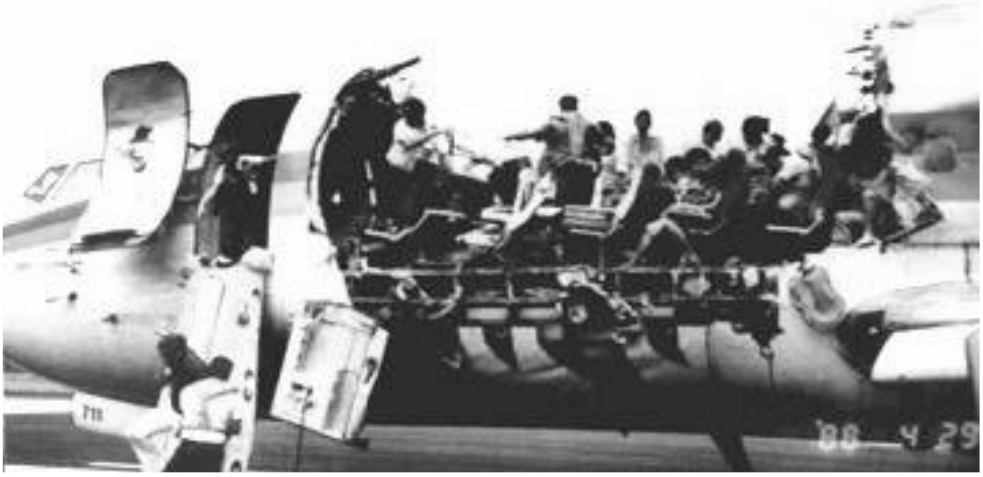


Fig. 2.4. Accidentul zborului 243 al companiei Aloha Airlines din 29 aprilie 1988 datorat coroziunii insuficient controlate în etapa de mentenanță, după [Balageas et al., 2010].

Analiza cauzelor diferite ale accidentelor aviatice conduc la deficiențe de întreținere a structurilor aeronavelor. Conform [Tadeusz et al, 2013], se afirmă că numai 4 % din totalul accidentelor se datorează oboselii structurale. Datorită introducerii sistemelor SHM, îmbunătățirea mentenanței poate duce la reducerea la nivel global a accidentelor din domeniul aerospațial cu cel puțin 10 %.

A doua motivație importantă în cadrul utilizării sistemelor SHM este criteriul economic. Astfel, pentru structurile care conțin sisteme SHM costurile de întreținere și fiabilitatea se mențin constante, în timp ce la structurile clasice, fără sisteme SHM, costurile de întreținere cresc iar fiabilitatea scade. Acest lucru este foarte bine prezentat în graficul din figura 2.5.

Impactul economic al introducerii sistemelor SHM la aeronave nu este ușor de evaluat. Acesta depinde de condițiile de utilizare și astfel este dificil de apreciat impactul asupra costurilor de fabricație ale structurii.

Pe de altă parte, este mai ușor de evaluat timpul economisit de întreținerea bazată pe introducerea sistemelor SHM. Tot în domeniul aeronautic, există și un avantaj pentru producători. Ținând cont de prezența senzorilor din stadiul de proiectare este posibilă o reducere a limitelor de siguranță în unele zone critice. Reducerea greutății structurilor poate conduce la

construcția unor aeronave de mare performanță, cu consum redus de combustibil și care pot zbura pe distanțe mari.

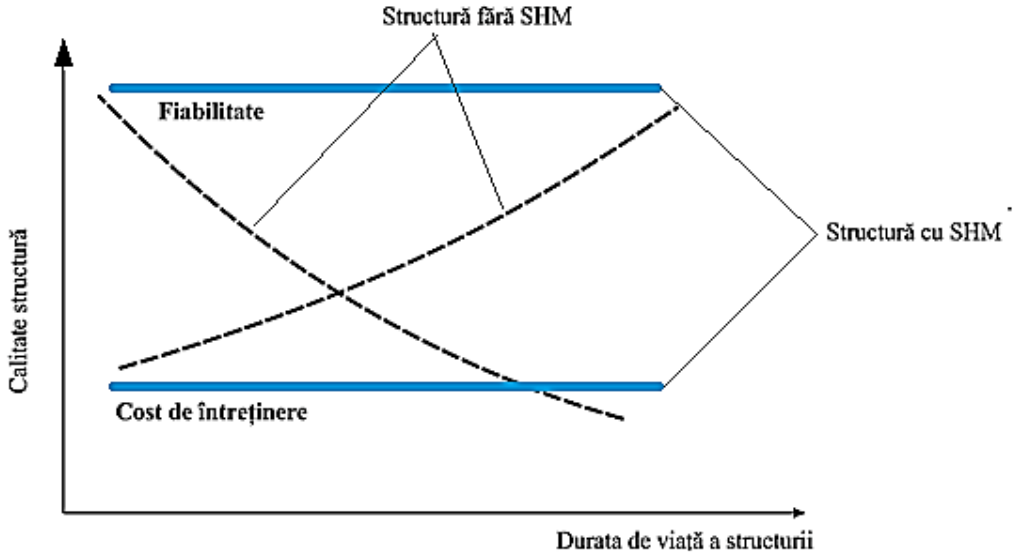


Fig. 2.5. Avantajul din punct de vedere economic al sistemelor SHM pentru utilizatori, adaptat după [Balageas et al., 2010].

În ultimii 30 ani, sistemele de monitorizare a calității structurilor au primit o atenție considerabilă în literatura tehnică dar și în cadrul aplicațiilor din industria aeronautică.

În [Doebling et al., 1990], [Sohn et al., 2003] și [Randall, 2004] se precizează că, în primele etape ale dezvoltării sistemelor clasice SHM, identificarea defectelor determinate de răspunsul dinamic al sistemelor s-a efectuat în mod calitativ prin utilizarea tehnicilor acustice. Mai târziu, dezvoltarea ipotezelor care au stat la baza sistemelor SHM a fost cuplată cu evoluția, miniaturizarea și reducerea costurilor dispozitivelor hardware de calcul digital.

Între anii 1970 – 1980, în industria petrolieră s-au făcut eforturi considerabile de a dezvolta metode de detectare a defectelor bazate pe controlul vibrațiilor care au fost introduse în cadrul platformelor de forare din larg. Problema detectării defectelor a ridicat numeroase dificultăți datorită faptului că locația defectului nu era cunoscută și deoarece anumite zone ale structurii nu erau pregătite pentru măsurători. Pentru a eluda aceste neajunsuri, s-a adoptat o metodologie obișnuită care presupunea simularea defectelor din structură cu ajutorul unor modele numerice, examinarea variațiilor de frecvență de rezonanță care produceau modificări ale structurii simulate și corelarea acestor modificări cu cele reale, măsurate pe platformă.

Conform [Doebling et al., 1990], s-au întâmpinat o serie de probleme practice incluzând dificultățile de măsurare cauzate de zgomotul mașinilor de pe platformă, mediul ostil dar și variația nivelului de stocare al fluidului. Datorită acestor impedimente, această tehnologie a fost abandonată la începutul anilor 1980.

În perioada situată între sfârșitul anilor 1970 și începutul anilor 1980, comunitatea aerospațială a făcut numeroase demersuri în studiul metodelor de identificare a defectelor pe baza controlului vibrațiilor.

Conform [Farrar & Worden, 2007], încă de la jumătatea anilor 1990, studiul identificării defectelor la materialele compozite a fost motivat de dezvoltarea recipientelor de combustibil realizate din material compozit utilizate la vehiculele de lansare reutilizabile. Mecanismele de producere a ruperii materialelor, ca delaminarea cauzată de impact, pentru materialele compozite, sunt semnificativ diferite de cele existente în cazul structurilor metalice. Mai mult decât atât, problema recipientelor de combustibil din compozit a prezentat o serie de provocări deoarece sistemele senzoriale introduse nu trebuia să producă scântei. Acest impediment a condus, mai târziu, la dezvoltarea unor sisteme de senzori pe bază de fibră optică.

[Sohn et al., 2003] a arătat că au existat o serie de preocupări în identificarea tehnicilor de adaptare a sistemelor SHM în aplicațiile din domeniul aeronautic. Aceste preocupări au inclus dezvoltarea metodelor de definire a numărului optim al senzorilor și localizării acestora, identificarea trăsăturilor semnificative la un nivel minim al defectului, capacitatea de a discrimina variațiile trăsăturilor cauzate de defect de cele cauzate de factorii de mediu, dezvoltarea unor metode statistice de a discrimina trăsăturile corespondente structurilor nedeteriorate de cele ale structurilor cu defecte și performanța studiilor comparative a unor metode diferite de identificare a defectelor aplicate pentru un set de date.

După anul 2000, s-a observat o preocupare continuă în dezvoltarea sistemelor SHM avansate, în cadrul aplicațiilor din domeniul aerospațial.

Conform [Cazangiu & Roșca, 2013], o serie de cercetători au utilizat metoda bazate pe emisie acustică (AE), pentru detectarea defectelor din zona trenului de rulare al unui elicopter.

Senzorii AE sunt de regulă utilizați pentru a detecta și monitoriza în timp real undele ultra sonice care sunt produse de modificările din interiorul unei structuri. Utilizând principiul triangulației, senzorii AE atașați de suprafața structurii sau integrați în material pot determina locația fisurii care se produce în interiorul structurii. Semnalele de emisie acustică detectate de

senzori sunt foarte slabe și de regulă trebuie sa fie preamplificate și procesate pentru a se elimina influența zgomotului din mediu.

Sistemul SHM complex bazat pe senzorii de emisie acustică (Fig. 2.6) a fost testat pe un avion de luptă (Fig. 2.7). De asemenea, acest sistem de monitorizare s-a utilizat în cadrul unui experiment pe demonstratorul DC – XA – Delta.

Fig. 2.6. Senzor de emisie acustică utilizat în cadrul sistemului SHM montat în structura elicopterului, după [Cazangiu & Roșca, 2013].

Fig. 2.7 Utilizarea metodei de emisie acustică ca metodă SHM pe un avion de luptă supus unor teste de oboseală, după [Cazangiu & Roșca, 2013].

Conform [Chambers, 2006] s-au efectuat o serie de teste de durabilitate pe aeronavele comerciale. Utilizând standardele existente de durabilitate ale aeronavelor comerciale și militare,

s-au dezvoltat o serie de teste specifice pentru evaluarea sistemelor SHM. Testele s-au efectuat pe senzori PZT montați pe suprafața unor epruvete din Aluminiu. De asemenea, s-au efectuat și teste de mediu pentru a se observa influența factorilor de mediu asupra sistemelor SHM.

Fig. 2.8. Pelicula de senzori PZT, după [Cazangiu & Roșca, 2013].

După [Cazangiu & Roșca, 2013], cercetătorii din China au propus utilizarea unei rețele de senzori piezoelectrici (PZT) (Fig. 2.8) pentru detectarea defectelor în structurile aerospațiale. Cercetările au fost efectuate în China, la Universitatea din Nanjing și s-a adoptat o metodă de detectare a defectelor bazată pe teoria undelor Lamb combinată cu metodele clasice de prelucrare a semnalului.

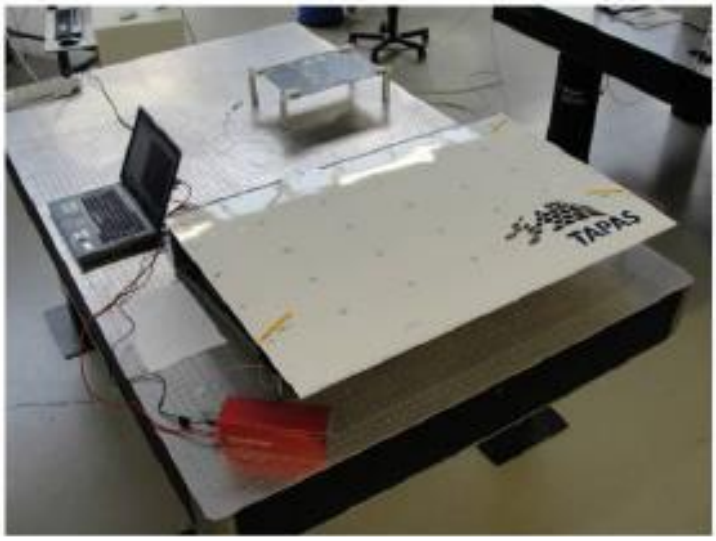


Fig. 2.9. Montajul realizat pentru determinarea comportării la impact a structurii aeronavei, după [Cazangiu & Roșca, 2013].

Sistemul SHM propus a fost aplicat pe o structură de aripă din material compozit în vederea estimării impactului și delaminării. De asemenea, s-au utilizat senzori FBG (Fiber Bragg Grating) pentru monitorizarea temperaturii și a eforturilor din structura aeronavei.

De asemenea, au fost efectuate o serie de cercetări în ceea ce privește sistemele SHM introduse în aplicațiile din industria aerospațială [Cazangiu & Roșca, 2013]. S-au utilizat senzori FBG, montați în diferite locuri pe componentele aeronavei pentru a măsura deformația locală. Astfel, s-a propus un sistem constituit din 4 senzori, un sistem de interogare – demultiplexare de mare viteză, un sistem de achiziție de date și un sistem de procesare a semnalelor. Acest sistem SHM propus a fost aplicat pe o structură de aripă din compozit CFRP (fibră de carbon ranforsată cu plastic).

Alți cercetători au utilizat metoda termografică pentru detectarea delaminării dintr-un panou de compozit CFRP din fuzelajul unui elicopter AW 139 [Cazangiu & Roșca, 2013].

De asemenea s-a propus și utilizat un montaj experimental constituit dintr-o cameră cu infraroșu SC 5600 FLIR, lămpi cu halogen și un computer pentru procesarea datelor. Lămpile cu halogen au fost utilizate pentru a excita suprafața epruvetei în timpul experimentelor. Astfel, s-a măsurat delaminarea care s-a produs în interiorul materialului epruvetei.

Fig. 2.10. Montaj experimental pentru detectarea delaminării unei structuri de fuzelaj pentru elicopterul AW 139: 1–cameră IR, 2–lămpi halogen, 3–panou compozit, 4–computer, după [Cazangiu & Roșca, 2013].

După această privire de ansamblu asupra tendințelor curente în introducerea sistemelor SHM în aplicațiile din domeniul aerospațial, se poate afirma că, la nivel global, cercetătorii sunt din ce în ce mai preocupați de dezvoltarea unui sistem senzorial inteligent integrat pentru detectarea defectelor și furnizarea unei prognoze asupra stării sănătății structurale.

S-a concluzionat că utilizarea sistemelor SHM în cadrul unei drone este mult mai facilă decât instalarea acestora pe aeronave comerciale și de luptă.

La ora actuală, o serie de sisteme SHM inteligente au fost introduse în tehnologia aeronavelor dar un sistem SHM complet și eficient este încă dificil de implementat datorită nivelului de performanță al tehnologiei actuale.

Una dintre acestea este ”*banda inteligentă*” [Baker et al, 2004]. Aplicarea unor benzi adezive confecționate din materiale compozite avansate pentru a repara sau ranforsa structurile compozite sau metalice este considerată o procedură foarte eficientă. Cu toate acestea, autoritățile aeriene sunt adesea reticente în a certifica utilizarea benzilor compozite aplicate pe structurile primare datorită îngrijorării în ceea ce privește fiabilitatea și durabilitatea benzilor adezive. Abordarea benzii inteligente a fost dezvoltată pentru a atenua aceste preocupări și de a facilita repararea compozitelor din cadrul structurii primare.

Conceptul benzii inteligente constă într-un strat de material compozit lipit cu abilitatea de a monitoriza integritatea structurii, realizând o inspecție continuă a structurii. Acest concept va permite și întreținerea structurii monitorizate înainte de producerea ruperii sau repararea structurii.

Obiectivele specifice ale benzii inteligente sunt:

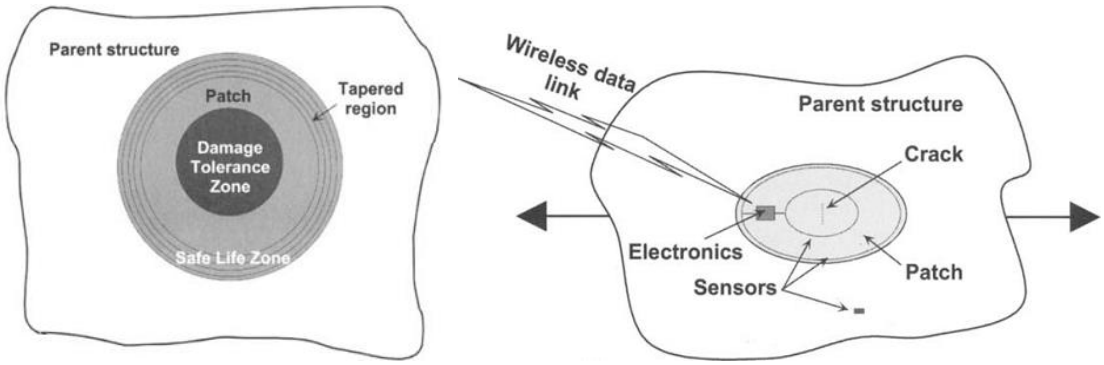
- detectarea dezlipirii materialului în zona se siguranța a benzii (Fig. 2.11, a) care este inacceptabilă deoarece defectul poate crește foarte repede;
- monitorizarea propagării defectului în zona de toleranță a acestuia unde mărirea defectului este stabilă și lentă.

Defectul din zona de toleranță a acestuia poate consta atât în fisuri sau delaminări în structura de bază compozită sau metalică și de asemenea în dezlipiri ale adezivului sau delaminări ale sistemului tip bandă aplicat.

După [Baker et al, 2004], cercetările curente sunt focalizate pe evaluarea unei noi tehnici de detectare și unor noi tipuri de senzori care să fie integrați în sistemele de reparare aplicate în scopul detectării și monitorizării dezlipirilor stratului adeziv, delaminării sistemului aplicat, calității lipiturii și vitezelor de creștere a fisurii în substratul metalic de bază.

Cea mai directă abordare pentru a evalua integritatea sistemului inteligent aplicat este de a măsura nivelul solicitării în zona de siguranță (Fig. 2.11, a). Conform acestui concept se monitorizează raportul dintre tensiunea benzii aplicate și tensiunea din componentul respectiv în timpul utilizării. Orice reducere a acestui raport va indica o dezlipire a benzii în zona critică. Nu

există nici o cerință de a măsura încărcarea actuală; dezlipirea este indicată de reducerea tensiunii relative. Senzorii de tensiune sunt monitorizați continuu de un sistem de dimensiuni foarte mici integrat în structură care procesează și stochează informații privind integritatea și calitatea benzii aplicate și apoi transmite aceste date unui computer extern prin conexiune în infraroșu, așa cum este ilustrat în Figura 2.11, b.



a) b)

Fig. 2.11 Schema ”benzii inteligente” a) Zona de siguranță a stratului extern de reparare aplicat (în această zonă nu este permisă nici o dezlipire) și zona de toleranță a defectului (în această zonă este permisă o creștere stabilă a dezlipirii; b) Conceptul de bandă inteligentă [Baker et al, 2004]

Conform [Baker et al, 2004], un alt exemplu de sistem de monitorizare a integrității structurilor este supresia vibrațiilor. Aeronavele de înaltă performanță, în special acelea cu cozi verticale duble ca F/A – 18 sunt de obicei solicitate de fenomene aero-elastice (buffeting) când acestea zboară la un unghi mare de atac. Acest tip de aeronave de înaltă performanță sunt adesea forțate să execute manevre care implică unghiuri mari de atac și în aceste condiții se creează vortexuri instabile care provin de la aripă și fuzelaj care afectează cozile duble cauzând o solicitări substanțiale. Aceste solicitări rezultă din tensiunile oscilatorii care pot cauza defecte semnificative induse de oboseală care pot limita capacitățile și disponibilitatea aeronavei.

Astfel, după [Baker et al, 2004], utilizarea actuatorilor piezoelectrici ceramici în combinație cu controlul structural activ pentru a ameliora defectele induse de fenomenul de buffeting (și de altfel și creșterea duratei de viață a cozilor verticale) este o soluție posibilă în domeniul aerospațial.

Pentru a demonstra această tehnologie, s-a elaborat un test experimental pe o coadă verticală a aeronavei F/A – 18. S-au atașat actuatorii ceramici piezoelectrici pe învelișul din material compozit a capătului de tribord, după cum este ilustrat în Figura 2.12. Structura a fost testată într-un stand experimental care genera încărcări statice și dinamice pe cadrul acesteia.

Aceste încărcări erau identice cu cele din timpul unui zbor real (cum ar fi manevrele de zbor). S-a demonstrat astfel că la câștiguri maxime de control sistemul de ameliorare a solicitării cauzate de fenomene aero-elastice a fost capabil să reducă nivelul total al valorii medii pătratice (Root mean square - RMS) a tensiunii în cadrul unei lățimi de bandă de la 0 la 100 Hz.

Testele au fost realizate în condiții diferite de zbor unde în cazul condiției de zbor nominal, tensiunea critică a fost redusă cu 51 % iar în condiții de zbor sever reducerea a fost de 15 %.

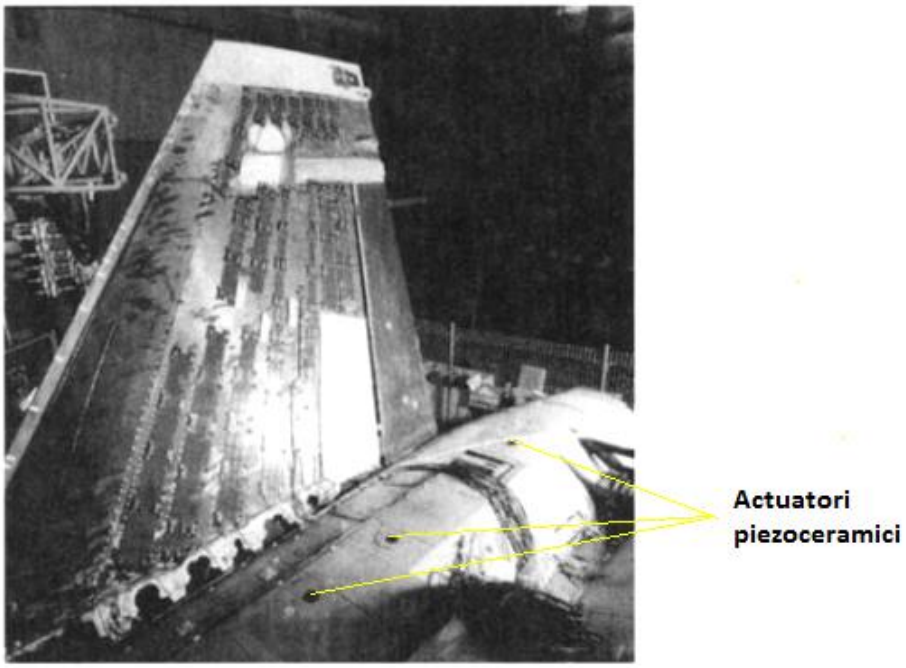


Fig. 2.12 Actuatori piezoceramici, lipiți pe învelișul compozit de carbon/epoxy al cozii unui aeronave tip F/A-18 pentru a reduce răspunsul vibrațiilor datorită fenomenelor aero-elastice (buffeting). [Baker et al, 2004]

2.2. STRUCTURI ÎN DIVERSE DOMENII

După [Pullan, 2000], prin structură de fabricație se înțelege totalitatea mijloacelor materiale și componente nemateriale care concură la realizarea unui produs și care sunt grupate în timp și în spațiu într-un mod bine determinat. Orice structură este alcătuită din componente iar la rândul lor componentele sunt fabricate din materiale. În funcție de utilizarea structurilor, materialele pot fi diverse: materiale naturale (lemn, os, bambus, mușchi, metal), materiale de construcții (beton, asfalt) dar și materiale compozite avansate utilizate în diferite ramuri ale ingineriei.

În inginerie și arhitectură, structura este considerată ca un corp sau un ansamblu de corpuri în spațiu care formează un sistem capabil să suporte solicitări. Pentru a-și realiza funcția, fiecare component al unei structuri trebuie să fie destul de robust pentru a suporta propria greutate dar și tensiunile la care structura este supusă fără a-și modifica forma sau dimensiunile, [Pullan, 2000].

Clasificarea structurilor fizice

Structurile fizice (care se întâlnesc de regulă în arhitectură și inginerie) pot fi clasificate astfel:

- *structuri naturale* (Fig. 2.13) – acestea se întâlnesc în mod natural în mediul înconjurător (munți, ghețari, etc);
- *structuri prelucrate* (Fig. 2.14) – acestea sunt proiectate și construite de către om (castele, poduri, etc.).

Fig. 2.13. Exemplu de structură naturală [http://www.ro.wikipedia.org].

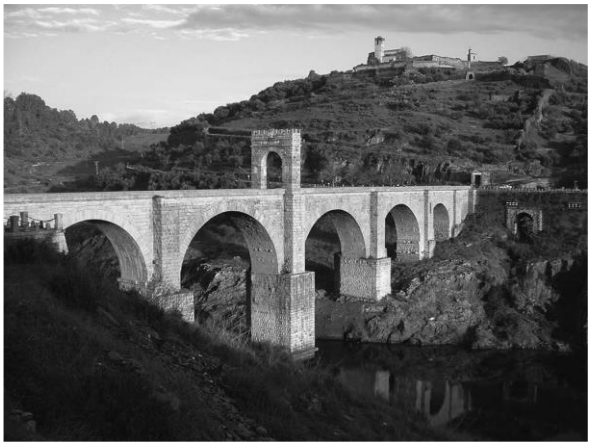


Fig. 2.14. Exemplu de structură prelucrată [Wells, 2010].

După modul de utilizare, structurile fizice se împart în mai multe categorii, și anume:

- *structuri de construcții* (Fig. 2.15) – acestea se mai numesc și arhitecturale și se întâlnesc în domeniul ingineriei civile (clădiri, poduri);
- *structuri non – construcții* (mecanice – Fig. 2.16). Acest tip de structuri se întâlnesc în majoritatea ramurilor ingineriei: domeniul aerospațial, la construcția autovehiculelor și diferitelor ambarcațiuni nautice.

Fig. 2.15. Exemplu de structură arhitecturală [Wells, 2010].

Fig. 2.16. Exemplu de structură mecanică [http://www.wikipedia.org].

Din punct de vedere al proiectării, structurile fizice pot fi:

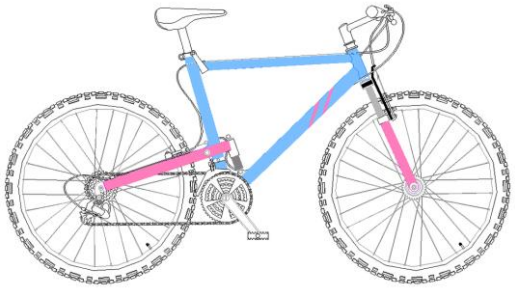
- structuri masive – Fig. 2.17;
- structuri laminare – Fig. 2.18;
- structuri cu cadre – Fig. 2.19.

Fig. 2.17. Exemplu de structură masivă [ro.wikipedia.org].

Fig. 2.18. Exemplu de structură laminară [http://www.cmdingenieros.com/].

a)

b)



c)

Fig. 2.18. Exemple de structuri cu cadre: a) structuri civile, b) biostructuri (schelet uman), c) structuri mecanice (cadru de bicicletă), după [ro.wikipedia.org].

La rândul lor, structurile masive sunt compuse din materiale naturale dispuse într-o formă particulară sau din elemente de regulă groase și robuste. În timpul solicitărilor mecanice sau termice, structurile masive își păstrează greutatea. De obicei în alcătuirea acestor structuri intră o cantitate mare de material. Avantajul structurilor masive este că dacă acestea pierd o mică cantitate de material nu se observă aproape nici un efect asupra rezistenţei totale a structurii. Structurile masive nu sunt întotdeauna solide dar sunt compuse din straturi, fiecare strat având funcţii specifice.

Structurile laminare sau de tip înveliș își pot menține forma la solicitări chiar dacă nu conțin cadre de susținere sau material masiv. Aceste structuri sunt comprimate într-un strat subțire compus din câteva elemente orientate astfel încât să ofere rezistență și robustețe structurii. Avantajul acestor structuri este că acestea sunt goale înăuntru și pot fi cu ușurință utilizate ca și containere.

Structurile cu cadre conțin un schelet sau cadru de susținere de dimensiuni mai mici sub formă de bare sau tuburi (numite membre) care sunt îmbinate între ele și apoi acoperite cu alte materiale. Un exemplu de astfel de structură este scheletul uman. În domeniul ingineriei mecanice sau civile se întâlnesc o serie de astfel de structuri, cum ar fi: pereți de susținere, poduri, cadre de bicicletă, caroserii de automobile, diferite componente ale aeronavelor.

La rândul lor, structurile cu cadre pot fi clasificate în [Pullan, 2000]:

- structuri cu grinzi –au elemente orizontale și verticale îmbinate pentru a forma o rețea;
- structuri suspendate – la acestea greutatea este susținută de cabluri atașate de alte elemente ca stânci, pereți sau poduri.

Fig. 2.19. Exemplu de structură cu grinzi, după [Wardenier et al, 2010].

Fig. 2.20. Exemplu de structuri suspendate, după [Wells, 2010].

Din punct de vedere al mobilității, structurile se împart în:

- *structuri mobile* – care se pot mișca având elementele astfel îmbinate încât să permită deplasarea structurii;

- *structuri fixe* – care suferă doar deplasări minime, fiind de regulă structuri masive sau de înveliș.

Analizând definiția structurii, se poate afirma că din punct de vedere constructiv la baza oricărei structuri stă materialul. Deci se poate spune că dacă materialul rezistă la solicitări atunci și structura va fi rezistentă și rigidă.

Încă de la sfârșitul anilor 1980, conceptul structurilor și materialelor inteligente a devenit din ce în ce mai prezent în gândirea inginerească. Acest concept a fost utilizat în special în domeniul aeronautic dar și în ingineria civilă.

După cum se observă în figura 2.21, conform [Balageas et al., 2010], conceptul structurilor/materialelor inteligente a fost considerat ca o etapă în evoluția generală a obiectelor (componentelor) prelucrate manual. Se poate observa că există o tendință continuă de la simplu la complex, începând de la utilizarea materialelor omogene, furnizate de natură și acceptate cu proprietățile lor naturale, urmate de multi- materialele (în special materiale compozite) care permit crearea structurilor cu proprietăți adaptate utilizărilor specifice.

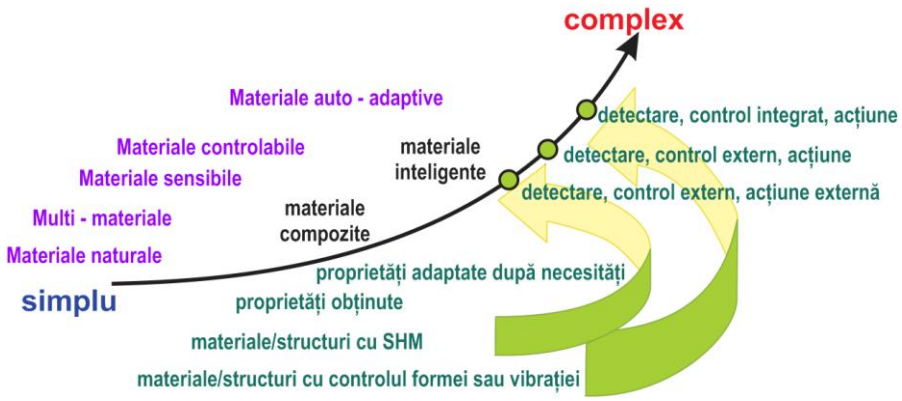


Fig. 2.21. Evoluția generală a materialelor/structurilor și poziția structurilor inteligente, inclusiv structurile cu sisteme SHM, adaptat după [Balageas et al., 2010].

De fapt, materialele compozite și multi-materialele au înlocuit în mare parte structurile de materiale omogene. Acest lucru s-a produs în special în industria aerospațială. De exemplu, părțile compozite sunt utilizate în mod curent la aeronavele comerciale moderne (Fig. 2.22). Conform Figurii 2.22 se poate observa că 50 % din structura aeronavei Boeing 7E7 Dreamliner este alcătuită din material compozite. Este bine de menționat că această aeronavă este prima care a fost echipată cu sisteme SHM, în special sisteme de detectare a impactului.

Următoarea etapă constă în producerea unor noi materiale și structuri cu proprietăți adaptabile la variațiile condițiilor de mediu, care ar trebui să fie sensibile, controlabile și active.

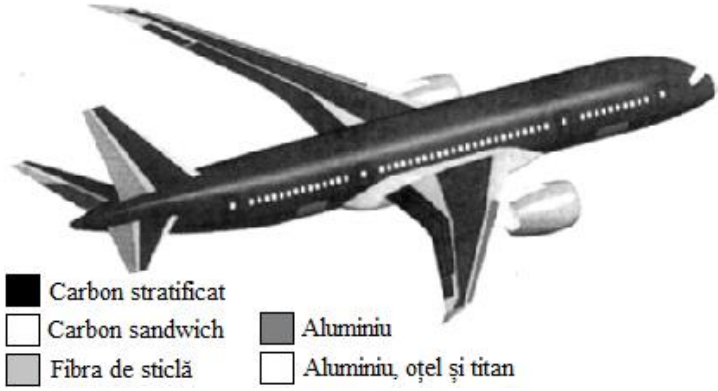


Fig. 2.22. Exemplu al creșterii importanței materialelor compozite la aeronavele civile, adaptat după [Balageas et al., 2010].

Etapa finală către obținerea structurilor inteligente se estimează a fi producerea unor structuri cu proprietăți de auto reparare sau cel puțin proprietăți de atenuare a defectelor. Pentru atenuarea defectelor. Utilizarea actuatorilor din aliaje cu memorie a formei ar putea fi o soluție care să inducă eforturile și să reducă tensiunile din zonele cu concentrații de tensiuni.

2.3. METODE DE ANALIZĂ A CALITĂȚII STRUCTURILOR

Conform [Juran, 1988], prin ***calitatea funcțională unei structuri*** se înțelege expresia gradului de utilitate a structurii respective, măsura în care, prin ansamblul caracteristicilor sale tehnico-funcționale, psiho-senzoriale și economice, aceasta satisface nevoia pentru care a fost creat și respectă restricțiile impuse de interesele generale ale societății privind eficiența social-economică, protecția mediului natural și social.

Calitatea reprezintă inclusiv nivelul tehnic al structurilor/componentelor, deoarece o structură cu performanțe tehnice scăzute, nu poate fi considerată ca fiind de calitate.

Pentru aprecierea sau evaluarea calității, în practică se utilizează parametrii de calitate. Acestea sunt proprietăți cantitative sau calitative utilizate pentru evidențierea cerințelor de calitate impuse produselor și/sau componentelor lor.

De regulă, în domeniul industrial se utilizează o serie de parametrii de calitate [Juran, 1988], ca: parametrii tehnici, economici, psiho-senzoriali, de disponibilitate, cu caracter social.

Parametrii tehnici se referă la caracteristicile intrinseci ale structurii, menite să satisfacă într-un anumit grad o utilitate. În general, acești parametrii se pot măsura obiectiv, direct sau indirect, cu o precizie suficientă, prin mijloace tehnice. Dintre parametrii tehnici mai

semnificativi, o importanță deosebită o au precizia geometrică sau dimensională a structurii/componentei respective și precizia cinematică sau de mișcare.

Parametrii economici reprezintă aspectele de ordin economic ale producerii și utilizării structurilor. Acestea sunt exprimate printr-o serie de indicatori specifici, cum ar fi: costul de producție, prețul, cheltuieli de mentenanță, randamentul, gradul de valorificare a materiilor prime.

Parametrii psiho-senzoriali se referă la efectele de ordin estetic și ergonomic pe care le au structurile asupra utilizatorilor, prin formă, culoare, grad de confort, etc. Aceștia sunt variabili în timp iar aprecierea lor este influențată de factori subiectivi.

Parametrii de disponibilitate reflectă capacitatea structurilor de a-și realiza funcțiile utile de-a lungul duratei lor de viață. Acești parametrii sunt definiți de două concepte fundamentale: fiabilitatea și mentenabilitatea.

După [Juran, 1988], prin fiabilitate se înțelege probabilitatea ca structura respectivă să-și îndeplinească funcțiile cu anumite performanțe și fără defecțiuni un anumit interval de timp și în condiții de exploatare date. Astfel, fiabilitatea devine o mărime care caracterizează siguranța în funcționare a unei structuri inginerești. Între calitate și fiabilitate există o strânsă legătură, fiabilitatea fiind calitatea structurii extinsă în timp.

Mentenabilitatea reprezintă probabilitatea ca în urma unei defecțiuni, starea de bună funcționare să fie restabilită într-un interval de timp dat, adică structura să poată fi reparată cu ușurință. Legat de acest parametru se mai pot defini două noțiuni importante: mentenantă și disponibilitate.

Mentenanța reprezintă activitatea depusă în vederea restabilirii capacității de bună funcționare a structurii după ce s-a produs o defecțiune.

Disponibilitatea se referă la abilitatea unei structuri de a fi repusă în funcționare într-un anumit interval de timp după ce s-a produs o defecțiune.

Parametrii cu caracter social se referă la efectele pe care le au sistemele tehnologice de realizare a structurilor, cât și utilizarea acestora, asupra mediului natural, asupra siguranței și sănătății utilizatorilor.

Analiza calității funcționării unei structuri/componentă este o activitate esențială în cadrul ciclului de asigurare a calității, la nivel companiilor industriale. Activitatea de analiză a calității presupune analiza unei stări actuale necorespunzătoare în scopul identificării modalităților de intervenție pentru a se ajunge la o stare viitoare acceptabilă. Rezolvarea acestor probleme presupune parcurgerea unui ciclu universal, prezentat în figura 2.23.

După [Juran, 1988], în derularea acestor procese pot apărea câteva erori ce trebuie evitate: propunerea greșită a problemei de rezolvat și aplicarea rapidă a unei soluții ce se demonstrează în timp că nu este cea optimă.

Este bine cunoscut că aliajele metalice și materialele compozite pot fi considerate ca materiale ortotrope. În consecință, sunt necesare o serie de metode experimentale care să fie capabile să ofere informații despre starea de tensiuni și deformații a acestora cât și pentru evidențierea mecanismelor de cedare a structurilor.

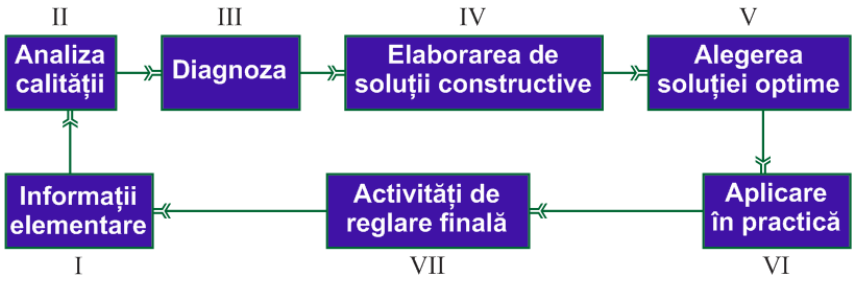


Fig. 2.23. Ciclu universal de asigurare a calității funcționale.

Aceste informații pot fi oferite atât de la suprafața epruvetelor cât și din volumul acestora. În acest sens cele mai utilizate (și de asemenea cele mai accesibile) metode experimentale achiziționează informații doar de la suprafața unei structuri.

Desigur, câteva metode experimentale mai speciale și mai costisitoare sunt capabile să ofere informații din interiorul structurilor, dar în practica industrială se operează cu o mare varietate de tehnici de investigație și cu combinații ale acestora, dintre care cele mai utilizate sunt [Szava et al., 2013]:

- *tensometria electro-rezistivă;*
- *metode fotoelastice;*
- *metode Moiré;*
- *metode termografice;*
- *metode radiografice;*
- *metode ultrasonice;*
- *metoda emisiei acustice;*
- *metoda corelării imaginii vizuale (VIC – Video Image Correlation).*

Toate aceste tehnici și metode pot fi aplicate și pentru efectuarea unor determinări și analize pe structuri din materiale metalice și compozite, ținând seama de anumite particularități constitutive ale materialului structurii, legate de ortotropie, neomogenitate și rigiditate, care

impun ajustări corespunzătoare, atât în ceea ce privește utilizarea metodei experimentale propriu-zise, cât și în interpretarea rezultatelor măsurărilor.

a) Tensometria electro-rezistivă

Tensometria electro-rezistivă este una din cele mai utilizate tehnici experimentale, utilizată atât pentru determinarea caracteristicilor elastice ale structurilor, dar și pentru studiul comportării acestora sub acțiunea solicitărilor exterioare.

În practică se utilizează cel mai frecvent traductoare tensometrice care au rețeaua confecționată din constantan sau karma, materiale ce prezintă o bună sensibilitate, stabilitate și rezistență la oboseală.

Se recomandă următoarele caracteristici ale traductoarelor rezistive [Szava et al., 2013]:

- baza de măsurare mai mare de 3 mm, dar nu foarte mare;
- rezistența electrică a traductorului să fie mai mare de 350 Ω;
- nivelul de excitare să fie mai mic decât 3 V.

În figura 2.24 este prezentat un tip de traductor rezistiv cu fire lipite.

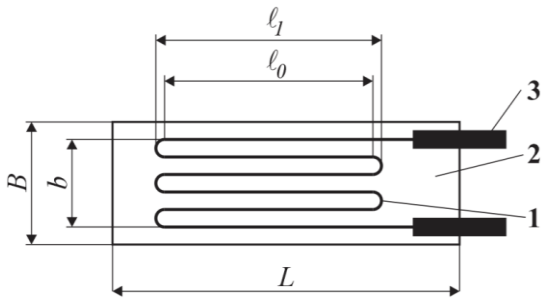


Fig. 2.24. Traductor rezistiv cu fire lipite: L – lungimea totală a traductorului; B – lățimea totală a traductorului; ℓ_0 – lungimea activă a serpentinei firului fără lungimea buclei; ℓ_1 – lungimea serpentinei firului; b – lățimea serpentinei firului; 1 – elementul sensibil rezistiv; 2 – elementul purtător; 3 – terminalele pentru conexiuni, după [Szava et al., 2013].

O caracteristică importantă a traductoarelor este densitatea de putere, mărime care arată cantitatea de căldură degajată de traductorul rezistiv. Ea depinde de o serie de factorii cum ar fi: dimensiunile rețelei, rezistența traductorului și nivelul de excitare.În funcție de mărimea densității de putere pot apărea sau nu tensiuni locale ce modifică proprietățile materialului structurii.

Traductoarele rezistive simple (fig. 2.25), sunt orientate pe o singură direcție și sunt rar utilizate pentru structuri compozite sau aliaje deoarece direcțiile tensiunilor principale pot să nu coincidă cu direcțiile deformațiilor specifice principale.

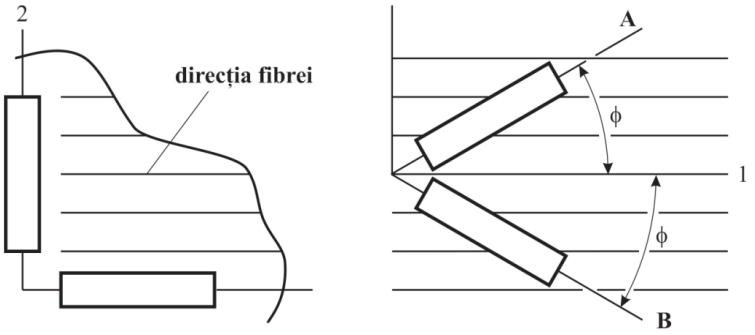
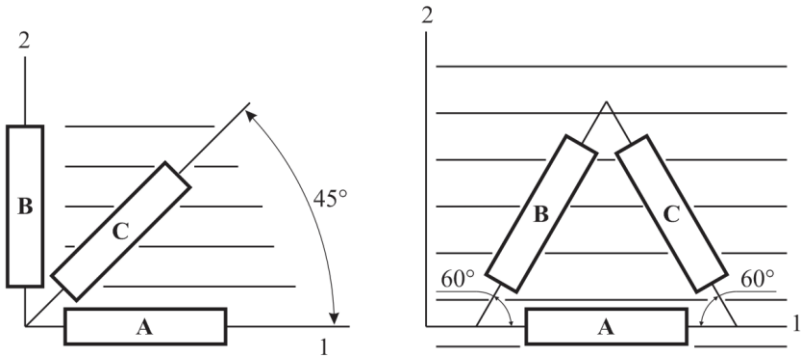


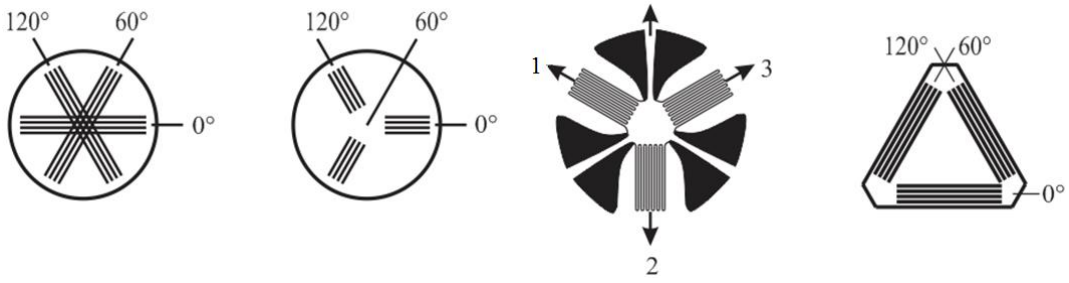
Fig. 2.25. Traductoare rezistive simple, după [Szava et al., 2001].

Mai utilizate pentru controlul structurilor compozite sunt traductoarele sau rozetele cu două direcții de măsurare (tip L și tip V) (fig. 2.26) și cele cu trei direcții de măsurare (rectangulare sau delta (Δ) (fig.2.27.



a) b)

Fig. 2.26. Rozete cu două direcții de măsurare: tip L (a) și V (b), după [Szava et al., 2001].



a) b)

Fig. 2.27. Rozete cu trei direcții de măsurare, tip rectangulare (a), sau delta (b), după [Szava et al., 2013].

Conform [Szava et al., 2013], principalele erori de măsurare care pot apărea în timpul experimentelor efectuate cu metoda tensometriei electro-rezistive, sunt următoarele:

- nealinierea mărcii tensometrice față de direcția de solicitare, la utilizarea traductoarelor simple;
- efectul sensibilității transversale, care la o creșterea semnificativă a erorilor de la 10% până la 200%;
- măsurarea deformațiilor la suprafața structurii duce la erori suplimentare, deoarece în apropierea suprafețelor exterioare teoria clasică a laminatului nu mai este valabilă și nici ipotezele ce stau la baza calculelor nu mai sunt acceptabile.
- lipirea imprecisă a rozetelor tensometrice ceea ce determină erori de până la 65%.

Măsurările efectuate prin utilizarea traductoarelor tensometrice pe structurile din domeniul industrial și civil, urmăresc trei obiective principale:

- caracterizarea elastică a materialului structurii;
- determinarea tensiunilor din structuri aflate în stare generală de tensiune;
- măsurarea deformațiilor specifice interne, la nivelul componentelor structurii, prin încorporarea traductoarelor rezistive în structura materialului compozit.

b) Metode fotoelastice

Conform [Szava et al., 2013] fotoelasticitatea este una dintre metodele experimentale particulare care oferă un model de analiză a câmpului de tensiuni, acest model fiind alcătuit din materiale transparente care au proprietăți de birefringență accidentală.

Materialele transparente sunt considerate materiale omogene, dar anizotrope din punct de vedere elastic și optic.

Asemenea modele se folosesc și pentru a simula anizotropia compozitelor opace armate cu fibre (bor - epoxy, grafit - epoxy etc).

Modelele bidimensionale se folosesc pentru determinarea distribuției tensiunilor în jurul fibrelor, în planele secțiunilor transversale și longitudinale. Aceste modele sunt folosite și în fotoelasticitatea dinamică, în vederea studierii mecanismelor ruperii și a propagării fisurii la scară micromecanică.

Modelele tridimensionale sunt analizate folosind tehnica "înghețării" tensiunilor. După [Szava et al., 2001], în practică, la unele determinări pe structuri industriale, este utilizată tehnica fotoelasticității prin reflexie. În acest caz, pe suprafața structurii care urmează a fi investigată se fixează o folie fotoelastică prin intermediul unui adeziv reflectorizant. Cu ajutorul unui

polariscop, cu reflexie, prezentat în figura 2.28, suprafața structurii este examinată, determinându-se diferența tensiunilor principale în fiecare punct.

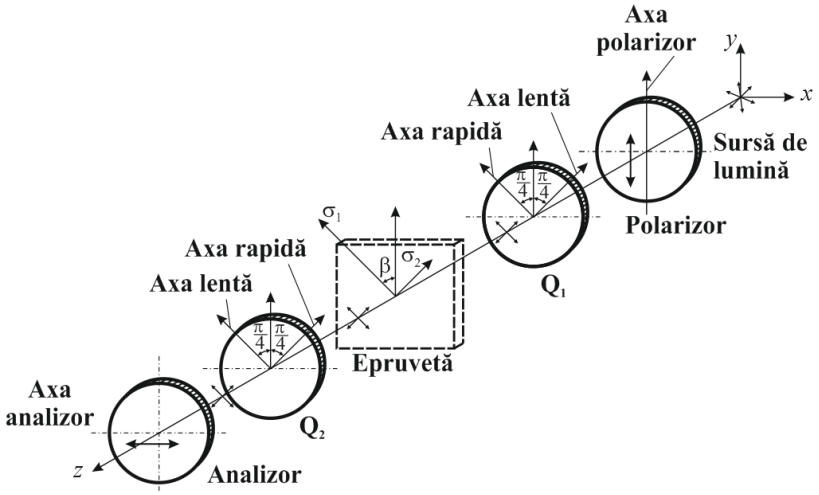


Fig. 2.28. Polariscop circular, după [Szava et al., 2013].

Folosind un dispozitiv special de compensare se poate determina în fiecare punct de pe suprafața structurii valoarea fracționară *N* a ordinului de bandă. Utilizând această tehnică se pot pune în evidență zonele maxim solicitate de la suprafața structurii și în anumite situații pot fi localizate anumite deteriorări interne (delaminări, ruperi de fibre). Dacă apar gradienți mari de tensiune în materialul structurii sau dacă în modelele investigate apar stări tridimensionale de tensiuni, fotoelasticitatea tradițională nu mai dă rezultate bune, datorită micșorării sensibilității.

Metodele fotoelastice sunt folosite din ce în ce mai puțin datorită dificultăților întâmpinate la modelare, mai ales în cazul compozitelor opace.

c) Metode Moiré

Conform [Szava e.a. 2013] fenomenul franjelor Moire a fost prima dată descris de Lord Rayleigh în 1874 și apoi de Ringhi în 1887 care a început să analizeze formarea franjelor Moire (Fig. 2.29).

Prin suprapunerea a două rețele de linii paralele se obține o serie de franje, numite Moiré. Aceste metode oferă posibilitatea determinării și distribuției deformațiilor specifice ale punctelor aflate pe suprafața structurilor, utilizând relații geometrice, fără alte fenomene fizice intermediare.

După [Szava et al., 2001] există trei categorii principale de franje Moire: franje Moire geometrice, franje Moire prin proiecție și franje Moire prin reflexie.

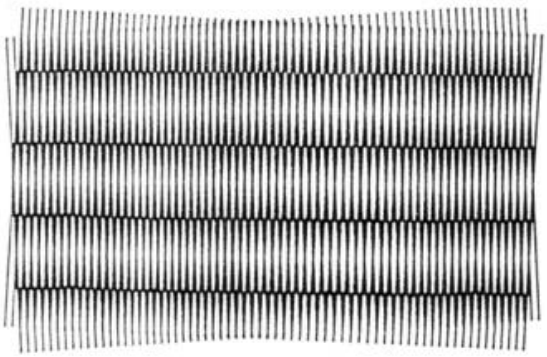


Fig. 2.29. Franje Moiré obținute printr-o mică rotire a rețelei, după [Szava et al., 2013].

Moiré geometric

O franjă Moiré geometrică constă din două rețele: rețeaua obiect, care se aplică epruvetei sau structurii ce se analizează și rețeaua de referință, având aceeași densitate a liniilor ca și prima [Alămoreanu et. al., 1992].

Rețelele sunt formate din linii paralele, echidistante, de grosime egală cu distanța dintre ele, trasate pe o direcție sau pe două direcții perpendiculare, având densitatea maximă de 400 linii/cm.

Conform [Szava et. al., 2001], măsurarea deplasărilor în plan se face astfel:

- pe suprafața plană și netedă a structurii, se lipește un film pe care există rețeaua obiect;
- rețeaua de referință aflată tot pe un film se suprapune cu emulsia de pe rețeaua obiect, astfel încât cele două rețele să fie paralele fără a produce franje de interferență;
- se încarcă structura și se numerotează franjele obținute;
- se calculează deplasarea într-un punct al structurii, prin efectuarea produsului dintre pasul rețelei și ordinul franjei în acel punct (deplasările pe direcțiile orizontală și verticală se calculează independent).
- Deformațiile specifice se obțin prin derivarea grafică a deplasărilor.

Moiré prin proiecție

După [Szava et al., 2013], această metodă utilizează o singură rețea și permite determinarea unor deplasări normale la suprafața structurii, procedându-se astfel:

- suprafața corpului care se analizează, este acoperită cu vopsea mată, astfel încât proiecția rețelei (umbra ei) să aibă contrast maxim;
- se iluminează rețeaua de la distanță, astfel încât umbra fiecărei linii să fie cât mai îngustă;

- se calculează deplasările punctelor de la suprafața structurii pe o direcție normală la suprafață, ținând seamă de faptul că dimensiunile franjelor de interferență sunt proporționale cu distanța de la rețea la suprafața corpului.

Moiré prin reflexie

În cazul celui de al treilea tip de franje Moire, procedeul de lucru este următorul [Szava et al., 2013]:

- se acoperă suprafața compozitului cu un lac reflectorizant;
- se plasează rețeaua în fața structurii și se fotografiază imaginea reflectată, obținând astfel imaginea de referință;
- după încărcarea structurii, fotografiind din nou imaginea reflectată și suprapunând-o peste prima, se obțin franjele de interferență;
- dimensiunile franjelor sunt proporționale cu rotirea suprafeței compozitului în plane perpendiculare pe liniile rețelei;
- se rotește rețeaua cu 90° și se repetă procedeul, obținându-se un nou set de rotiri, care împreună cu primele permit determinarea tuturor curburilor.

d) Metode termografice

După [Drăgan, 2014], termografia este o metodă experimentală utilizată pentru detectarea și analiza deteriorărilor ce pot să apară în materialul unei structuri. Metoda constă în determinarea liniilor izoterme de pe suprafața materialului.

Metoda se bazează pe principiul vizualizării emisiei de căldură, fiind utilizate două procedee: activ și pasiv.

Procedeul activ constă în degajarea căldurii din interiorul corpului în urma unei încărcări ciclice, cantitatea de căldură degajată depinzând de mărimea încărcării, de valorile modulelor de elasticitate ale materialului compozit, dar și de frecvența de solicitare.

Concentrarea tensiunilor în jurul deteriorărilor produce o intensificare a căldurii emise de acea zonă. Astfel, ruperea fibrelor, una dintre principalele deteriorări ale compozitelor armate cu fibre, generează local căldură în timpul testării active.

În procedeul pasiv, corpul este încălzit de la o sursă exterioară și este vizualizată conducția căldurii, aceasta fiind influențată de discontinuitățile geometrice și de cele de material. Delaminările duc la o conducție neuniformă a căldurii în timpul testării pasive. [Drăgan, 2014]

După [Drăgan, 2014] pentru procesarea termică a imaginii se folosesc două metode:

- metoda chimică;
- metoda electronică.

Metoda chimică utilizează cristale lichide care sunt foarte sensibile cu temperatura și au proprietatea de dispersa radiația vizibilă.

Metoda electronică folosește un detector în infraroșu.

Principiul de măsurare se bazează pe efectul termoplastic, care permite stabilirea unei relații între tensiunile principale și temperatură. Distribuția de temperatură rezultată este detectată prin monitorizarea radiației infraroșii emise de pe suprafața epruvetei, cu ajutorul unei camere video-termografice, în timp real.

Regiunile care au delaminări apropiate de suprafață sunt ușor de detectat prin intermediul unor gradienți de temperatură prestabiliți, față de care se raportează emisia de căldură din acele zone [Hobbs et al., 1993].

Energia termică emisă de un material compozit depinde de proprietățile suprafeței sale, de temperatura sa și de emisivitatea sa termică. Emisivitatea depinde la rândul ei de mai mulți factori: temperatura, starea fizică, finisarea suprafeței, straturile moleculare de suprafață și se determină experimental, pentru fiecare material compozit.

Detecția radiației infraroșii prin video-termografie se realizează cu ajutorul detectoarelor în infraroșu.

Conform [Drăgan, 2014], termografia în timp real cere ca întregul câmp de studiat să fie scanat foarte rapid, astfel încât temperatura fiecărui punct să poată fi măsurată și afișată. O scanare foarte rapidă se poate realiza cu ajutorul unui sistem de oglinzi care se învârtesc cu viteză foarte mare. Radiația infraroșie emisă de materialul compozit este reflectată de oglinzi către materialul semiconductor al detectorului în infraroșu și odată cu rotirea oglinzilor apare un desen complet al suprafeței analizate.

Răspunsul detectorului termografic la radiația infraroșie este afișat pe monitoare la intervale foarte scurte.

Metodele termografice prezintă avantajul unor măsurări pe structuri reale, fără contact direct cu structura și permit obținerea unor informații referitoare la o zonă largă din structură.

După [Szava et al., 2013], metodele termografice au următoarele avantaje:

- măsurarea se face pe structura reală, fără contact direct, obținându-se nivelul tensiunilor într-o zonă largă din structură;
- sensibilitate ridicată;

- măsurările se pot efectua la temperaturi înalte și în regim dinamic.

O altă metodă ce analizează emisia de căldură produsă de o excitație vibratoare este vibro-termografia [Reifsnider et al. 1980]. Vibrațiile sunt de amplitudine joasă și frecvență înaltă, până la 18 KHz.

Vibro-termografia poate furniza informații asupra începutului deteriorării materialului până la distrugerea sa, precum și asupra regiunilor cu concentratori de tensiuni (găuri, crestături etc).

Dezvoltarea gradienților de temperatură și gradul de încălzire depind de gradul de delaminare, de extinderea deteriorărilor și de frecvența cu care se aplică energia mecanică de vibrație.

e) Metode radiografice

Conform [Szava et al., 2001] radiografia cu raze X este un proces care permite evidențierea deteriorărilor care pot să apară în structura unui material compozit precum și a mai multor caracteristici ale acestora.

Radiografia cu raze X la tensiune scăzută

După unii autori [Szava et al., 2001] radiografia cu raze X este cea mai veche metodă pentru controlul nedistructiv al structurilor.

Defectele și deteriorările apărute în materialele structurii sunt de dimensiuni foarte mici (1-5 mm) iar pentru vizualizarea lor este necesar un contrast foarte puternic.

S-a constatat apariția unor contraste cu 15% mai mari când s-a utilizat o tensiune de 20 KV, față de o tensiune de 40 KV.

Pentru compozite subțiri (1-3 mm), tensiunile cele mai folosite sunt între 15 și 25 KV.

Radiografia penetrantă cu raze X

Cu ajutorul acestei metode se pot studia deteriorările care apar la suprafața compozitului: delaminări, fisurări longitudinale și transversale ale matricei [Szava et al., 2001].

Dacă se urmărește vizualizarea fisurilor mici ale materialului structurii sau a delaminărilor este necesară utilizarea unui penetrant ce permite chiar și evidențierea porilor. În același timp, el creează un contrast puternic între zonele cu defecte (deteriorări) și cele fără defecte prin absorbirea diferită a razelor X.

Penetrantul trebuie să fie utilizat cu multă precauție datorită toxicității sale. Acesta nu trebuie să producă fisurări sau desprinderi ale materialului, trebuie să umple complet porii și fisurile existente și să fie ușor de îndepărtat după testare.

În practică se folosesc două metode de penetrare cu raze X a epruvetei [Szava et al., 2001]:

- penetrarea la margine;
- penetrarea prin submersie.

Radiografia "in situ" cu penetrare submersivă în timpul încărcării statice și la oboseală

În scopul determinării defectelor într-o structură, echipamentul de raze X este montat pe o mașină de testare la oboseală, penetrarea realizându-se cu ajutorul unui tub de cauciuc flexibil, ce poate fi ridicat sau coborât pe epruvetă.

Penetrantul trebuie să acopere întregul defect și să nu provoace o mărire a fisurii, timpul de pătrundere fiind dependent de mărimea defectului (deteriorării).

În practică se utilizează mai des penetrația incrementală (se penetrează partea de radiografiat un anumit timp, se radiografiază, apoi procesul se repetă, radiografiile de la fiecare pas comparându-se între ele pentru a se observa propagarea fisurii) [Szava et al., 2001].

Radiografia penetrantă cu raze X se dovedește a fi necesară atunci când detaliile ce se urmăresc a fi obținute sunt foarte fine.

În ultimii ani se folosesc frecvent și alte procedee radiografice: micro-radiografia, stereo-radiografia [Rummel et al., 1980] sau radiografia cu fascicul de neutroni.

Stereo-radiografia constă în efectuare a două radiografii cu raze X pentru aceeași epruvetă, unghiul dintre cele radiografii fiind de 15°. Cele două radiografii sunt apoi vizualizate prin metode stereo-optice, fiecare radiografie fiind vizualizată de către fiecare ochi în parte.

Radiografia cu fascicule de neutroni este eficientă în detectarea defectelor structurale (incluziuni, goluri etc.) ale materialelor compozite.

Radiografia cu raze X nu este capabilă să detecteze ruperea fibrelor în epruvetele armate cu fibre de grafit sau cu fibre aramide. A fost în schimb utilizată cu succes în cazul fibrelor de bor.

f) Metode ultrasonice

Metodele ultrasonice sunt folosite cel mai frecvent în ultimii ani pentru detectarea și identificarea naturii defectelor și deteriorărilor din materialele structurilor [Szava et al., 2013]. Această metodă se bazează pe atenuarea sunetului la frecvențe înalte, la trecerea prin materialul structurii investigate. Principalele surse de atenuare a sunetului sunt:

- efectele vâscoelastice din matrice;
- dispersiile geometrice date de eterogenitatea materialului;
- delaminările și fisurile interne care pot fi puse în evidență printr-o alegere corectă a lungimii de undă a sunetului.

Receptarea emisiei ultrasonice (de la 1 la 15 MHz) se face cu traductori piezoelectrici, care sunt cufundați împreună cu structura de studiat în apă, ca mediu de cuplare uniformă la transmiterea ultrasunetelor. Se folosesc în general două traductoare: unul de emisie a semnalului, de o parte a corpului studiat și altul de recepție, de cealaltă parte. Când se folosește un singur traductor, acesta emite semnalul și tot el îl recepționează pe cel reflectat de pe suprafața cea mai depărtată a corpului.

Înregistrarea semnalelor amplitudine – timp se face într-un punct, pe perimetrul secțiunii transversale sau pe suprafața corpului. O variantă analoagă constă în înregistrarea variației tensiunii la întâlnirea defectului și se compararea acesteia cu variația obținută pentru defecte cunoscute ale unor epruvete (structuri). Metoda permite determinarea microporozității, a rigidității materialului, a procentului volumic de fibre din matrice și a rezistenței la rupere a compozitelor.

Rigiditatea poate fi determinată ultrasonic prin măsurarea vitezei de propagare a undei ultrasonice, cunoscând densitatea materialului.

Măsurările cu ultrasunete au fost folosite pentru a determina toate cele 9 constante elastice ale stratificatelor carbon - epoxy.

Evaluarea nedistructivă convențională a materialelor compozite prin tehnici ultrasonice cum ar fi "scanarea de tip C", utilizează de obicei unde care se propagă normal către suprafața compozitului, aria supusă cercetării în fiecare moment fiind limitată la regiunea acoperită de detector. Acest tip de testare "punctată" necesită foarte mult timp în cazul cercetării structurilor mari, până când detectorul va scana întreaga arie de testat. În practică, compozitele sunt adesea destul de tolerante la defecte mici și de aceea este necesară găsirea unor defecte și deteriorări relativ mari (delaminări pe 10 - 20 mm). Dacă este găsit un defect sau o deteriorare, metodele convenționale pot să fie utilizate apoi pentru caracterizarea lui în detaliu.

Metoda impune necesitatea unui sistem de scanare bine pus la punct, pentru investigarea structurilor aflate în exploatare, de exemplu în aviație, domeniu în care sunt necesare scanări chiar și atunci când avioanele sunt pe pistă ori în zbor [Iddings et al., 1992].

Ultrasunetele bazate pe laser elimină necesitatea de a menține detectorul perpendicular pe structură, deoarece direcția de propagare a undelor ultrasonice nu este afectată semnificativ de orientarea laserului utilizat pentru excitare.

După [Szava et al., 2001], scanarea cu ultrasunete se poate realiza mai ușor cu ajutorul unor oglinzi care să schimbe direcția undelor laser, așa cum se observă în figura 2.30.

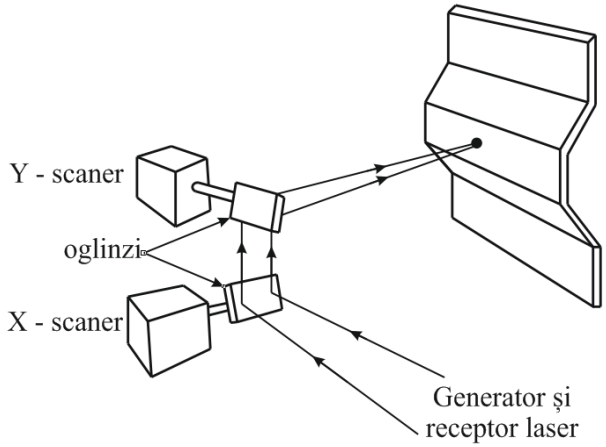


Fig. 2.30. Principiul detectării defectelor cu ultrasunete, după [Szava et al., 2001].

Utilizarea undelor ultrasonice tip Lamb poate constituie o altă metodă ieftină și comodă de detectare a defectelor în structuri.

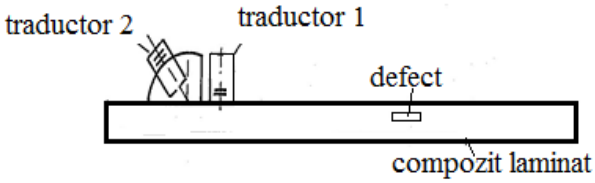


Fig. 2.31. Modul de așezare a două traductoare pentru utilizarea undelor Lamb, adaptat după [Szava et al., 2001].

Această metodă costă în scanarea suprafețelor de investigat cu detectoarele orientate într-o singură direcție. În figura 2.31 se poate observa modul de dispunere a celor două traductoare în cazul utilizării undelor Lamb.

g) Metoda emisiei acustice

Conform [Szava et al., 2013] una dintre metodele nedistructive cele mai utilizate pentru analiza structurilor realizate din compozite stratificate armate cu fibre este metoda emisiei acustice. Metoda se bazează pe eliberarea bruscă, sub formă de impulsuri acustice a unei părți din energia de deformație acumulată de un corp în urma solicitării mecanice.

În cazul structurilor din materiale compozite există o gamă largă de mecanisme recunoscute responsabile pentru generarea emisiei acustice, pornind de la apariția dislocațiilor, până la propagarea ruperii, incluzând delaminări, microfisurări ale matricei, ruperi de fibre și desprinderi ale fibrelor de matrice. Semnalele acustice pot fi detectate cu traductoare piezoelectrice aflate în

contact printr-un mediu de cuplare cu suprafața materialului care se investighează, semnalele fiind înregistrate și analizate electronic.

Față de procedeele ultrasonice, unde un singur traductor scanează mecanic suprafața structurii, o dispunere corectă a traductoarelor utilizate în emisia acustică, poate duce la o analiză rapidă și precisă a structurii studiate, cu posibilitatea prelucrării datelor pe calculator.

O instalație pentru studiul structurilor din materiale compozite cu metoda emisiei acustice cuprinde: traductoare (senzori), un echipament de bază pentru analiza semnalului (amplificator, filtru, aparatură pentru achiziția și procesarea datelor) și câteva dispozitive pentru încărcarea structurii [Szava et al., 2013]

Metoda emisiei acustice este aplicată în același mod atât pentru materiale compozite cu matrice polimerică (vase sub presiune, structuri de automobile și aeronautice etc.) cât și pentru cele cu matrice metalică. Spre deosebire de procedeele ultrasonice sau de cele radiografice, unde defectele se pot localiza foarte precis, în cazul emisiei acustice acestea nu pot fi depistate cu precizie din punct de vedere a poziției lor.

Ca și în cazul materialelor izotrope, trebuie să se țină seama în calcul de toate trecerile peste nivelele prestabilite ale semnalelor acustice, numărul semnalelor numărate depinzând de mai mulți factori: rezistența sursei de semnal acustic, sensibilitatea traductorului, cuplarea eficientă a traductorului, atenuarea materialului compozit, nivelul prestabilit al intensității semnalului acustic [Awerbuch et al., 1985].

Traductoarele folosite pentru analiza cu tehnica emisiei acustice sunt similare celor utilizate în investigarea cu unde ultrasonice, în acest caz fiind necesară o sensibilitate mai mare a acestora, în special pentru frecvențe cuprinse în intervalul 100 ÷ 500 Hz, unde pentru structuri din materiale compozite se obține un semnal de emisie foarte bun.

Pentru determinări cu această tehnică experimentală, pe structuri din materiale izotrope, în vederea obținerii unor semnale de emisie suficient de puternice, se recomandă ca sursele de emisie să fie amplasate în interiorul unor spații sub formă de hiperboloizi, astfel încât localizarea defectelor să se facă foarte precis. Când determinările urmează să fie făcute pe materiale anizotrope, cum sunt materialele compozite, deoarece viteza de propagare a undelor variază cu direcția, sursele nu mai pot fi amplasate în spații bine determinate geometric. În acest caz, în funcție de structura compozitului și de tipul determinării care urmează să fie efectuată, amplasarea surselor de emisie acustică se face pe baza unor metode aproximative.

După [Szava et al., 2013], emisia acustică poate fi folosită până la punctul la care să se poată distinge diferite moduri de rupere ale materialului. Acestea pot fi analizate prin gruparea diferitelor semnale primite conform nivelelor de energie. În urma grupării pe trei nivele de energie sunt evidențiate următoarele trei deteriorări: ruperea fibrelor, a matricei și delaminarea. Tehnica emisiei acustice cunoaște în literatura de specialitate o utilizare tot mai mare în investigațiile experimentale care se întreprind pe structuri din materiale compozite. În ultimii ani această metodă este folosită în vederea localizării cu precizie a unor tipuri de deteriorări (dislocații, delaminări, desprinderi, ruperi de fibre etc.) și pentru evidențierea mecanismelor de producere a acestora. În comparație cu alte tehnici experimentale nedistructive, tehnica emisiei acustice oferă posibilitatea rapidă a nominalizării unei varietăți mari de deteriorări care pot să apară în structurile din materiale compozite, în urma solicitărilor la care sunt supuse.

h) Metoda corelării imaginilor video (VIC – Video Image Correlation)

Conform [Szava et al.2013] această metodă de investigare noninvazivă presupune utilizarea unui sistem (fig. 2.32) care constă în două camere video de înaltă rezoluție, montate pe un tripod prin intermediul unei tije conectoare. Sistemul permite măsurarea în condiții normale de lucru pentru eliminarea mișcărilor corpului rigid din câmpul deplasărilor. Acest fapt reprezintă un mare avantaj al acestei metode.

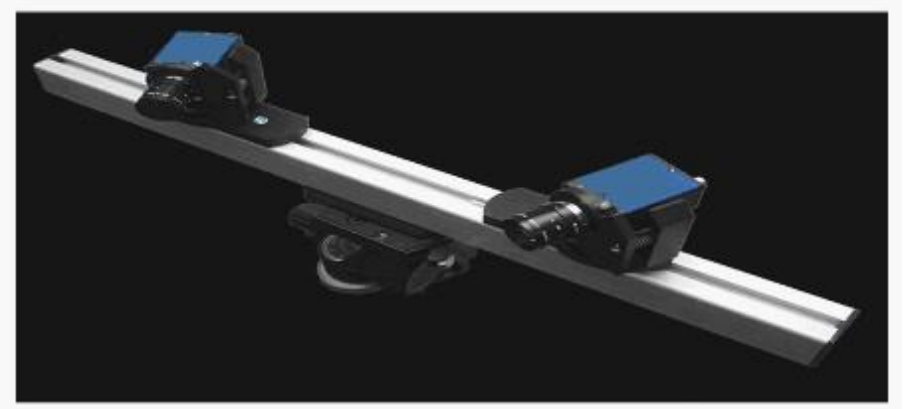


Fig. 2.32. Montaj realizat pentru detectarea defectelor prin metoda corelării imaginilor video, după [Szava et al., 2013].

Structura de testat trebuie să fie pulverizată înainte cu o vopsea solubilă pe bază de apă pentru a se obține o suprafață cu puncte neuniformă. Dimensiunea punctelor depinde de dimensiunile suprafeței. În acest fel se poate asigura diferența de intensitate a fiecărui pixel de pe suprafața structurii de analizat.

Este necesară realizarea calibrării, prin utilizarea unor plăci speciale prevăzute cu un set de puncte de înaltă precizie (ca în figura 2.33) dispuse corespunzător cu planul median al suprafeței obiectului de testat.

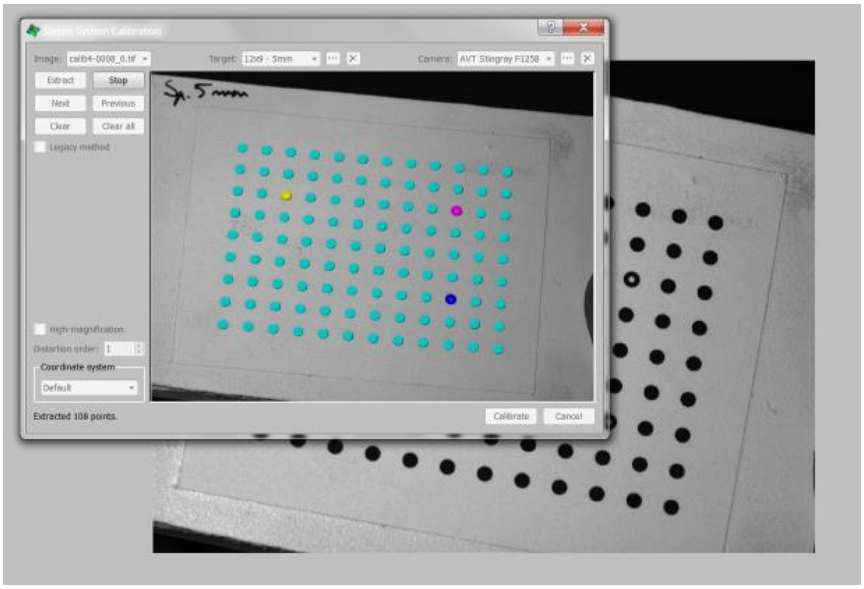


Fig. 2.33. Extragerea punctelor de calibrare, adaptat după [Szava et al., 2013].

Aceste plăci sunt apoi rotite în plan orizontal și vertical pentru a permite programului recunoașterea deplasărilor 3D a pixelilor semnificativi a imaginii captate.

După calibrare, camerele video vor achiziționa imaginea sub forma unei matrice [m-n] de pixeli: prima dată prin descărcarea structurii testate iar apoi prin încărcarea acesteia. Fiecare imagine captată corespunzătoare stării inițiale a structurii se va analiza pas cu pas bazându-se pe procedura din figura 2.34.

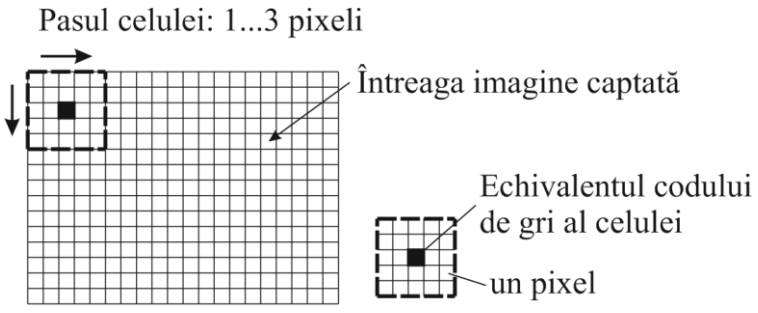


Fig. 2.34. Principiul de măsurare bazat pe procedura de scanare, după [Szava et al., 2013].

Având la bază acest principiu de măsurare prin scanare, programul va permite preselectarea unei celule de dimensiune de 25 pixeli. Pentru această celulă programul va stabili un cod de gri unic

corelat cu poziționarea 3D a pixelilor medianei. Prin analizarea întregii imagini fiecare celulă va obține o poziționare spațială unică și de asemenea un cod de gri unic.

După solicitarea structurii, pentru toate imaginile captate programul va identifica noile poziții ale acestei celule prin metoda comparației. După aceasta, imaginile rămase vor fi comparate cu ultima referință.

Alături de metodele experimentale clasice, au apărut și s-au dezvoltat o serie de noi metode experimentale, destinate materialelor și structurilor din materiale compozite stratificate și armate cu fibre. Holografia și interferometria granulară sunt folosite la identificarea defectelor de suprafață. Metodele electromagnetice ce folosesc microundele au fost utilizate la analiza compozitelor sticlă-epoxy. Punerea la punct a multora dintre tehnicile experimentale specifice compozitelor se află încă la început, fiind destul de dificil de apreciat posibilitățile de utilizare a acestora în viitor.

2.4. CONCLUZII

2.4.1. Concluzii privind monitorizarea calității structurilor

Defectul este principala cauză a deteriorării structurale care se produc adesea în interiorul structurilor. În ultimele decenii, s-a acordat o atenție deosebită proiectării unor tehnologii care să conducă la evitarea degradării componentelor structurilor, bazate pe detectarea în faza incipientă a defectelor din structuri. Mai mult decât atât, tehnologia SHM bazată pe controlul vibrațiilor structurilor a fost obiectul atenției pentru o serie de cercetători din întreaga lume, care au fost preocupați să obțină echipamente eficiente de mare importanță în industria civilă, aeronautică cât și în domeniul ingineriei mecanice.

Dezvoltarea unei tehnologii SHM robuste a reprezentat una dintre provocările majore ale comunității inginerești. În primul rând, aproape în fiecare domeniu industrial s-au făcute încercări pentru detectarea defectelor apărute în cadrul structurilor cât mai repede posibil. O serie de motivații ca, siguranța în funcționare a structurilor și reducerea costurilor de mentenanță au determinat introducerea și integrarea sistemelor SHM în aplicațiile din ingineria aeronautică și cea civilă.

Cu toate că au existat o serie de neajunsuri în dezvoltarea unui sistem SHM optim, la nivel global, s-au utilizat numeroase metode de integrare a diferitelor tipuri de sisteme senzoriale în componentele aeronavelor; aceste experimente fiind încă un subiect de actualitate pentru comunitatea de cercetători din ingineria aerospațială.

Dezvoltările semnificative ale acestor tehnologii reunesc eforturi ale cercetărilor multi-disciplinare ca: dinamica structurală, procesarea semnalelor, dezvoltarea unor sisteme senzoriale avansate, dispozitive hardware computaționale, utilizarea telemetriei, a materialelor avansate precum și recunoașterea statistică a aspectelor (trăsăturilor specifice). Mai mult, au existat o serie de eforturi din partea cercetătorilor de a corela și integra aceste tehnologii astfel încât să se dezvolte o soluție completă de sistem SHM.

În domeniul aeronautic, un sistem SHM complet este doar un concept și implică detectarea automată a defectelor, diagnoza, prognoza și atenuarea unor evenimente adverse care pot apărea datorită deteriorării componentelor unei aeronave.

La nivel global, problema proiectării sistemelor SHM este semnificativ complexă și necesită existența și dezvoltarea unor sisteme senzoriale foarte eficiente și durabile pe o perioadă lungă de timp care să poată fi integrate în interiorul structurii încă din faza de proiectare.

În domeniul aeronautic, scopul introducerii sistemelor SHM este de a detecta și diagnostica producerea oricărui defect încă din etapa inițială, de a activa protocoalele de mentenanță în caz de avarie, în vederea menținerii siguranței aeronavei. Acest lucru se poate realiza prin achiziția unor date în timp real de la o rețea de senzori și utilizarea unor algoritmi avansați de predicție implementați în sistemele software ale unei aeronave.

Sistemele SHM sunt utilizate atât la structurile mecanice cât și pentru sistemele electrice, hidraulice, etc. Monitorizarea sănătății structurilor se referă la aspectele legate de integritatea funcțională dar și la monitorizarea în timp real a propagării defectelor și evaluarea duratei de viață rămase a structurii.

Monitorizarea sănătății sistemelor se referă nu numai la aspectele funcționale dar și la sarcinile de inițiere a procedurilor de mentenanță sau de înlocuire a componentelor afectate.

La ora actuală, aceste sisteme au fost dezvoltate cu scopul de a monitoriza sănătatea atât structurală cât și a depista erorile de management din cadrul unei aeronave.

2.3.2. Concluzii privind analiza defectelor structurale

În ceea ce privește analiza defectelor structurale, de-a lungul timpului, s-au dezvoltat o serie de metode non-distructive bazate pe diferite principii fizice, ca: tensometria electro-rezistivă (TER), emisia acustică, fotoelasticimetria, franjele Moire, termografia IR, ultrasonografia, radiografia cu raze X, corelarea imaginii vizuale. Toate aceste metode experimentale au avut la bază diferite tipuri de măsurători directe. Astfel, s-au monitorizat

încărcările pentru a se achiziționa informații despre starea structurii (nivelul de integritate al acesteia).

Pentru a simplifica procesul de identificare a defectelor structurale, au fost create cu câteva decenii în urmă, o serie de standarde internaționale referitoare la clasificarea acestor defecte pentru tipuri diferite de materiale. În acest studiu au fost extrase standardele pentru materiale metalice și aliaje dar și anumite informații legate de defectele materialelor compozite.

Metodele experimentale de identificare a defectelor prezentate pot fi aplicate unei plaje largi de materiale, atât metalice cât și compozite.

Tensometria electro-rezistivă și emisia acustică au fost frecvent utilizate de ingineri și cercetători din industria aeronautică, cu precizarea că metoda TER prezintă câteva erori de măsurare care pot conduce la obținerea unor rezultate eronate.

Principiul emisiei acustice este cu preponderență utilizat în aplicațiile din industria aerospațială. Această metodă necesită echipamente senzoriale cu sensibilitate ridicată, programe inteligente de procesare și analiză a semnalelor dar se poate aplica pentru monitorizare în timp real. Utilizarea acestei metode permite elaborarea unei analize rapide și precise a structurii studiate cu posibilitatea prelucrării datelor pe computer.

Fotoelasticimetria se utilizează destul de rar în practică, doar la unele structuri industriale, deoarece prezintă o serie de dificultăți în cazul structurilor compozite.

Metodele Moire nu necesită echipamente de analiză costisitoare dar sunt utilizate doar în condiții de laborator.

Termografia IR este o metodă experimentală de detectare și analiză a defectelor structurale care se bazează pe principiul emisivității materialelor. Se poate aplica cu succes în cazul structurilor din materiale compozite, prezintă avantajul unor măsurări în timp real, fără contact direct cu structura și permite achiziționarea de informații referitoare la o zona relativ mare.

Radiografia cu raze X este utilizată numai în practică, dar nu se poate aplică în cazul monitorizării în timp real. Această metodă nu este capabilă să detecteze ruperea fibrelor din epruvetele realizate din materiale compozite cu fibră de grafit sau aramid.

Ultrasonografia a fost utilizată din ce în ce mai frecvent în ultimii ani pentru identificarea și analiza defectelor structurale. Metoda permite efectuarea unor măsurători în timp real chiar și în condiții de funcționare, de exemplu, atunci când o aeronavă este în zbor. Singurul dezavantaj ar fi acela că echipamentele sunt extrem de costisitoare.

Metoda corelării imaginii vizuale permite măsurarea în condiții normale de lucru prin eliminarea mișcărilor corpului din câmpul deplasărilor.

Din studiul efectuat se poate concluziona că metodele de investigație bazate pe principiul tensometriei electro-rezistive și al emisiei acustice deși necesită echipamente cu sensibilitate ridicată pot oferi cele mai bune rezultate în cazul aplicării în sistemele SHM.

2.3.3. Concluzii privind analiza calității funcționării

În ceea ce privește studiul referitor la calitatea funcționării se poate observa, la nivelul companiilor industriale din întreaga lume, o preocupare în direcția dezvoltării unor metode de analiză care să conducă la optimizarea soluțiilor constructive ale structurilor.

Spre deosebire de metodele de analiză a defectelor structurale prezentate pe parcursul acestei sinteze, care sunt de natură experimentală, aceste metode au mai mult un aspect statistic – probabilistic și implică o serie de diagrame, tabele de corelație dar și calcule matematice simple menite să conducă la evitarea apariției defecțiunilor. Ca principiu de lucru se apelează la găsirea unor soluții optime care să mențină structurile la un randament optim pe toata durata lor de viață.

Ca metodele aplicate să aibă un efect real, la nivel economic, se urmărește, pe tot parcursul proceselor în care este implicată structura, ca parametrii de calitate indicați prin standardele internaționale să se găsească în intervalul valoric acceptat și menționat în documentația tehnică a structurii respective.

De asemenea, cunoașterea parametrilor de calitate precum și a metodelor de analiză a calității funcționării constituie un avantaj real în proiectarea unor structuri cu o durată de viață cât mai mare.

Ca o concluzie finală, se poate afirma că, la nivelul companiilor industriale, analiza calității funcționării este o activitate deosebit de importantă în cadrul ciclului de asigurare a calității.

CAPITOLUL 3

OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Cercetările au fost propuse și inițiate datorită importanţei pe care o prezintă identificarea defectelor interne ale materialelor compozite prin intermediul metodelor moderne, în scopul conceperii de noi materiale care să incorporeze tehnologie senzorială. Lucrarea de doctorat şi-a propus o sinteză a metodelor utilizate în defectoscopie la ora actuală, bazată pe referinţe de specialitate şi pe identificarea unei metode optime care să poată fi aplicată la materialele compozite utilizate în domeniul industrial. Evaluarea şi cunoaşterea în timp real a integrităţii şi sănătăţii structurilor este un obiectiv foarte important pentru toți cei care activează în domeniul industrial.

Tema tezei de doctorat de încadrează în tendinţele actuale în ceea ce priveşte dezvoltarea de sisteme performante de detectare a defectelor structurale care să poată identifica și localiza defectul încă din faza incipientă oprind astfel propagarea acestuia în interiorul materialului.

După cum s-a prezentat și în capitolul 2, unul din principalele motive de demarare a cercetărilor în domeniul identificării unui sistem optim de monitorizare a integrității structurale este îmbunătățirea siguranței structurilor. Identificarea unui defect structural încă din faza incipientă poate conduce atât la salvarea structurii în sine cât și la salvarea de vieți omenești. A doua motivaţie importantă pentru studiul detectarii a defectelor structurale este criteriul financiar. Din figura 3.1 se observă, pentru structurile cu sisteme de detectare a defectelor integrate în structura materialelor, costurile de întreţinere şi fiabilitatea se menţin constante, în timp ce la structurile clasice, fără aceste sisteme incorporate, costurile de întreţinere cresc iar fiabilitatea scade.

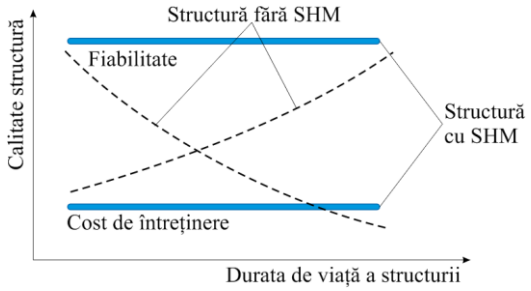


Fig. 3.1. Motivația economică a integrării sistemelor moderne de detectare a defectelor.

Scopul principal al tezei de doctorat vizează dezvoltarea unui sistem integrat de detectare a defectelor interne bazat pe metodele senzoriale moderne care se cunosc la ora actuală.

Pentru atingerea scopului tezei de doctorat s-au stabilit patru obiective majore.

Primul obiectiv constă în realizarea unui studiu sistemic şi actual al metodelor de analiză a calității și integrității structurilor cunoscute până în prezent. Dezvoltarea acestui studiu a urmărit trei direcţii de cercetare:

- studiul metodelor de detectare a defectelor utilizate la ora actuală în domeniul industrial;
- studiul metodelor de analiză a calității structurilor utilizate de marile corporații industriale;
- studiul conceptului de monitorizare a sănătății structurilor (Structural Health Monitoring – SHM) implementat la ora actuală cu precădere în industria aerospațială.

Al doilea obiectiv constă în elaborarea unei metode teoretice de analiză a comportamentului materialelor compozite stratificate armate cu fibră de carbon din construcția unei pale de elicopter ușor. Pentru realizarea acestui obiectiv trebuie îndeplinite următoarele activități:

- studiul fenomenelor aerodinamice ce au loc în timpul zborului unui elicopter;
- modelarea geometrică a palei de elicopter ținând cont de documentația de specialitate;
- simularea comportamentului palei de elicopter utilizând mai multe scenarii de zbor: zbor staționar, zbor cu înaintare, etc.;
- simularea comportamentului mecanic al unei epruvete din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon, la solicitarea la încovoiere în 4 puncte.

Cel de-al treilea obiectiv constă în elaborarea de metode de determinare experimentală a comportamentului mecanic la încovoiere și tracțiune utilizând trei metode de defectoscopie cunoscute. Pentru rezolvarea acestui obiectiv s-au avut în vedere următoarele activități:

- realizarea încercării la încovoiere a unei epruvete din compozit stratificat armat cu fibră de carbon cu aplicarea unor mărci tensometrice pentru detectarea deformațiilor;
- realizarea încercării la încovoiere a unei epruvete din compozit stratificat armat cu fibră de carbon cu aplicarea unor senzori acustici pentru detectarea defectelor interne;
- realizarea încercării la încovoiere a unei epruvete din compozit stratificat armat cu fibră de carbon cu utilizarea unei camere de termografie în infraroșu pentru detectarea câmpului de temperatură de la suprafața epruvetei;
- analiza și interpretarea statistică a rezultatelor obținute.

Al patrulea obiectiv a fost identificarea metodei optime pentru detectarea defectului în materialul compozit. Pentru îndeplinirea acestui obiectiv s-a realizat o singură activitate, și anume

- analiza multicriterială avansată pentru cele trei metode de defectoscopie studiate.

CAPITOLUL 4

CONTRIBUȚII LA MODELAREA/SIMULAREA STRUCTURILOR

4.1. RELAȚII DE CALCUL ANALITIC LA STUDIUL ŞI ANALIZA PLĂCILOR PLANE DREPTUNGHIULARE

Plăcile plane dreptunghiulare au o largă răspândire; acestea putând fii regăsite în elementele de carcasă, pereți de rezervoare, elemente din corpul navelor maritime sau aeronavelor, etc.

Conform [Rades, 2006], placa este definită ca un element de structură la care grosimea este mult mai mică decât celelalte două dimensiuni, raportul grosime/deschidere fiind $1{,}0 \leq l/h$. În acest caz, se poate presupune că deformaţia plăcii poate fi descrisă de starea de deformaţii a suprafeţei mediane, egal depărtată de feţele plăcii. Pentru plăci subţiri, se adoptă ipotezele lui Kirchhoff:

a) nu există deformaţii de întindere (compresiune) în planul median al plăcii;

b) normalele la planul median al plăcii nedeformate rămân drepte şi normale la suprafaţa mediană a plăcii deformate;

c) tensiunile normale în direcţie transversală pot fi neglijate.

Sistemul axelor de referinţă se alege astfel încât planul (x, y) să coincidă cu suprafaţa mediană a plăcii (fig. 4.1) şi direcţia pozitivă a axei z să fie în sus. Placa are grosime constantă h şi este încărcată cu sarcini distribuite pe suprafaţă.

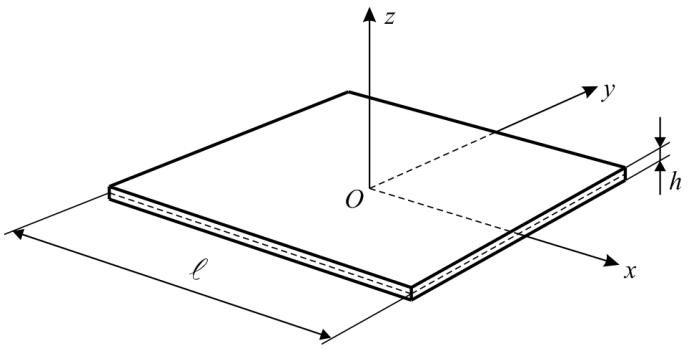
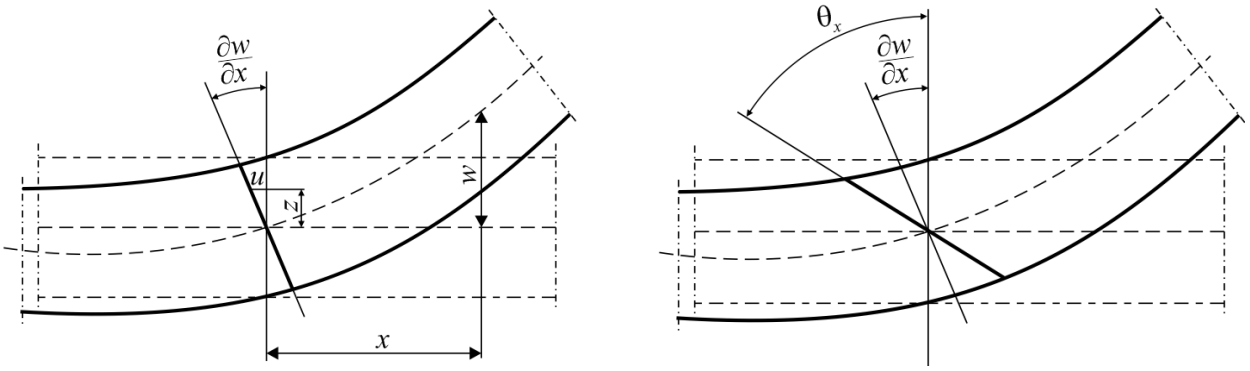


Fig. 4.1. Reprezentarea sistemului de referință la plăcile plane subțiri, după [Rades, 2006].

Deplasările paralele cu suprafaţa mediană nedeformată sunt:

$$u(x, y, z) = -z\frac{\partial w}{\partial x}; \quad v(x, y, z) = -z\frac{\partial w}{\partial y}, \tag{4.1}$$

în care $w(x, y)$ este deplasarea suprafeţei mediane în direcţia z (fig. 4.2, *a*).



a) b)

Fig. 4.2. Modul de deformație al plăcii plane subțiri, după [Rades, 2006].

Componentele deformaţiilor specifice au următoarele expresii:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2};$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0; \ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \tag{4.2}$$

Deoarece $\sigma_z = 0$, relaţiile între tensiuni şi deformaţii specifice au forma

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = -z[D]\{\chi\}, \tag{4.3}$$

unde,

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix}\sigma_x & \sigma_y & \sigma_{xy}\end{bmatrix}^T \tag{4.4}$$

şi matricea de rigiditate a materialului

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix}. \tag{4.5}$$

Calculul analitic al acestor plăci are la bază o serie de parametrii ce se referă la solicitare, tensiunile existente și săgeata, care se determină prin intermediul unei funcţii de două variabile independente *x* și *y*. Această funcție se referă la deformarea suprafeței mediane şi se exprimă ca o ecuație diferențială cu derivate parțiale a cărei soluție este dată printr-o serie.

Pentru cazul plăcii dreptunghiulare solicitate cu o sarcină uniform distribuită pe suprafața plăcii, se utilizeaza relația lui Sophie-Germaine sub forma [Tripa, 2001]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{P}{D_1}. \tag{4.6}$$

Momentul încovoietor maxim pe unitatea de lungime se dezvoltă în centrul plăcii (x=y=0); acesa produce rotirea în planul xz (M_{1xy}), de unde rezultă că fibrele paralele cu latura mai scurtă l sunt cele mai solicitate [Tripa, 2001]:

$$M_{1xy}^{max} = k_2 p l^2, \tag{4.7}$$

de unde:

$$\sigma_x = \frac{M_{1xy}^{max}}{W_1} = 6\frac{k_2 p l^2}{h^2} = k_3 \frac{p l^2}{h^2}$$

Fisura se va dezvolta în centrul suprafeței inferioare a plăcii solicitată la tensiuni de întindere din incovoiere. Coeficientii k_1, k_2, k_3 se determină ca funcții de raportul L/l. Pentru cazul plăcii încastrate pe contur săgeata maximă din centru placii $x = y = 0$ va fi [Tripa, 2001]:

$$w_{max} = k_1^{'} \frac{p l^4}{E h^3}. \tag{4.8}$$

Momentul de încovoiere maxim va avea aceeași orientare ca în cazul plăcii simplu rezemate M_{1xy} și se va dezvolta în centrul plăcii $x = y = 0$.

$$M_{1xy}^{max} = k_2' p l^2, \tag{4.9}$$

de unde,

$$\sigma_x = \frac{M_{1xy}^{max}}{W_1} = 6\frac{k_2' p l^2}{h^2} = k_3' \frac{p l^2}{h^2}. \tag{4.10}$$

Coeficienții k_1', k_2', k_3' se determină în funcție de raportul L/l.

4.1.1. Calculul analitic al materialelor compozite stratificate

Cunoaşterea stării de tensiuni şi deformaţii existente în structurile realizate din materiale compozite este necesară atât în etapa de proiectare dar şi pentru exploatarea în condiţii de siguranţă a acestor structuri.

Materialele compozite stratificate şi armate cu fibre se consideră ca materiale ortotrope cu izotropie transversală. În mod asemănător materialelor clasice, se cunosc două categorii de metode de calcul:

- metode analitice;
- metode numerice.

Studiul analitic al unei structuri realizate din materiale compozite depinde atât de tipul materialului compozit cât şi de configuraţia structurii.

Metodele analitice de calcul sunt utilizate cel mai des în cazul structurilor simple realizate din compozite stratificate sau din compozite fibroase; în cazul structurilor complexe aplicarea acestor metode este dificilă, sau chiar imposibilă, datorită calculelor destul de complicate. Toate metodele analitice de calcul au la bază ecuaţiile teoriei elasticităţii mediului anizotrop**.**

În [Thangjitham & Choi, 1993] s-a studiat problema ruperii laminelor unui compozit stratificat supus unei stări plane de tensiuni. Această problemă a fost rezolvată utilizând tehnica transformatelor integralelor Fourier şi formularea matriceală a rigidităţilor. Autorii au obținut un sistem de ecuaţii integrale, sistem singular Cauchy de speţa întâi. Apoi s-a calculat factorul de intensitate a tensiunilor prin utilizarea soluţiilor acestui sistem de ecuaţii.

Conform [Hadăr, 2002], determinarea rezistenţei unui material compozit stratificat armat cu fibre, are la bază analiza stării de tensiuni din fiecare lamină în parte şi pe estimarea rezistenţei fiecărei lamine. În [Wu, 1975] se prezintă o serie de criterii de rupere (teorii de rezistenţă), aplicabile materialelor compozite, indiferent de tipul acestora, dar şi criterii de rupere aplicabile numai compozitelor armate cu fibre. După [Hadăr, 2002] și [Gheorghiu et al., 1998], criteriile de cedare (rupere) pot fi clasificate în trei mari grupe:

- ***criteriile limită*** - conform acestora ruperea se produce atunci când unul dintre parametrii - tensiunea sau deformaţia - atinge starea limită;
- ***criteriile interactive*** – conform cărora se consideră că ruperea are loc atunci când se satisface o formulă cuadratică a tensiunilor, prezicând numai momentul iniţierii ruperii, nu şi modul de rupere;
- ***criteriile polinomial - tensoriale*** - acestea pot prezice numai momentul iniţierii ruperii.

La calculul materialelor compozite stratificate trebuie să se aibă în vedere câteva ipoteze de bază [Gheorghiu et al., 1998]:

- stratificatele se consideră plăci subţiri, de grosime constantă;

- stratificatele sunt compuse din lamine ortotrope, paralele, perfect lipite unele de altele, deci în punctele situate de o parte şi de alta a interfeţei apar deplasări şi tensiuni egale;
- deformaţiile şi deplasările sunt mici;
- direcţiile de armare sunt orientate sub diverse unghiuri (în cazul de față la 45°);
- deformaţiile şi deplasările sunt aceleaşi pentru lamine şi stratificat.

4.1.2. *Solicitarea la încovoiere a stratificatului cu simetrie tip oglindă*

La solicitarea de încovoiere, compozitele stratificate sunt supuse acţiunii unor încărcări, care conduc la apariția eforturilor *Mx*, *My* şi *Mxy* (Fig. 4.3).

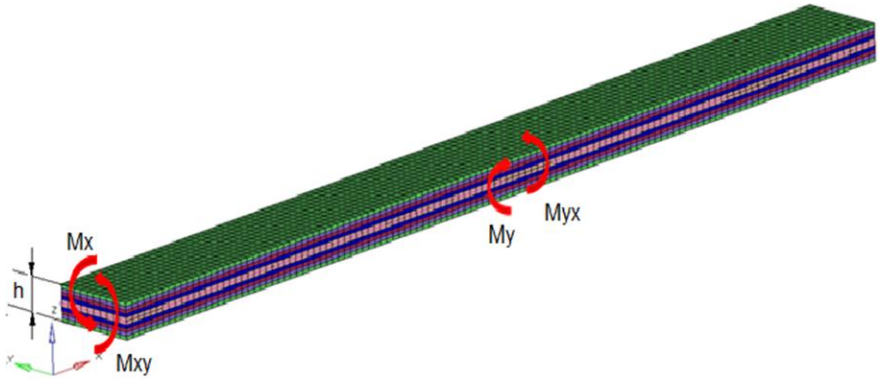


Fig. 4.3. Stratificat plan cu simetrie tip oglindă, solicitat la încovoiere.

Cele trei eforturi sunt [Tripa, 2001]:

- *Mx* - momentul încovoietor pe unitatea de lungime, orientat în lungul axei *y*,
- *My* - momentul încovoietor pe unitatea de lungime, orientat în lungul axei *x*,
- *Mxy* sau *Myx* - momentul de răsucire pe unitatea de lungime, orientat în lungul axei *x* sau *y*.

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz;\ M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz;\ M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz\ . \qquad (4.11)$$

Sub acțiunea solicitărilor (eforturilor) exterioare, un punct oarecare de cotă *z* al stratificatului se va deplasa pe toate cele trei direcţii *x*, *y* şi *z* având deplasările [Buzdugan, 1987]:

$$\begin{cases} u = u_0 - z\dfrac{\partial w_0}{\partial x}; \\ v = v_0 - z\dfrac{\partial w_0}{\partial y}; \\ w = w_0, \end{cases} \qquad (4.12)$$

unde: u_0 şi v_0 sunt componentele deplasării în plan median pe direcţiile x şi y, iar w_0 este deplasarea în afara planului stratificatului. Totodată, se va ține cont de relațiile matematice existente între deplasări și deformaţiile specifice [Buzdugan, 1987]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_{0x} - z\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}; \\ \varepsilon_y = \varepsilon_{0y} - z\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}; \\ \gamma_{xy} = \gamma_{0xy} - 2z\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}. \end{cases} \tag{4.13}$$

Sub formă matriceală, expresiile eforturilor *Mx, My* şi *Mxy*, funcție de deformațiile de încovoiere sunt [Buzdugan, 1987]:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}. \tag{4.14}$$

În cazul în care apar și eforturi N_x, de întindere acestea se calculează la fel ca la stratificatul plan solicitat în planul său, dar se vor utiliza deformaţiile din relaţiile [Buzdugan, 1987]:

$$\varepsilon = E^{-1} \cdot \sigma;$$
$$N_x = \sum_{k=1}^{n} \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} \left(\overline{Q}_{11}^k \left(\varepsilon_{0x} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + \overline{Q}_{12}^k \left(\varepsilon_{0y} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right) + \overline{Q}_{16}^k \left(\gamma_{0x} - 2z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) \right) dz \right). \tag{4.15}$$

Se observă că expresia efortului N_x va fi aceeași cu cazul în care stratificatul este solicitat în planul său, deci:

$$N_x = A_{11} \cdot \varepsilon_{0x} + A_{12} \cdot \varepsilon_{0y} + A_{16} \cdot \gamma_{0xy}. \tag{4.16}$$

Rezultă că la un stratificat cu simetrie tip oglindă, comportamentul de membrană al stratificatului este independent de cel de încovoiere.

Conform [Gheorghiu et al., 1998] și [Jiga et al, 1995], se pot scrie sub formă matriceală relaţiile dintre eforturi şi deformaţii specifice pentru un stratificat aflat în cazul general de solicitare, deci atunci când apar eforturile N_x, N_y, T_{xy}, M_x, M_y şi M_{xy}:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} & \vdots & \\ A & \vdots & B \\ & \vdots & \\ \cdots\cdots & D_{22} & \cdots\cdots \\ & \vdots & \\ B & \vdots & B \\ & \vdots & \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \\ \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}. \qquad (4.17)$$

4.2. GENERALITĂȚI PRIVIND METODELE NUMERICE DE ANALIZĂ STRUCTURALĂ

Analiza structurală constituie un operaţie extrem de importantă şi are aplicaţii în majoritatea domeniilor industriale, atât în aviaţie cât şi în proiectarea autovehiculelor. Hărţile de tensiuni şi deformaţii obţinute în urma analizelor structurale au un rol important în proiectarea şi integrarea sistemelor de monitorizare a calității structurilor.

Utilizarea materialelor compozite a cunoscut o mare dezvoltare în ultimii ani când s-au dezvoltat o nouă generaţie de materiale şi anume, materialele inteligente. Cunoaşterea comportării compozitelor în diferite condiţii de încărcare atât în regim static cât şi dinamic oferă rezultate preţioase pentru ingineri proiectanţi din industria aerospaţială care au ca scop dezvoltarea unor materiale ultrauşoare dar cu rigiditate mare.

Industria aerospaţială lucrează de regulă cu structuri cu cerinţe speciale, cum ar fi masa minimă şi rezistenţa la un număr mare de încărcări. Constrângerile aerodinamice introduc restricţii suplimentare, rezultând astfel structuri cu forme complexe care să susţină învelişul fuzelajului, aripilor unei aeronave sau învelişul palelor la elicoptere.

În vederea reducerii consumului de timp şi resurse financiare, inginerii din industria aerospaţială au adoptat proiectarea bazată pe analiza structurală. Aceasta presupune utilizarea metodei de calcul cu elemente finite care a devenit unul din cele mai utile instrumente inginereşti.

Proiectarea asistată de calculator (CAD – Computer aided design) și Ingineria asistată de calculator (CAE – Computer-aided engineering) sunt considerate instrumente care au un impact considerabil asupra proiectării, prelucrării și duratei de viață a structurilor din materiale compozite. După [Baker et al, 2004], îmbunătățirea atât în ceea ce privește integritatea datelor

cât și acuratețea analizelor au motivat inginerii proiectanți să adopte CAE și CAD ca instrumente principale în scopul reducerii producției de prototipuri și a testărilor experimentale pentru a demonstra conceptele de proiectare.

În cadrul fabricației de materiale compozite, aplicarea instrumentelor de proiectare și inginerie asistate de calculator include proiectarea și analiza cu elemente finite (FEA), executarea schițelor, prototipare virtuală și controlul proceselor de prelucrare incluzând controlul roboților și proceselor de optimizare. Aplicațiile CAD și CAE includ reguli de proiectare care sunt în conformitate cu normele și standardele de proiectare.

Conform [Baker et al, 2004], scopul acestor instrumente este de reduce timpul și costurile pentru realizarea unui produs nou. Utilizarea unor software specifice de proiectare și analiză structurală conduce la minimizarea erorilor de proiectare datorate factorului uman.

Metoda elementelor finite este un instrument computational utilizat pe scară largă care are ca scop validarea performanțelor structurilor. Prin această metodă se pot elabora analizele necesare procesului de proiectare. Analizele structurale bazate pe metoda elementelor finite se pot utiliza pentru a defini deplasările, tensiunile, vibrația și caracteristicile de flambaj ale unei structuri metalice sau compozite utilizând un set de încărcări și condiții la limită.

De asemenea, metoda elementelor finite poate fi aplicată atât la nivel macroscopic pentru a analiza rigiditatea și rezistența întregii structuri sau la nivel microscopic pentru a studia interfața dintre fibră și rășină. Procedurile analizei cu elemente finite sunt integrate atât în sistemele de modelare geometrică care conțin geometria unei structuri sau pot fi de sine stătătoare capabile de analize speciale cum ar fi comportamentul la post flambaj sau răspunsul la solicitarea la șoc.

Analiza cu metoda elementelor finite poate fi aplicată pentru a se evalua performanța structurilor, pentru realizarea unui model geometric la care se aplică un algoritm de optimizare sau pentru a se efectua simulări ale proceselor de turnare și strategiilor de fabricare.

După [Baker et al, 2004], metoda elementelor finite este descrisă ca o aproximare polinomială a unor porțiuni definită în funcție de deplasările nodale. Cele mai bune valori din noduri sunt definite prin minimizarea cantității fizice globale cum ar fi energia potențială. Această minimizare generează un set de ecuații liniare prin care după rezolvarea acestora se obțin deplasările. Această abordare matematică formală furnizează o modalitate de aplicare a metodei pentru o mare varietate de probleme din mecanica aplicată. Extinderea către transferul de căldură și modelarea fluajului se bazează pe aceste teorii generalizate.

Cu toate acestea, modelul cu elemente finite nu furnizează o soluţie exactă a rezultatelor experimentale. Procesele teoretice sunt bazate pe o aproximare numerică legată de dimensiunile elementului, tipul de element utilizat, teoria suprapunerii şi tipul de analiză elaborată. Procesul de modelare implică aproximații ale geometriei şi nu reflectă detaliile reale cum ar fi modificarea orientării fibrelor în timpul proceselor de fabricație. Rigiditatea din îmbinări şi imperfecțiunile ca liniaritatea grinzilor şi planeitatea panourilor pot avea influență considerabilă asupra performanţei structurilor actuale. Obținerea unor rezultate relevante şi utile se bazează pe o înțelegere a caracteristicilor procesului şi pe o mare atenție la dezvoltarea modelelor numerice.

Prin aplicarea acestei metode se poate evalua comportarea structurilor în diferite cazuri şi condiţii de încărcare. Conform cu [Zinkiewicz & Taylor, 2000], metoda elementului finit se bazează pe împărţirea unei structuri în componente individuale denumite ”*elemente*”, comportarea mecanică a acestor elemente fiind cunoscută şi înţeleasă şi poate fi foarte uşor studiată.

După [Zinkiewicz & Taylor, 2000], analiza structurală cu elemente finite utilizează un sistem complex de puncte (noduri) care formează o reţea. Această reţea conţine proprietăţile de material şi geometrice care ajută la determinarea modului de reacţie al structurii la diferite condiţii de încărcare. Nodurile vor avea o anumită densitate în funcţie de nivelul de tensiuni dintr-o anumită zonă. Astfel, zonele în care tensiunile sunt mari vor avea o densitate a nodurilor mai mare. Indiferent de structură sau domeniu, dezvoltarea unui model cu elemente finite şi analiza structurală implică şase etape de bază [Baker et al, 2004], [Liu, 1998]:

- **Etapa 1**. În prima etapă se va selecta tipul de analiză care va fi executată. Selectarea unei analize neliniare tridimensionale este de preferat în majoritatea cazurilor dar poate conduce la un model cu un număr foarte mare de elemente dacă structura constă în panouri subțiri. Mărimea unui element tridimensional va avea valori minime (de obicei în grosime). Astfel, pentru determinarea comportamentului structurilor se vor considera elemente de tip grindă, placă şi înveliș.
- **Etapa 2**. Se definesc relațiile dintre forță şi deplasare în nodurile elementelor considerate.
- **Etapa 3**. Se utilizează relațiile forță/deplasare pentru a se defini ecuațiile dintre forțele nodale şi deplasările nodale (ecuațiile vor fi introduse într-o matrice).
- **Etapa 4**. Se definește rețeaua de elemente. În această etapă se stabilește numărul gradelor de libertate ale modelului. Elementele sunt conectate în noduri. Deplasările elementului şi tensiunile şi solicitările sunt definite prin deplasările din nodurile elementelului. Numărul

de grade de libertate al modelului dar și precizia aproximării este legată direct de numărul de elemente.

- **Etapa 5**. Se asamblează ecuațiile globale prin aplicarea echilibrului forțelor în fiecare nod. În cadrul acestei etape, se asamblează geometria globală pornind de la cele mai mici elemente finite. Se utilizează principiul fundamental al echilibrului. Un al doilea concept fizic, că structura trebuie să rămână conectată în timpul solicitării este de asemenea aplicată pe baza ipoteei că există numai o deplasare in fiecare nod și ca deplasarea este împărțită prin elementele adiacente.
- **Etapa 6**. În această etapă se vor obține soluțiile pentru deplasări și tensiuni. Tot aici se definesc încărcările și condițiile la limită. Pentru obținerea soluției, deplasarea sau încărcarea trebuie să se aplice în fiecare nod. Aplicarea acestei reguli asigură că numărul de necunoscute în relația tip matrice este egal cu numărul de ecuații. În nodurile fixe va exista o reacțiune dar această reacțiune este determinată după găsirea soluției pentru deplasare.

Structurile laminate pot fi modelate utilizând elemente plan plate bidimensionale. Grinzile de secțiuni diferite pot de asemenea fi asamblate prin elemente plate. La această aproximare tensiunile care acționează pe grosimea structurii nu se medelează. O solicitare de presiune aplicată pe placă poate fi aproximată ca variind liniar de la o valoare egală cu presiunea aplicată pe suprafața solicitată la zero, pe suprafața nesolicitată.

Procedurile disponibile existente în programele de modelare cu elemente finite comerciale includ un sistem de optimizare topologică pentru a identifica componentele principale ale structurii și un algoritm parametric de proiectare care permite introducerea de variabile in algoritmul de optimizare. Indiferent de structură sau de domeniul ingineresc, în cadrul unei analize cu elemente finite se vor regăsi trei etape principale:

- preprocesarea, în care se introduc și pregătesc datelor, coordonatele nodale, se realizează conectivitatea elementelor prin intermediul nodurilor, se introduc condițiile la limită, proprietățile materialelor și încărcările;
- procesarea, este etapa în care sunt prelucreateă datele de intrare și sunt calculate variabilele (necunoscutele) nodale, ca deplasările la o analiză statică sau temperaturile la o analiză termală. În această etapă sunt rezolvate ecuațiile de echilibru static;
- postprocesarea, este etapa în care se prezintă rezultatele analizei cu elemente finite. Aceste rezultate se pot prezenta sub format tabelar, grafic sau de tip animație.

În industria aerospaţială se pot întâlni diferite tipuri de geometrii şi analize: 1D, 2D şi 3D. În timp ce modelele 1D şi 2D sunt mai simple şi permit rularea analizei de pe un calculator cu performanţe obişnuite, acestea oferă rezultate cu o precizie mai mică. Modelele 3D pot furniza rezultate de mare precizie dar necesită calculatoare cu performanţe ridicate pentru rularea simulărilor.

În mecanica solidelor deformabile, prin urmare şi în mecanica structurilor, proprietăţile materialului sunt caracterizate de reacţiunea lui la solicitările externe. Această reacţiune se prezintă sub forma unei dependenţe funcţionale între tensiuni şi deformaţii sau între eforturi şi deplasări. Relaţia direct proporţională între tensiuni şi deformaţii (legea lui Hooke) este unul din cele mai răspândite modele aplicate la rezolvarea problemelor mecanicii structurilor.

Analizele structurale dezvoltate în domeniul aerospaţial presupun pe lângă metodele de calcul cu element finit şi cunoasterea în detaliu a unor noţiuni de aerodinamică, aeroelasticitate precum şi a formulelor aferente. De asemenea, sunt introduşi termeni speciali din aerodinamică, ca portanţa, rezistenţa la înaintare, tracţiunea, forţa centrifugă dar şi momentul aerodinamic. Acestea sunt forţe care acţionează întotdeauna asupra unei aeronave aflate în zbor şi trebuie să fie mereu în echilibru.

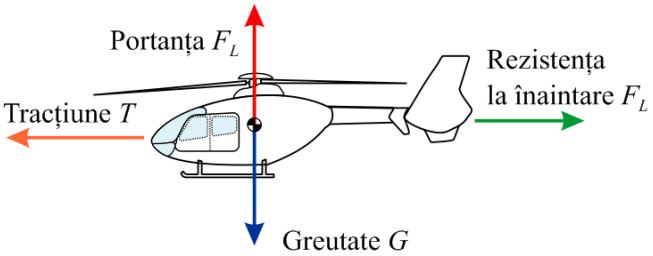


Fig. 4.4. Cele patru forţe care acţionează asupra unei aeronave în zbor, adaptat după [Cazangiu ş a., 2014].

Dupa cum se observă în figura 4.4, aceste forţe aerodinamice pot fi interpretate ca o tragere sau o împingere a aeronavei într-o anumită direcţie.

Greutatea, G este o forţă orientată spre centrul pământului, este direct proporţională cu masa aeronavei şi depinde de încărcarea sa.

Tracţiunea, T este asigurată de sistemul de propulsie al aeronavei şi este întotdeauna orientată în direcţia de zbor.

După [Crocker, 2007] și [Cazangiu et al., 2014], rezistenţa la înaintare, F_D este forţa aerodinamică care se opune oricărui corp care se deplasează într-un fluid. Dimensiunea acestei forţe depinde de o serie de factori ca: forma aeronavei, densitatea şi compoziţia aerului. Această

forţă este orientată în sens opus direcţiei de zbor şi se concentrează într-un singur punct numit centru de presiune.

Portanţa, F_L este forţa care ţine o aeronavă în aer [Crocker, 2007]. Aceasta acţionează asupra centrului de presiune şi este orientată perpendicular pe direcţia de curgere a aerului. Factorii care influenţează portanţa sunt forma şi dimensiunea aeronavei, viteza şi direcţia principală de mişcare faţă de aer, densitatea aerului, compresibilitatea şi vâscozitatea sa.

După cum se va observa în cele ce urmează, analiza structurală bazată pe calculul cu elemente finite joacă un rol important în dezvoltarea unui sistem de monitorizare a integrității structurilor. Astfel, pe baza rezultatelor obţinute şi cunoscând proprietăţile materialelor utilizate în industria aerospaţială, inginerii vor putea ştii unde să integreze senzorii într-o anumită structură şi de câţi senzori este nevoie pentru a se obţine rezultate pertinente.

4.3. ALEGEREA STRUCTURILOR PENTRU APLICAȚII

În cadrul etapei de modelare geometrică o primă acțiune este alegerea structurilor. Structurile pot fi atât sisteme complexe (bare, plăci ...) sau mostre de material din componența acestora.

Având în vedere că unul din obiectivele acestei teze se referă la determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite stratificate pe bază de fibră de carbon, s-a optat în prima fază pentru analiza FEM a unei epruvete din material compozit stratificat în condiții de solicitare la încovoiere în 4 puncte. Acest tip de material poate fi întâlnit atât în construcția autovehiculelor dar și la realizarea învelișului palelor de elicopter și a altor componente din industria aerospațială.

Pentru a se determina caracteristicile mecanice ale materialului compozit stratificat s-a realizat modelul geometric ale unei epruvete alcătuită constructiv din 10 straturi de fibră de carbon orientate unidirecțional, fiecare strat având o grosime de 0.87 mm. Orientarea straturilor a fost considerată la 45° (-45°). Caracteristicile materialului epruvetei sunt prezentate mai jos:

- Material: Fibra de carbon UD
- Modulul de elasticitate: $E_1 = E_2 = 38263{,}9$ MPa;
- Modulul de forfecare: $G_{12} = 11439$ MPa;
- Coeficientul lui Poisson: $\nu_{12} = 0.32$

Dimensiunile de gabarit ale epruvetelor sunt centralizate în tabelul 4.1. Forma epruvetelor este ilustrată schematic în figura 4.5.

Tabel 4.1 Dimensiunile epruvetelor de material compozit stratificat (fibră de carbon UD).

Compozite unidirecţionale (45°) şi multidirecţionale (sistemele cu fibre de carbon)	Lungime epruvetă *l* mm	Lăţime b mm	Grosime h mm
	248,62	20,29	8,79

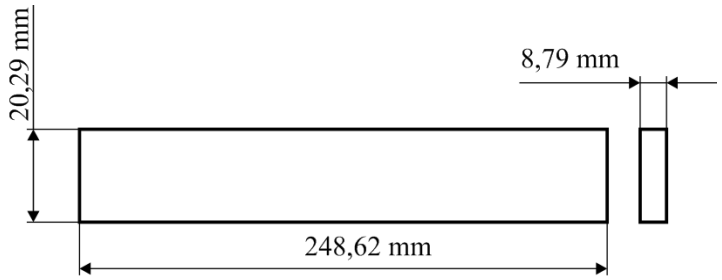


Fig. 4.5. Dimensiunile principale ale epruvetei de material compozit.

Pentru a se determina comportamentul mecanic al unor aplicații din domeniul aerospațial în diferite condiții de solicitare s-a optat pentru modelarea și analiza structurală a unei pale de elicopter ușor.

Datele privind forma constructivă şi geometria palei au fost extrase din standardele tehnice de specialitate [EDH, 1976]. În acest caz s-a considerat lungimea palei de 6648 mm.

Figura 4.6. ilustrează atât geometria cât şi dimensiunile principale ale palei de elicopter.

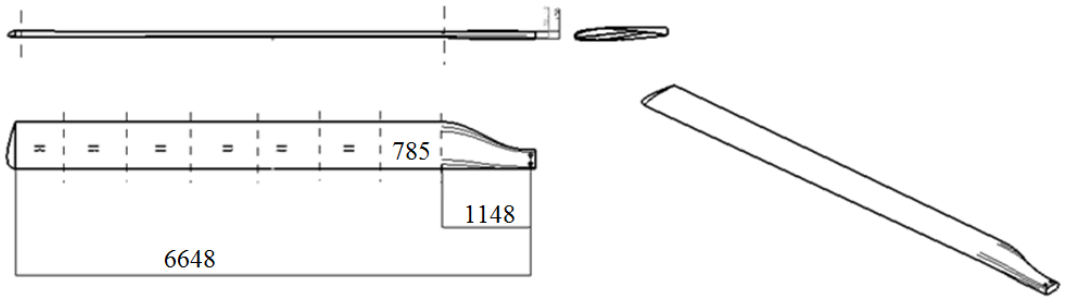


Fig. 4.6. Geometria şi dimensiunile palei de elicopter.

Pentru a pune în evidenţă cât mai exact modul de distribuţie al încărcărilor pe pală, geometria s-a împărţit în 7 segmente de lungime egală luând în calcul variaţia unghiului de torsiune de la bază la vârf (unghiul de torsiune = 7°).

În cadrul unei analize structurale, după etapa de modelare geometrică se impune definirea materialelor structurii precum şi a proprietăţilor acesteia. Această etapă se poate realiza atât în programul de proiectare, dar de cele mai multe ori se preferă să se facă în programul de analiză cu element finit. În general programele FEA oferă o varietate mare de materiale, iar pentru compozite există un modul special.

S-a considerat că pala de elicopter este alcătuită constructiv din 4 componente principale: lonjeron (element de susținere), spumă (element de umplere), înveliș și bucșe. Materialele și caracteristicile acestora au fost extrase din standardele tehnice de specialitate [EDH, 1976] și [CMH, 2002]:

a. Fibra de carbon (CFRP) pentru înveliş:

$E_{12} = 7.4 \cdot 10^4$ MPa;

$G_{12} = 2600$ MPa;

$v_{12} = 0.29$;

$\sigma_{12t} = \sigma_{12c} = 300$ MPa;

$\tau_{12} = 52$ MPa;

$t = 0.16$ mm.

b. UD fibre belt (fibre unidirecţionale de carbon) pentru lonjeron:

$E_1 = 13 \cdot 10^4$ MPa;

$E_2 = 6560$ MPa;

$G_{12} = 3700$ MPa;

$v_{12} = 0.29$;

$\sigma_{1t} = 800$ MPa;

$\sigma_{1c} = 600$ MPa;

$\sigma_{2t} = \sigma_{2c} = 25$ MPa;

$\tau_{12} = 10$ MPa;

$t = 0.13$ mm.

c. ROHACELL RIMA 51 pentru spumă:

$E_{12} = 75$ MPa;

$G_{12} = 24$ MPa;

$v = 0.3$.

d. STRUCTURAL STEEL (Oţel structural) pentru bucşi:

$E = 2{,}1e^5$ MPa;

$v = 0.3$.

4.4. MODELAREA STRUCTURILOR

Având la bază caracteristicile de material prezentate în subcapitolul anterior, modelul geometric al epruvetei s-a elaborat direct în programul de analiză cu element finit, Hypermesh/Hyperworks. S-a considerat materialul ca fiind stratificat și simetric. Astfel s-au modelat primele 5 straturi cu caracteristicile indicate în figura 4.7, după care s-a aplicat comanda *Mirror* pentru modelarea celorlalte.

Laminate option: Symmetric

Define laminate:

Name	Id	Color	Material	Thickness	Orientation	IP	Result
Ply1	1		Carbon	0.87000	45.0	0	yes
Ply2	2		Carbon	0.87000	45.0	0	yes
Ply3	3		Carbon	0.87000	45.0	0	yes
Ply4	4		Carbon	0.87000	45.0	0	yes
Ply5	5		Carbon	0.87000	45.0	0	yes

Fig. 4.7. Caracteristicile straturilor de fibră de carbon din construcția epruvetei.

Structura epruvetei din material compozit laminat este ilustrată în figura 4.8. Pentru delimitare, fiecărui strat i s-a aplicat o culoare diferită, straturile corespondente simetric având aceeași culoare.

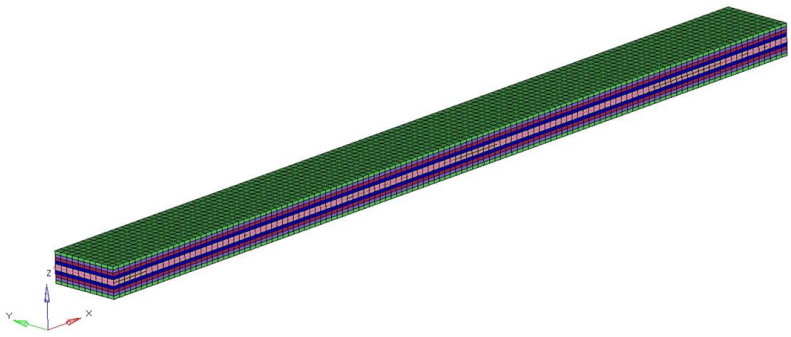


Fig. 4.8. Modelul geometric al epruvetei de fibră de carbon.

Orice construcţie de model 3D începe de regulă prin realizarea unui contur plan, care printr-o deplasare (translaţie sau rotaţie) devine o formă de bază. Primul contur se va desena pe unul dintre planele existente la pornirea aplicaţiei. În continuare, ori de câte ori se realizează o formă bazată pe un contur, acesta se va construi pe unul dintre planele de coordonate iniţiale, pe o faţă plană a piesei sau pe un plan ajutător, construit în acest scop.

Datorită faptului că pala de elicopter este o structură complexă, cu profile dificil de realizat prin comezile uzuale de proiectare, modelarea geometrică a acesteia s-a realizat cu ajutorul programului specializat de proiectare Catia V5R19, utilizând modulul *Surfaces* pentru modelarea

suprafețelor. Acest modul este util oricărui inginer proiectant, are numeroase instrumente ce permit proiectarea unor suprafeţe complexe pornind de la simple curbe.

În modelarea structurii palei s-a pornit de la trasarea unor simple curbe, s-au generat suprafețele și abia apoi s-au obținut corpurile solide. Ca şi etape de lucru se pot identifica:

- elaborarea unei schiţe, în modul ”*Sketcher*” cu comanda *Spline*;
- generarea suprafeţelor, în modul ”*Generative Shape Design*” cu comenzi ca *Blend*, *Fill*, *Sweep*, etc.;
- analiza suprafeţelor generate cu ajutorul modulului ”*Freestyle*” prin intermediul comenzii *Cutting Planes*;
- transformarea în corpuri solide utilizând instrumentele modulului *Part Design*.

În final, după transformarea în corp solid, s-a obţinut modelul geometric 3D al palei care se poate observa în figura 4.9.

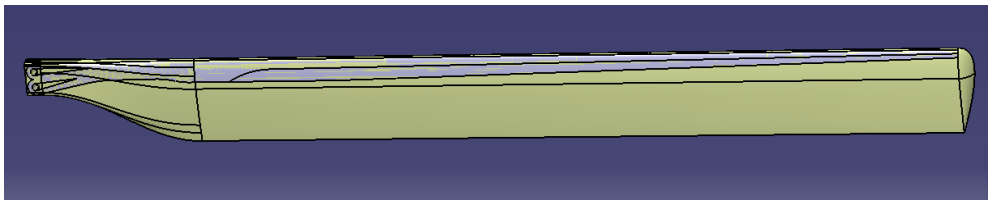


Fig. 4.9. Model 3D pala elicopter.

După modelarea ca și corp solid în modulul CATIA Part Design, pala de elicopter se consideră a avea un material (conform specificațiilor din etapade alegere a structurilor), cu o serie de proprietăţi fizice, deosebit de importante pentru analiza structurală: modulul lui Young, coeficientul lui Poisson, densitatea coeficientul de dilatare termică, rezistenţa admisibilă.

Pentru afişarea modelului în care s-au introdus materialul și proprietățile acestuia este necesar un alt mod de vizualizare a acestuia. Astfel, de pe bara de instrumente View se extinde grupul de pictograme "*Render Style*" şi se alege “*Customize View Parameters*”, apoi din fereastra de dialog apărută se bifează opţiunile “*Shading*” şi “*Material*”. Ca urmare, modelul 3D al palei de elicopter capătă o culoare albă, cu nuanțe de albastru în zona lonjeronului (Fig. 4.10).

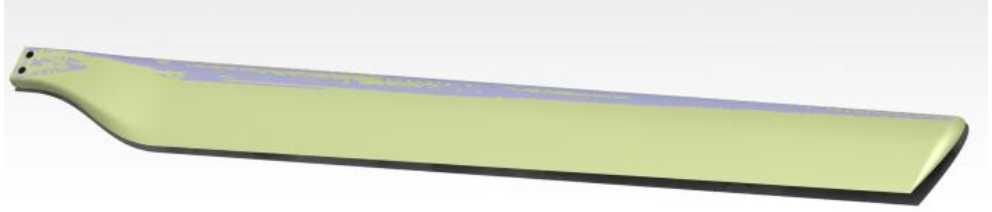


Fig. 4.10. Model 3D pala elicopter – vedere ”render”.

Zona dintre lonjeron şi înveliş s-a considerat a fi umplută cu spumă utilizată în industria aerospaţiă, ceea ce conferă greutate relativ mică a structurii.

Figura 4.11 ilustrează grafic introducerea materialelor în modelul 3D al palei realizat in CATIA. S-au utilizat culori diferite pentru a se identifica componentele palei.

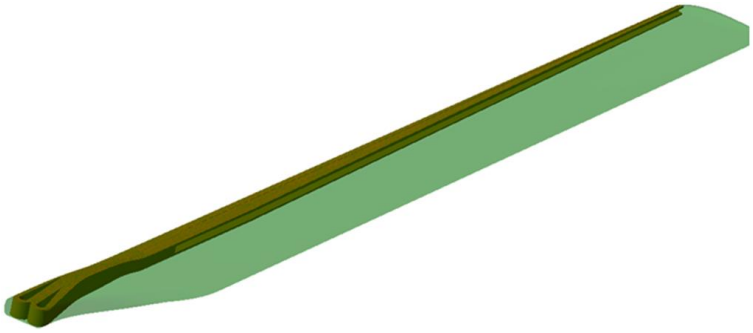


Fig. 4.11. Introducerea materialelor în modelul 3D al palei.

4.5. SIMULAREA RĂSPUNSULUI STRUCTURILOR ANALIZATE

În partea de introducere s-a precizat că etapa de preprocesare a analizei cu elemente finite constă în trei operaţii principale:

- discretizarea structurii;
- stabilirea condiţiilor la limită (introducerea încastrărilor în sistem);
- introducerea încărcărilor asupra structurii.

În cazul de faţă, pentru analiza cu element finit s-au utilizat programele specifice HyperMesh & Radioss.

Operaţia de discretizare (meshing) constă în împărţirea structurii în elemente geometrice simple a căror comportare este deja cunoscută şi pot fi calculate cu uşurinţă. Pentru cazul epruvetei, structura acesteia s-a discretizat în 66 elemente de tip *shell*. S-a utilizat o forța de încărcare reală (obținută în urma unor testări fizice la încovoiere a unor epruvete) care a fost aplicată pe cele 66 noduri rezultând o forță de 59,8 N pe fiecare nod (Fig. 4.12):

$$F_{nod} = \frac{F}{\text{numar elemente}} = \frac{394{,}04}{66} = 59{,}8\,.$$

Simularea comportării epruvetei din compozit stratificat s-a realizat considerând cazul clasic al încovoierii în 4 puncte.

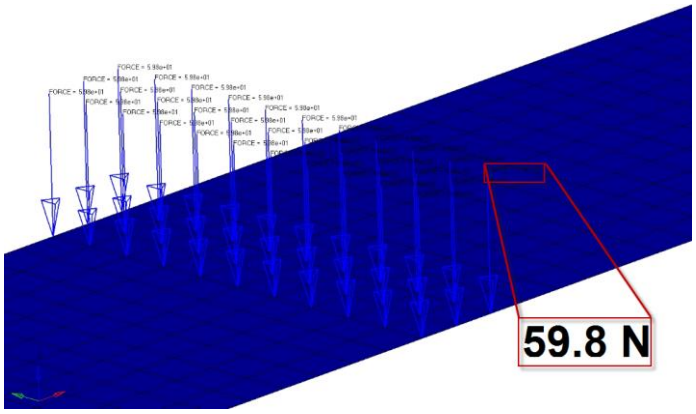


Fig. 4.12 Aplicarea forței distribuite pe noduri.

Atât încărcările cât și reazemele au fost aplicate la distanțele indicate în figura 4.13. Dimensiunile epruvetei și schema de montaj au fost extrase din partea experimentală.

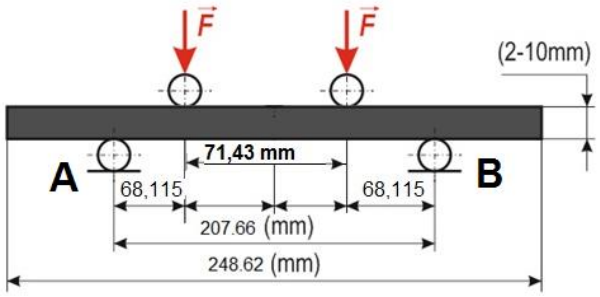


Fig. 4.13 Cazul solicitării la încovoiere în 4 punct.

În figura 4.14 sunt ilustrate etapele de introducere a încărcărilor dar și stabilirea condițiilor la limită necesare oricărei analize cu elemente finite. S-a considerat că epruveta este solicitată de două forțe concentrate situate la distanțele prezentate în figura 4.13.

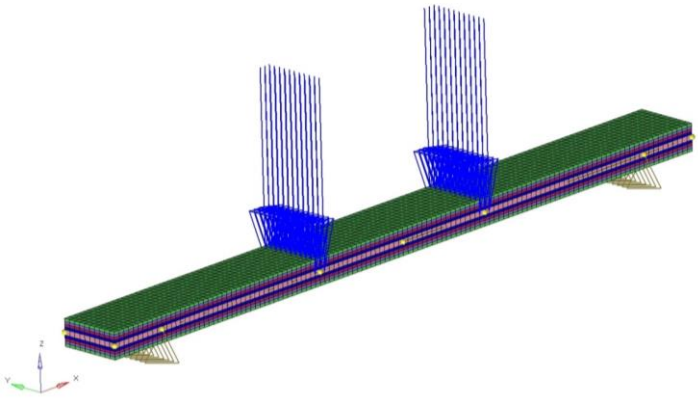


Fig. 4.14 Aplicarea încărcărilor și stabilirea condițiilor la limită.

Introducerea constrângerilor în sistem s-a realizat după modelul prezentat în Figura 4.15:

- în punctele de reazem, A si B s-au blocat translațiile atât pe axa OY cât si pe axa OZ;
- în punctele de reazem, A si B s-au blocat rotațiile pe axa OX și pe axa OZ.

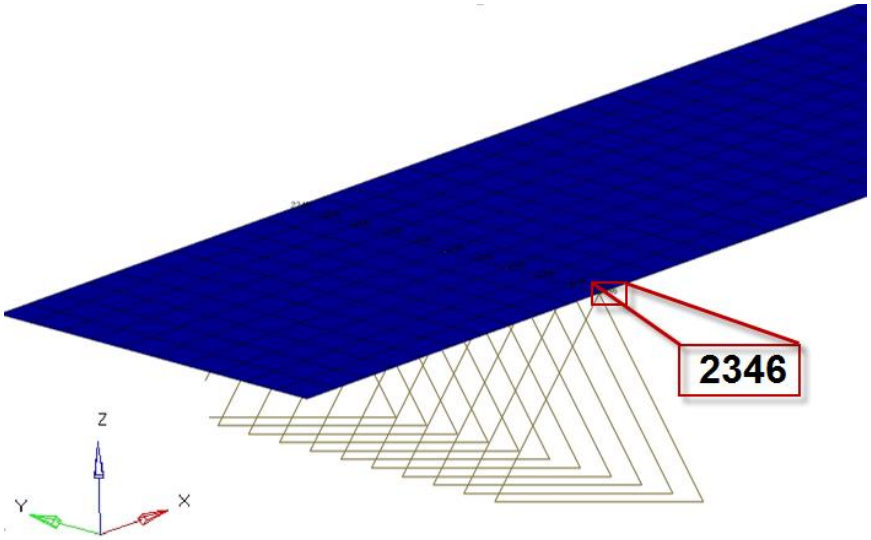
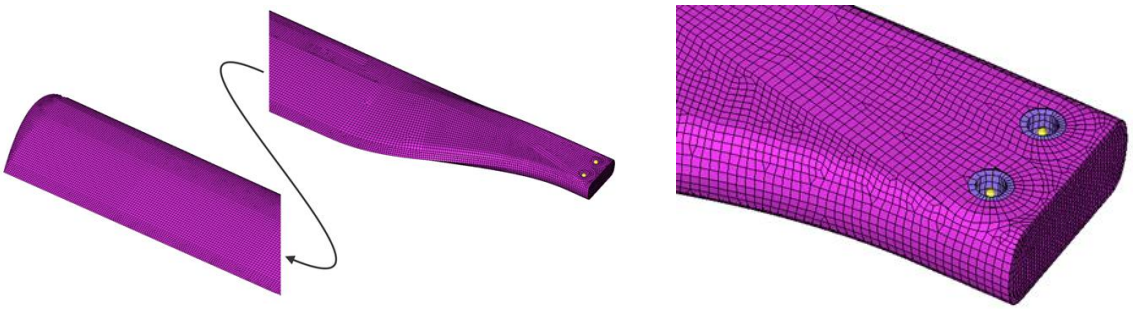


Fig. 4.15 Stabilirea condițiilor de legătură (introducerea constrângerilor în sistem).

Fiind un sistem complex, la discretizare, pentru pala de elicopter s-a utilizat o combinaţie între elemente de tip QUAD (shell) – pentru înveliș, HEXA şi TETRA (solid) pentru lonjeron şi spumă. Dimensiunea elementelor s-a ales de 12 mm.

De asemenea, pentru modelarea învelişului s-au utilizat 16 rânduri de straturi (0.16 mm grosime fiecare).

În figura 4.16 este prezentat modelul discretizat al palei studiate, atât pe toată lungimea (a) cât şi în detaliu în zona de încastrare a lonjeronului (b).

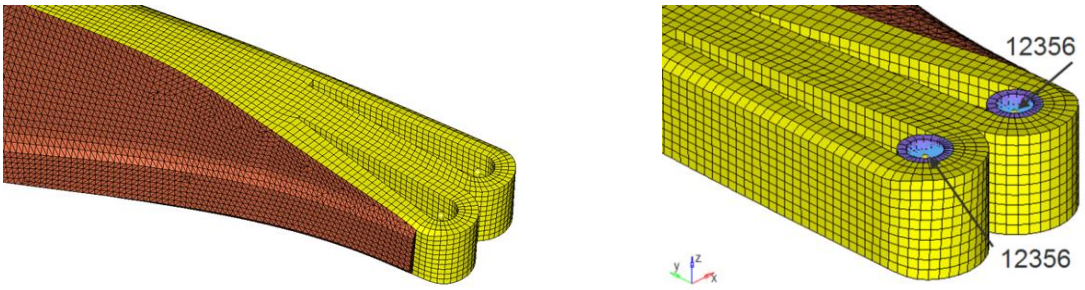


a) b)

Fig. 4.16. Discretizarea palei de elicopter: a) pe toata lungimea; b) zona de încastrare lonjeron.

Stabilirea condițiilor la limită a presupus introducerea constrângerilor în structura palei de elicopter. Astfel, s-a considerat ca pala va fi încastrată în zona bucşilor (acolo unde se prinde de rotor), capătul celălalt rămânând liber.

În figura 4.17 este ilustrat modul de întroducere a constrângerilor în zona bucşilor.



a) b)

Fig. 4.17. Introducerea constrângerilor pentru zona de încastrare: a) profil zona de încastrare; b) constrângerile introduse în lonjeron în zona bucşelor.

Constrângerile în cele două bucşi s-au realizat prin intermediul elementelor rigide de tip RBE2 (Rigid body elements), ca în figura 4.17, b. Rotaţia în jurul axei Ox s-a lăsat liberă.

Introducerea încărcărilor în sistem a constat în identificarea tipurilor de forţe şi momente care acţionează asupra palelor într-un caz real, calculul acestora şi aplicarea lor asupra modelului 3D al structurii palei.

Caracteristicile aerodinamice necesare calculelor s-au extras din documentaţia tehnică de specialitate [EDH, 1976], acestea fiind:

- Lungime pală: 6,6 [m];
- Rotaţia: 220 [rot/min];
- Masa maximă la decolare: 1200 [kg];
- Coarda profilului: 0.6 [m];
- Grosimea maximă a profilului: 0.06 [m];
- Viteza unghiulară: 23 [rad/s];
- Altitudinea maximă: 3000 [m];
- Densitatea aerului:0.9 [kg/m^3];
- Unghiul de incidenţă: 7 [deg];
- Grosime bucşi:8 [mm].

Pe baza formulelor aerodinamice extrase din literatură [Postelnicu et al., 2001], s-a calculat distribuţia vitezelor şi a forţelor pe fiecare segment. De asemenea, s-a determinat o distribuţie liniară a masei fiecarui segment în scopul calculului variaţiei forţei centrifuge.

Pentru determinarea forţei centrifuge, portanţei şi rezistenţei la înaintare s-au aplicat cele trei relaţii de bază din aerodinamică [Postelnicu et al., 2001]:

$$F_{cf} = m \cdot \omega_2 \cdot R;$$
$$F_L = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_L; \qquad (4.18)$$
$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_D,$$

unde: F_{cf} este forţa centrifugă, F_L este portanţa, F_D este rezistenţa la înaintare, C_L, coeficientul de portanţă, C_D este coeficientul de rezistenţă la înaintare, m este masa pe fiecare segment al palei, ω, viteza unghiulară a rotorului; R, raza rotorului principal, ρ este densitatea aerului, S este suprafaţa secţiunii palei şi v, viteza de curgere a curentului de aer.

Cei doi coeficienţi aerodinamici (C_L şi C_D) se determină pe bază polarelor profilului aerodinamic al palei.

Prin profil aerodinamic se înţelege forma palei văzută în secţiune transversală. Un profil aerodinamic este definit de două dimensiuni principale: coarda (Fig. 4.18) şi grosimea (Fig. 4.19). Coarda este linia dreaptă care uneşte bordul de atac şi bordul de fugă al profilului. Bordul de atac este definit ca punctul din faţa profilului care are curbura maximă, având formă rotunjită. Prin bordul de fugă se înţelege punctul de curbură maximă din spatele profilului ce are formă ascuţită.

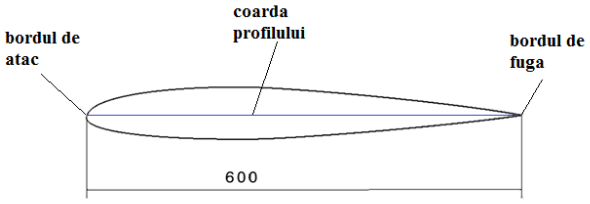


Fig. 4.18. Coarda profilului.

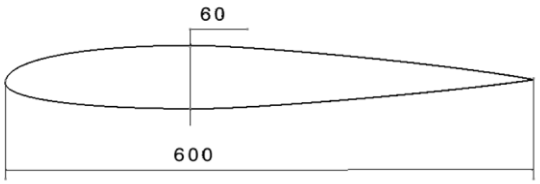


Fig. 4.19. Grosimea maximă a profilului.

Profilul aerodinamic este caracterizat de polarele profilului. Acestea sunt diagrame ce reprezintă interdependenţa dintre coeficientul de portanţă C_L, coeficientul de rezistenţă la înaintare C_D şi unghiul de bătaie, α.

Pentru pala de elicopter luată spre analiză, s-a ales un profil aerodinamic BELL/WORTMANN FX 69-H-098 având caracteristicile aerodinamice ilustrate în figura 4.20 [http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx69h098-il].

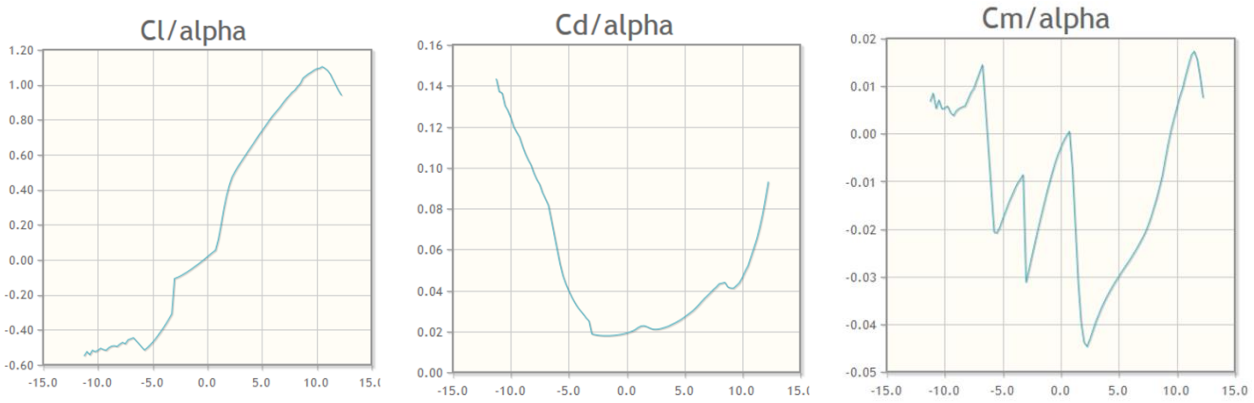


Fig. 4.20. Polarele profilului BELL/WORTMANN FX 69-H-098, după [http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx69h098-il].

Polarele profilului au rolul de a ajuta la determinarea celor doi coeficienţi aerodinamici necesari pentru calculul portanţei şi al rezistenţei la înaintare.

Valorile rezultatelor obţinute în urma calculelor s-au centralizat în Tabelul 4.2.

Tabel 4.2. Valorile rezultatelor parametrilor necesari analizei statice.

Segment		01	02	03	04	05	06	07
Raza	*m*	2,28	3,06	3,85	4,63	5,42	6,21	6,99
C_l		0,8245	0,7374	0,6455	0,5512	0,4256	0,1143	0,0173
C_d		0.0315	0,02695	0,02355	0,02139	0,02163	0,02185	0,01915
C_m		0,0263	0,03	0,0341	0,0396	0,0438	0,0076	0,0029
v	*m/s*	52,55	70,66	88,78	106.89	125.01	143,13	161,24
F_L	N	393	707	1014	1281	1358	449	53
F_D	N	19	29	40	52	73	96	107
Momentul	Nm	9,3	19,3	34,6	58,2	88,1	20	9,7
Masa	kg	9,7	8,5	7,9	7,2	7	5,4	4,4
Forta centrifugă	N	11748	13843	16165	17738	20168	17813	16351

Pentru a obţine soluţia analizei liniare statice (in ipoteza micilor deformaţii) s-a calculat unghiul maxim al poziţiei de echilibru a palei cu ecuaţia de momente pe orizontală, respectiv pe verticală luând în considerare componentele forţei centrifuge şi de portanţă pe fiecare segment. În urma calculelor s-a obţinut unghiul maxim de 2.45°, care este ilustrat în figura 4.21.

Modelul FEM a fost rotit cu acest unghi față de axa Ox iar vectorii componentelor celor trei forțe (portanță, rezistență și centrifugă) s-au aliniat după sistemul global cartezian de axe.

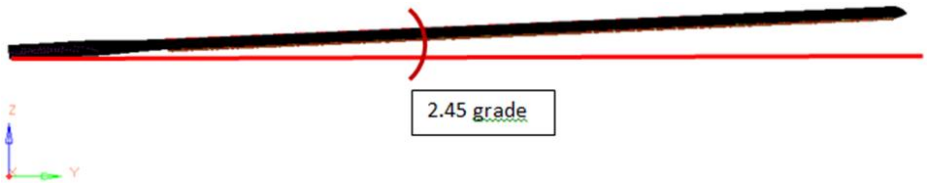
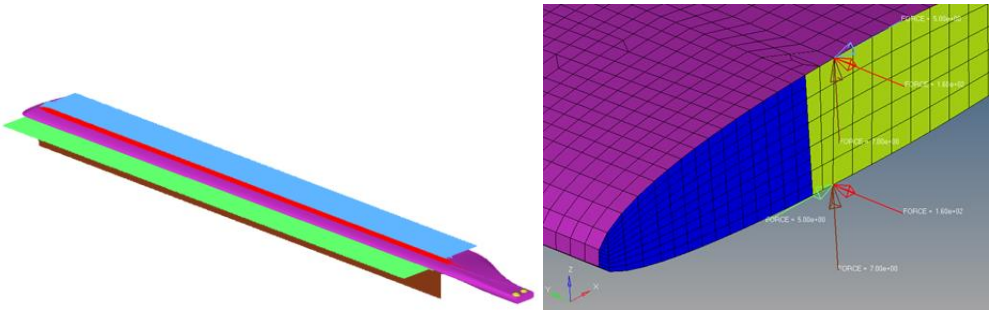


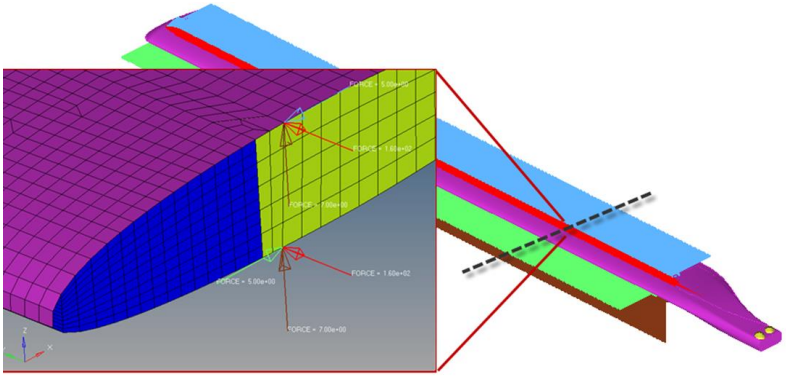
Fig. 4.21. Poziția palei față de axa orizontală (poziția de echilibru).

În cadrul analizei structurale, portanța, rezistența la înaintare și forța centrifugă s-au aplicat ca forțe distribuite pe numărul de noduri de pe fiecare segment al palei, atât pe extrados cât și pe intrados (distanța față de bordul de atac s-a considerat la 25% din lungimea corzii), ca în figura 4.22, a. Momentul aerodinamic s-a descompus într-un cuplu de forțe și s-a aplicat în aceleași noduri ca și celelalte încărcări, conform figurii 4.22, b.

Cazul de calcul final s-a considerat combinația tuturor încărcărilor (portanță + forța centrifugă + momentul aerodinamic), după cum se poate observa în figura 4.22, c.



a) b)



c)

Fig. 4.22. Încărcările care au fost aplicate asupra palei de elicopter: a) direcțiile de încarcare; b) încărcările aplicate asupra palei (momentul aerodinamic); c) Detaliu cu toate încărcările (portanța + forța centrifugă + momentul aerodinamic) aplicate asupra palei.

În cadrul analizei structurale a palei de elicopter s-au considerat două cazuri:

- cazul I pentru regimul de zbor staţionar – *Hovering – Grounding* în care elicopterul zboară la un punct fix (planare), zborul realizându-se fără avans (v = 0);
- cazul II pentru regimul de zbor cu înaintare – *Pală avansantă – Pală reculantă*, în care elicopterul zboară cu viteza de 220 km/h, palele având o mişcare de rotaţie în plan orizontal.

4.6. REZULTATE. DISCUȚII

4.6.1. Rezultate FEM pentru regimul de zbor staţionar (hovering–grounding)

Prin zbor staţionar se înţelege cazul în care elicopterul zboară la punct fix, păstrându-şi altitudinea, zborul fiind realizat în regim staționar (fără avans). În acest mod se realizează testarea rotorului şi a palelor în apropierea solului. După cum se poate observa în figura 4.23, în timpul planării, înainte de mișcarea de rotație a palelor, are loc o deplasare a capătului liber al palelor în plan vertical.

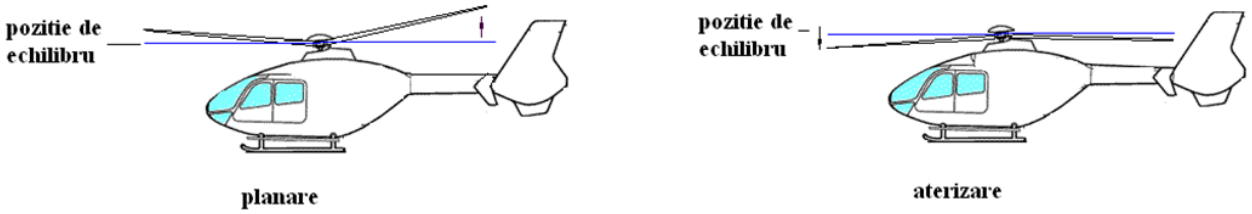


Fig. 4.23. Poziţia palelor în cazul: a) planare (hovering), b) aterizare (grounding), după [Cazangiu ș.a., 2014].

Pentru simularea ciclului de oboseală al palelor în cazul de zbor staţionar s-au aplicat toate forţele şi momentele aerodinamice calculate în subcapitolul anterior. De asemenea, s-a considerat cazul încarcării la limită.

În figura 4.24 este ilustrată distribuţia valorilor deplasării maxime totale de-a lungul palei. Se poate observa că deplasarea maximă se află la poziţionată la capătul liber al palei, având valoarea de 226 mm. Conform figurii, la capătul încastrat nu există deplasare.

Deplasarea maximă pe direcţia Oz este reprezentată în figura 4.25. Spre deosebire de analiza magnitudinii, valorile deplasării pe direcţia specificată sunt diferite. Astfel se poate vedea în imagine că la capătul încastrat se obţine o valoare minimă ale deplasării care se menţine constantă aproape până la jumătatea palei. În acest caz, capătul liber prezintă deplasări maxime de 169 mm.

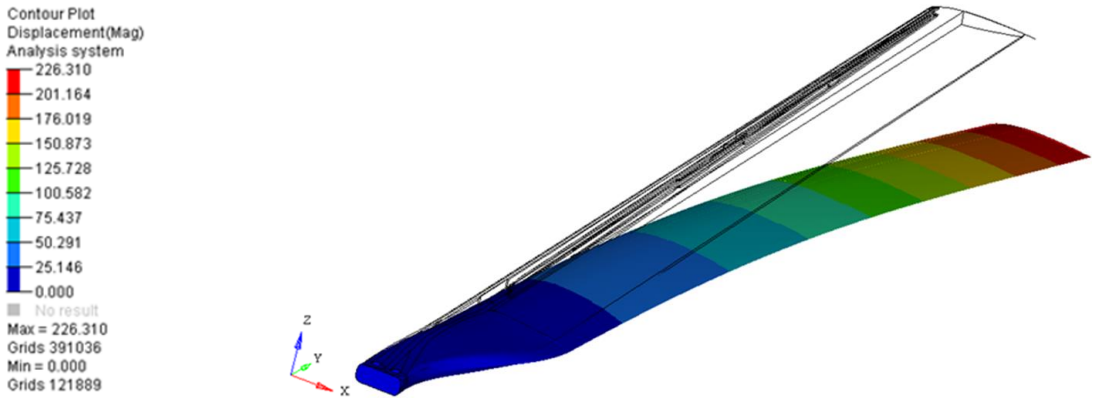


Fig. 4.24. Deplasarea maximă totală **δ = 226 mm** (deplasare scalată).

Fig. 4.25. Deplasarea maximă U_z**δ = 169 mm** (deplasare scalată).

De regulă în timpul unui ciclu de solicitare la oboseală apar, nu numai deplasări ci şi deformaţii şi diferite tensiuni.

Astfel, figura 4.26 prezintă în mod grafic distribuţia valorilor deformaţiei locale pe lonjeron. Atât în timpul manevrelor de zbor la punct fix, dar şi în zborul cu inaintare lonjeronul este elementul care suferă cele mai multe deformaţii. După cum se observă în figură, zona de deformaţie maximă apare în partea interior laterală a regiunii de încastrare.

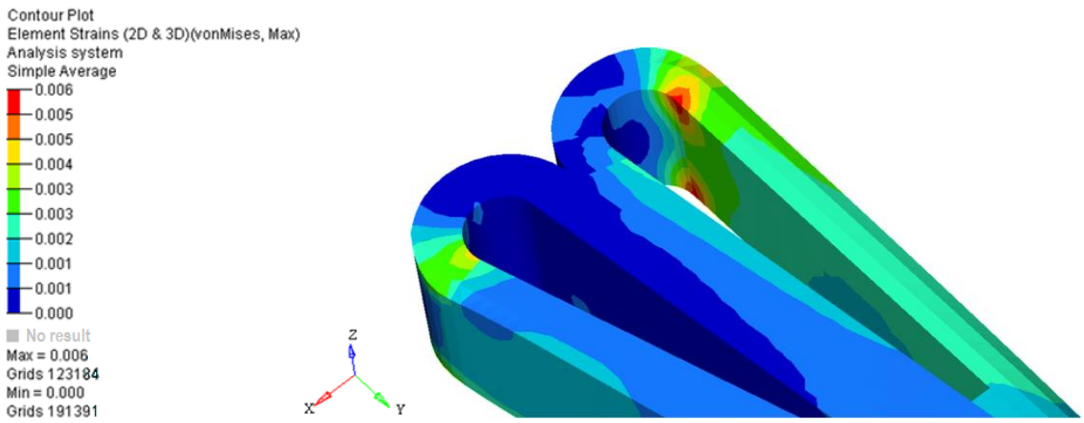


Fig. 4.26. Deformaţia locală pe lonjeron (ε = 0.006%).

Harta distribuiei tensiunii von Mises este ilustrată în figura 4.27. Tensiunea von Mises este considerată o tensiune uniaxială care corespunde energiei de deformare furnizată de acţiunea forţelor şi momentelor aerodinamice care se aplică asupra structurii palei. Se observă că valoarea maximă a tensiunii este de 78 N/mm^2 ceea ce înseamnă ca structura are o rigiditate bună.

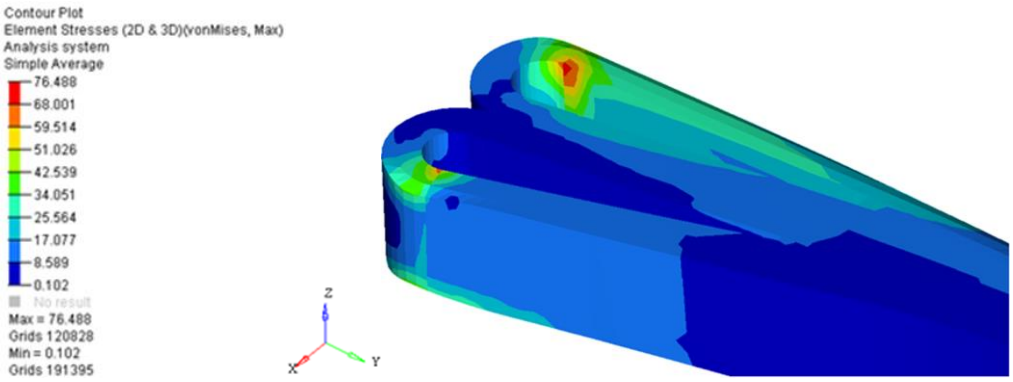


Fig. 4.27. Tensiunea von Mises maximă pe lonjeron (σ = 78 N/mm^2).

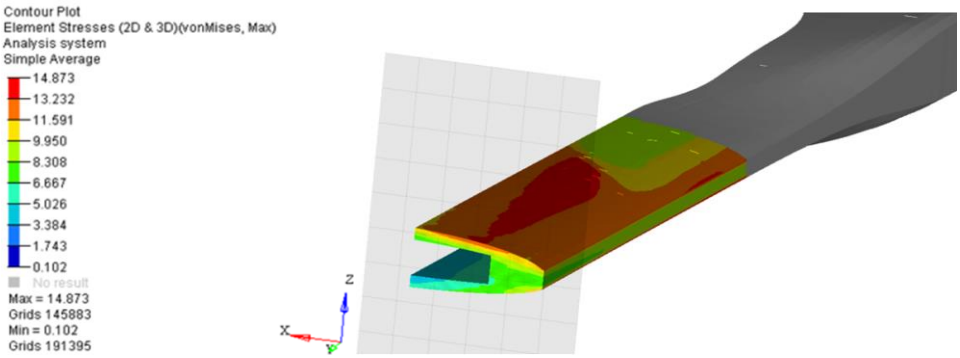


Fig. 4.28. Tensiunea von Mises locală pe lonjeron (σ = 14 N/mm^2).

Figura 4.28 prezintă în mod grafic distribuţia tensiunilor von Mises locală pe lonjeron. Conform simulării, în timpul manevrelor efectuate la sol, datorită mişcării sus – jos a palei zona maxim solicitată va apărea pe latura lonjeronului atât pe exterior cât şi pe interior.

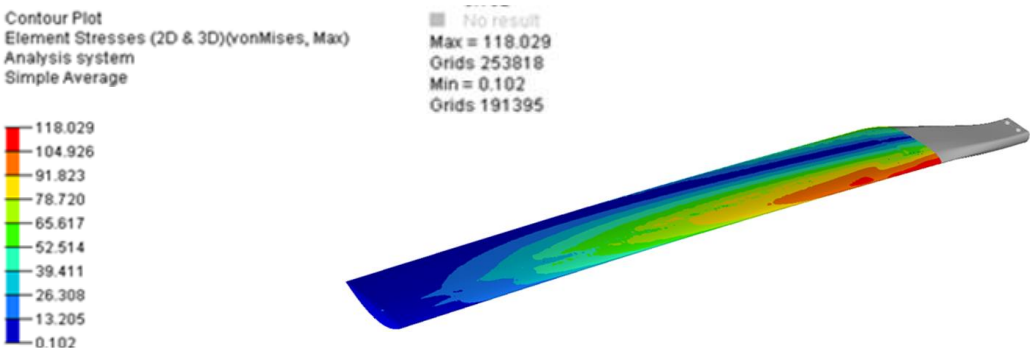


Fig. 4.29. Variaţia tensiunii echivalente în lungul palei.

În figura 4.29 este ilustrată variaţia tensiunii echivalente în lungul palei. Tensiunea echivalentă reprezintă tensiunea normală principală care ar trebui produsă într-o structură supusă unei solicitări, pentru a se crea în interiorul structurii o stare de tensiune cu acelaşi grad de periculozitate ca şi în cazul stării de tensiu-ne normale. În cazul condiţiilor de solicitare selectate (zbor staţionar) se poate observa că zona de tensiune echivalentă maximă (cu risc) este situată pe înveliş în apropierea regiunii de încastrare.

4.6.2. Rezultate ale analizei cu FEM pentru regimul de zbor cu înaintare (viteza de înaintare 220km/h)

Conform [Postelnicu et al., 2001], prin zborul cu înaintare se înţelege acel regim de zbor al elicopterului care implică o translaţie. În cazul zborului cu înaintare viteza de zbor a elicopterului este dată de relaţia:

$$v = \omega \cdot R, \tag{4.19}$$

în care: v este viteza de înaintare, ω este viteza unghiulară a rotorului şi R, raza rotorului.

Cazul *pală avansantă - pală reculantă* este ilustrat schematic în figura 4.30. Astfel, cu negru sunt marcate palele în poziţia iniţială (în care v = 0 km/h). Când rotorului i se aplică o viteză unghiulară de 23 rad/s acesta va roti cele două pale şi va determina creşterea vitezei de înaintare. Pala care va avea direcţia de deplasare (rotaţie) în sens pozitiv se numeşte *pala avansantă* sau pala conducătoare iar pala a cărei direcţie de deplasare este în sens negativ poartă numele de *pală reculantă*. Conform schemei, se poate observa că pala avansantă este cea care porneşte mişcarea, pala reculantă practic este trasă după aceasta.

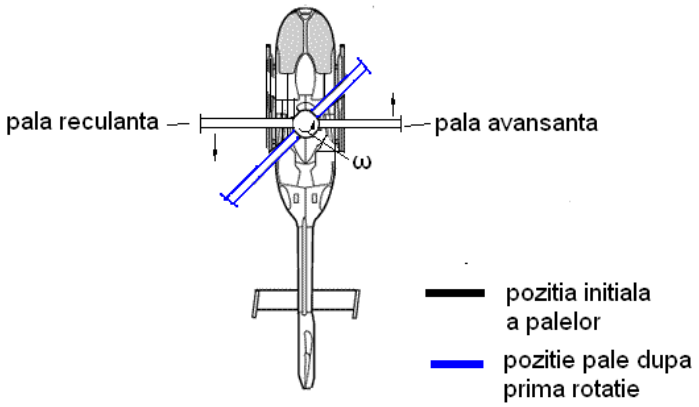


Fig. 4.30. Modelul pală avansantă – pală reculantă, adaptat după [EUROCOPTER EC135].

În cazul analizei liniare elastice a palei s-a considerat următoarea ipoteză de calcul: pentru a se obţine echilibrul forţelor atât pe pala avansantă cât şi pe cea reculantă, s-au calculat diferite unghiuri de pas pozitive şi negative. Calculele s-au efectuat utilizând formulele extrase din documentaţia de specialitate [Postelnicu ş. a., 2001] şi s-au obtinut următoarele valori:

- unghiul α = 0.51°corespunzator unghiului de torsiune θ= -2.5° (Fig. 4.28, a);
- unghiul α = 2.34° corespunzator unghiului de torsiune θ= +6° (Fig. 4.28, b).

Fig. 4.31. Unghiurile poziţiei de echilibru: a) pala reculantă, b) pala avansantă.

4.6.3. Rezultate ale analizei FEM pentru pala reculantă α=0,51° (F = 3800 N)

În cadrul analizei liniare elastice a palei, simulările s-au efectuat atât pe pala avansantă cât şi pe cea reculantă la o încărcare maximă de 3800 N. Astfel, s-a obţinut harta tensiunilor von Mises maxime care este ilustrată în figura 4.32.

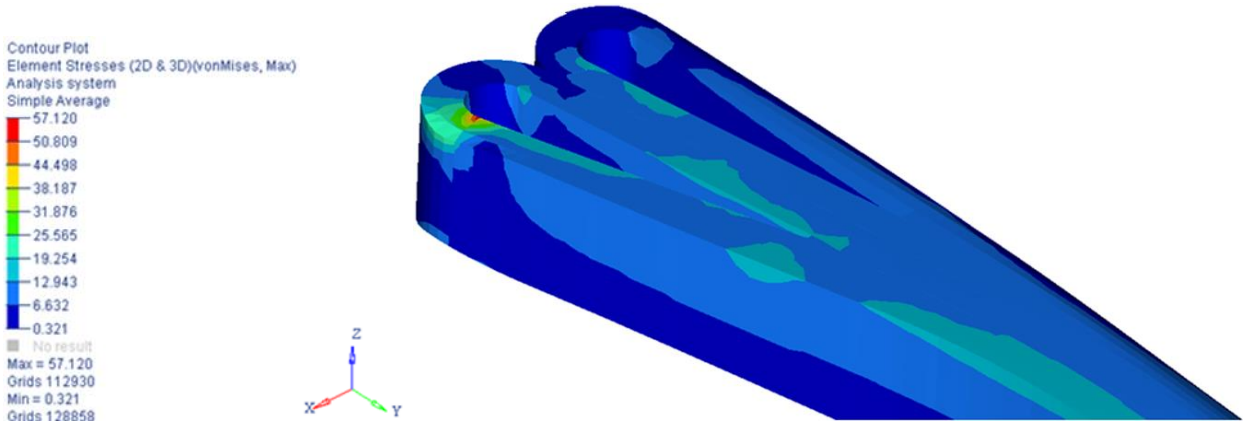


Fig. 4.32. Tensiunea von Mises maximă pe lonjeron (σ = 57 N/mm^2).

După cum se observă în imagine, s-a identificat o zonă relativ mică de tensiuni critice pe partea lateral interioară a lonjeronului.

Figura 4.33 prezintă modul de distribuţie a tensiunilor von Mises locale de-a lungul lonjeronului. Se pot observa, de asemenea, zone de tensiuni critice pe partea lateral exterioară a lonjeronului, tensiunea maximă având valoarea de 25 N/mm^2.

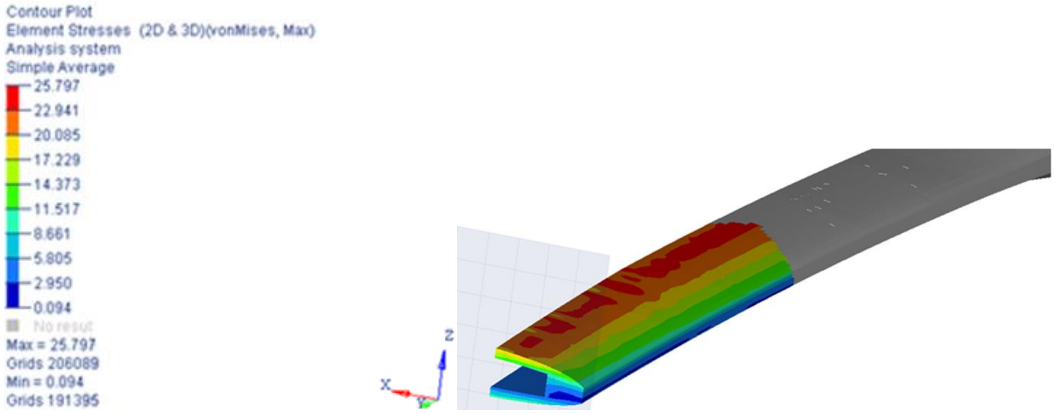


Fig. 4.33. Tensiunea von Mises locală pe lonjeron (σ = 25 N/mm^2).

Variaţia tensiunilor echivalente de-a lungul palei este ilustrată în figura 4.34. Urmărind harta distribuţiei tensiunilor se poate identifica o zonă critică pe partea suprafaţa exterioară a învelişului.

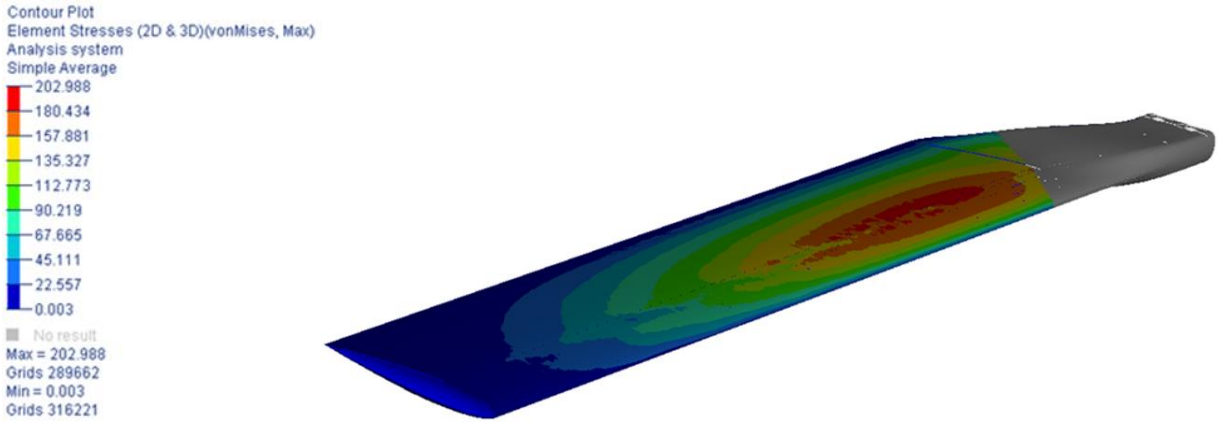


Fig. 4.34. Variaţia tensiunii echivalente în lungul palei.

4.6.4. Rezultate ale analizei FEM pentru pala avansantă α = 2,34° (F=3800 N)

În cazul palei avansante rezultatele în ceea ce priveşte valorile tensiunilor sunt semnificativ mai mari. Figura 4.35 ilustrează distribuţia tensiunilor von Mises maxime pe

lonjeron, în capătul de încastrare. Zona critică este de asemenea poziţionată pe partea lateral interioară a lonjeronului, dar tensiunea maximă atinge valoarea de 198 N/mm^2.

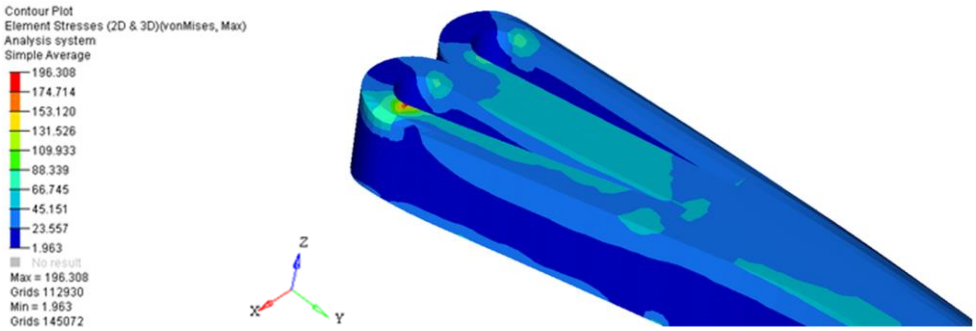


Fig. 4.35. Tensiunea von Mises maximă pe lonjeron (σ = 198 N/mm^2).

Harta tensiunilor von Mises din capătul liber al lonjeronului este prezentată în figura 4.36. Se poate identifica o zonă de tensiuni critice la marginea suprafaţei lonjeronului şi pe muchia laterală a acestuia.

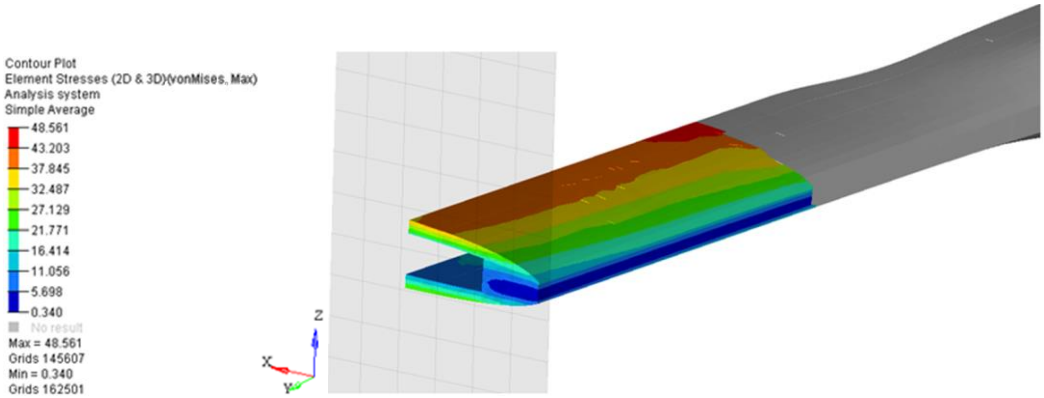


Fig. 4.36. Tensiunea von Mises locală pe lonjeron (σ= 48 N/mm^2).

Şi în cazul tensiunilor echivalente de-a lungul palei se poate observa o creştere semnificativă a valorilor, atingând valoarea maximă de 444 N/mm^2 aşa cum se observă în figura 4.37.

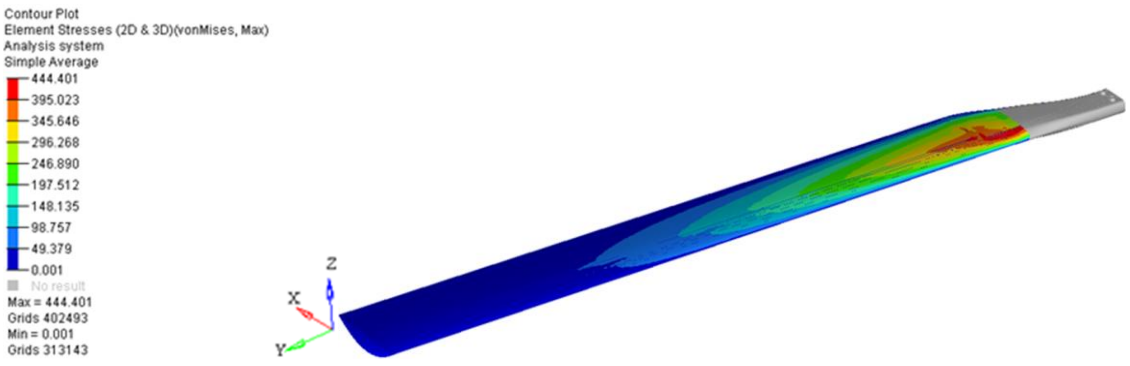


Fig. 4.37. Variatia tensiunii echivalente in lungul palei.

4.6.5. Rezultate ale analizei FEM pentru cazul pală rotor oprit (încărcare cu masa proprie)

S-a realizat o simulare a comportării palei de elicopter pentru cazul în care se încarcă doar greutatea proprie. În acest caz rezultatele nu a fost critice, tensiunile maxime s-au identificat doar în zona bucşilor (zona de prindere pe rotor).

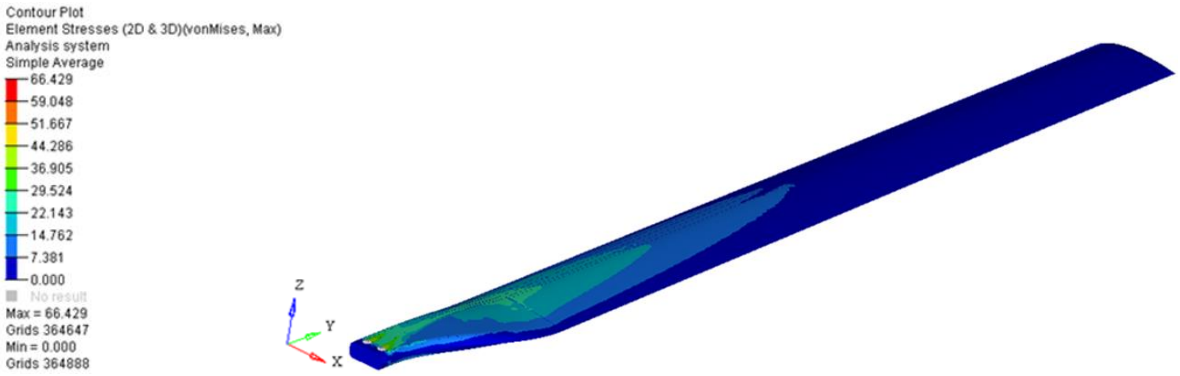


Fig. 4.38. Tensiune maximă pală σ = 66 N/mm^2.

4.6.6. Rezultate ale analizei comparative pentru cazurile de solicitare aplicate

În urma analizei FEM realizată pentru cele două regimuri de zbor (zbor staţionar şi zbor cu înaintare) s-au obţinut o serie de rezultate numerice ale tensiunilor maxime care au fost centralizate în tabelul 4.3.

Ţinând cont de rezultatele obţinute s-a efectuat o analiză comparativă pentru cele 4 cazuri studiate: zbor staţionar, masă proprie, pală avansantă şi pală reculantă.

Tabel 4.3 Valori ale tensiunii echivalente pentru cele 4 cazuri studiate.

CAZ	**Tensiunea maximă pe ÎNVELIŞ** *MPa*	**Tensiunea maximă pe LONJERON** *MPa*
01. Zbor staţionar	387	76
02. Greutate proprie	66	10
03. Pală avansantă	830	196
04. Pală reculantă	215	57

Pe baza valorilor din tabelul 4.3 s-a construit graficul de reprezentare comparativă a variației tensiunii echivalente maxime pentru cele 4 cazuri de solicitare: 1 – zbor staționar, 2 – cazul greutății proprii, 3 – cazul palei avansante și 4 – cazul palei reculante. În acest scop s-a

utilizat un MATLAB (MATrix LABoratory) care este un program specific calculelor și analizelor inginești.

Graficul s-a elaborat pornind de la introducerea valorilor tensiunilor într-o matrice cu 4 linii și 2 coloane după care s-a introdus funcția de generare a graficului de tip ”*bar*”. În cadrul acestei matrici pe prima coloană sunt introduse valorile tensiunilor pentru înveliș iar a doua coloana conține informațiile numerice privind tensiunile care se dezvoltă în lonjeron. Cele 4 linii reprezintă cazurile de solicitare a palei de elicopter care au fost specificate ai sus.

>> Y = [387 76; 66 10; 830 196; 215 57]

Y =

387 76

66 10

830 196

215 57

>> bar(Y,'r')

Introducerea culorilor în grafic s-a realizat conform codurilor specifice MATLAB, astfel pentru culoarea roșie s-a introdus ”*r*” iar pentru albastru s-a utilizat ”*b*”. Introducerea etichetelor celor două axe, precum și trasarea grid-ului s-a realizat într-o rutină de programare prezentată în cele ce urmează.

Cod MATLAB realizare grafic (Fig. 4.36)

```
function createaxes(Parent1, ymatrix1)
%CREATEAXES(PARENT1,YMATRIX1)
%  PARENT1:  axes parent
%  YMATRIX1:  bar matrix data

% Create axes
axes1 = axes('Parent',Parent1,'XTick',[1 2 3 4],'XGrid','on',...
    'Position',[0.13 0.09514 0.8008 0.7632]);
% Uncomment the following line to preserve the X-limits of the axes
% xlim([0.5 4.5]);
% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim([0 900]);
% Uncomment the following line to preserve the Z-limits of the axes
% zlim([-1 1]);
box('on');
hold('all');

% Create multiple lines using matrix input to bar
bar1 = bar(ymatrix1,'Parent',axes1);
set(bar1(1),'FaceColor',[1 0 0],'DisplayName','tensiuni invelis');
set(bar1(2),'FaceColor',[0 0 1],'DisplayName','tensiuni lonjeron');

% Create xlabel
```

```
xlabel('Cazuri de solicitare a palei de elicopter');

% Create ylabel
ylabel('Tensiunea echivalenta maxima, [MPa]');

% Create title
title('Variatia tensiunii echivalente in invelis si lonjeron pentru cele 4
cazuri de solicitare');
```

Analizând graficul din figura 4.39 se poate observa că în înveliș (marcat cu culoare roșie) se dezvoltă tensiuni mult mai mari decât cele de la nivelul lonjeronului (culoare albastră), maximele fiind observate în cazul palei avansante.

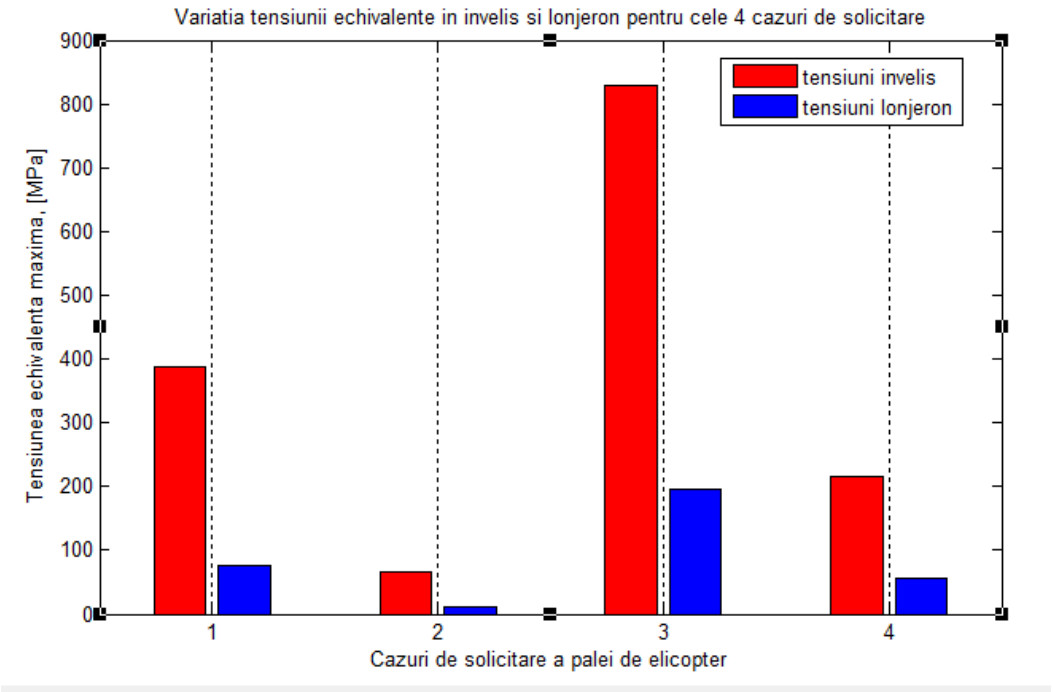
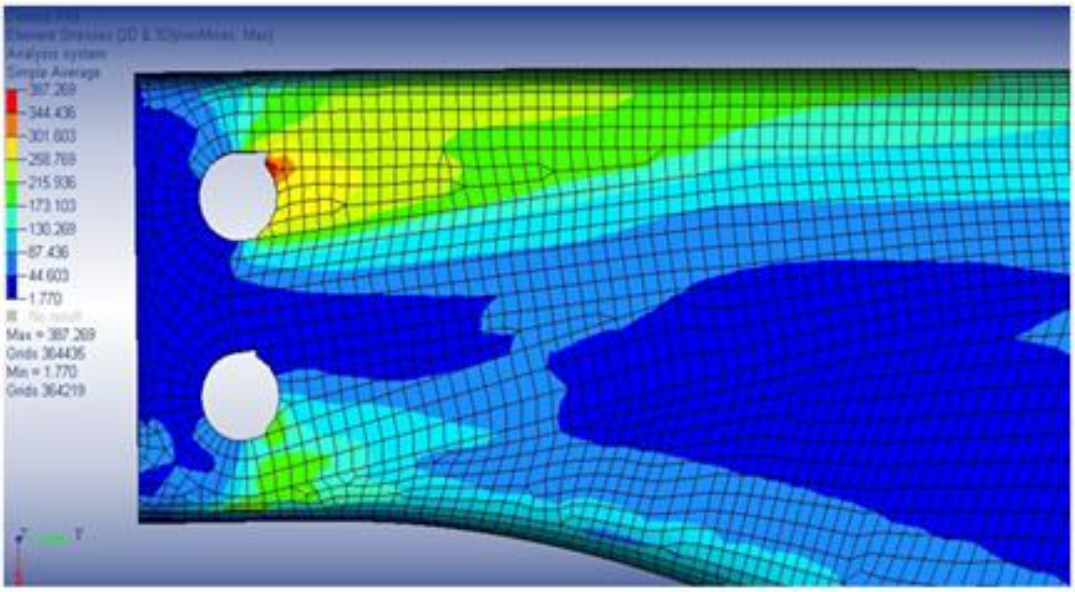


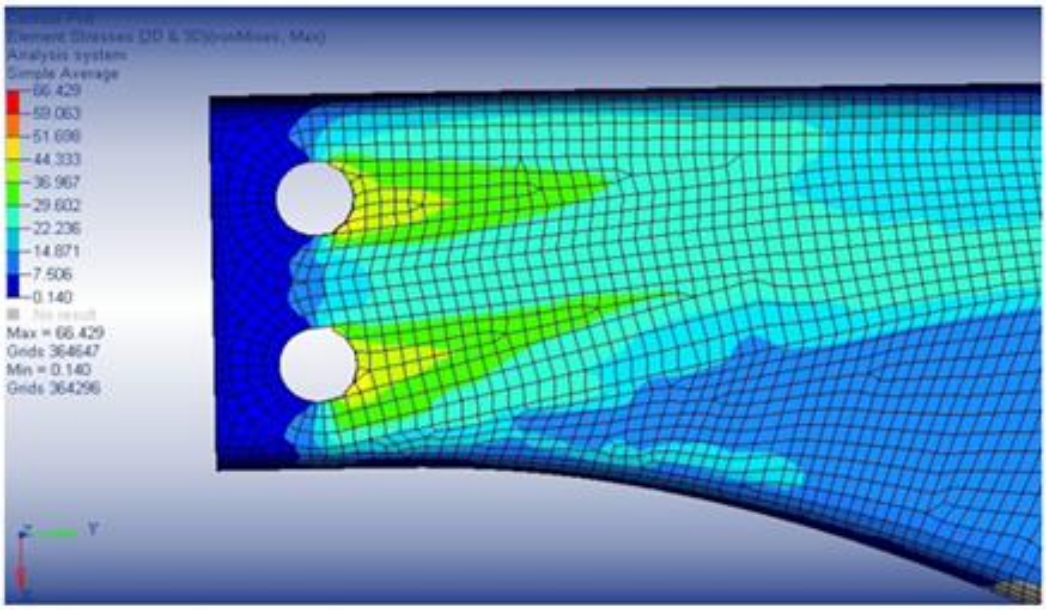
Fig. 4.39. Variația tensiunilor echivalente: învelis vs lonjeron.

Astfel, în figura 4.40 este ilustrată variaţia tensiunilor echivalente pe înveliş în zona bucşilor: a) cazul zborului staţionar şi b) cazul încărcării proprii.

Se poate identifica în cazul zborului staţionar o zonă critică foarte mică în zona bucşilor cu valorile maxime ale tensiunii de 367 N/mm^2. Conform imaginii, cazul încărcării proprii nu furnizează tensiuni critice.



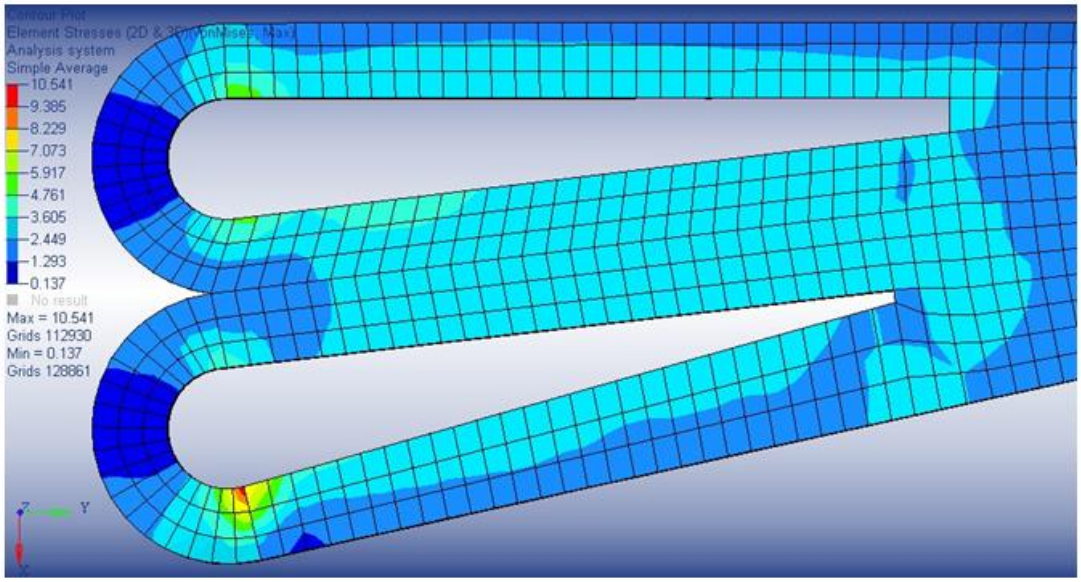
a)



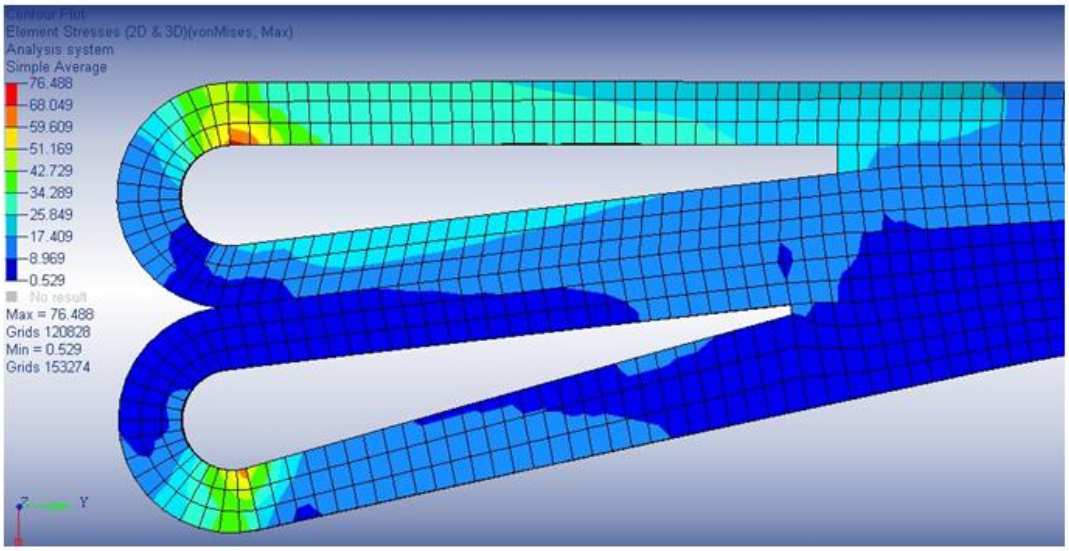
b)

Fig. 4.40. Variaţia tensiunilor echivalente pe *înveliş*: a) zbor staţionar, b) masa proprie.

Figura 4.41 prezintă o analiză comparativă între valorile tensiunilor echivalente de pe lonjeron din zona de încastrare, pentru cazul zborului staţionar (a) şi cazul încărcării proprii (b). În acest caz comparativ tensiunile echivalente cu valori mai mari apar la încărcarea masei proprii (σ_{ech} = 76 N/mm^2). La zborul staţionar de dezvoltă de asemenea tensiuni critice dar doar de 11 N/mm^2.



a)

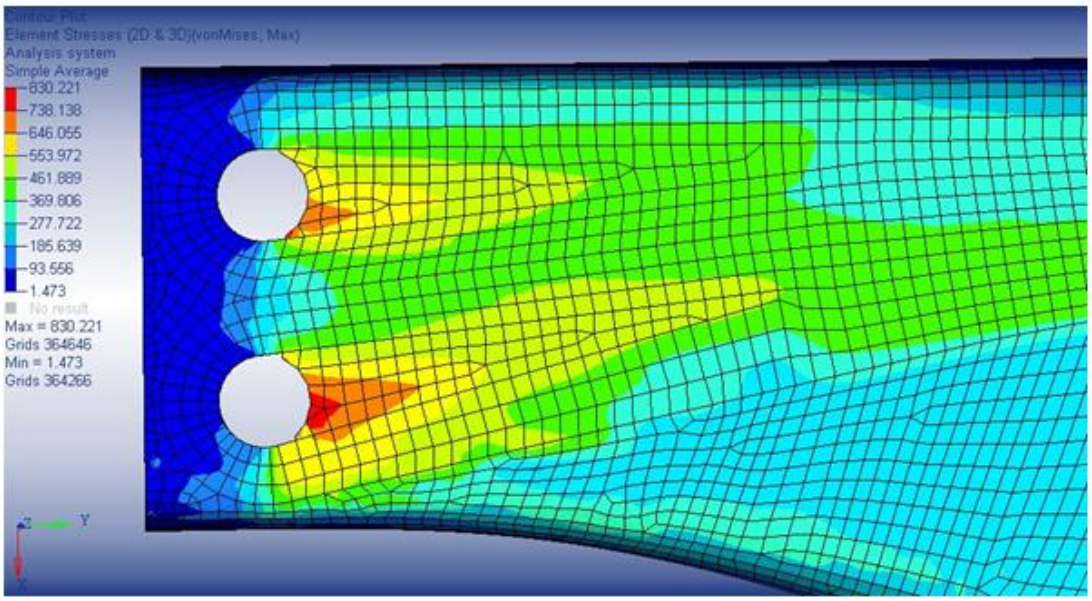


b)

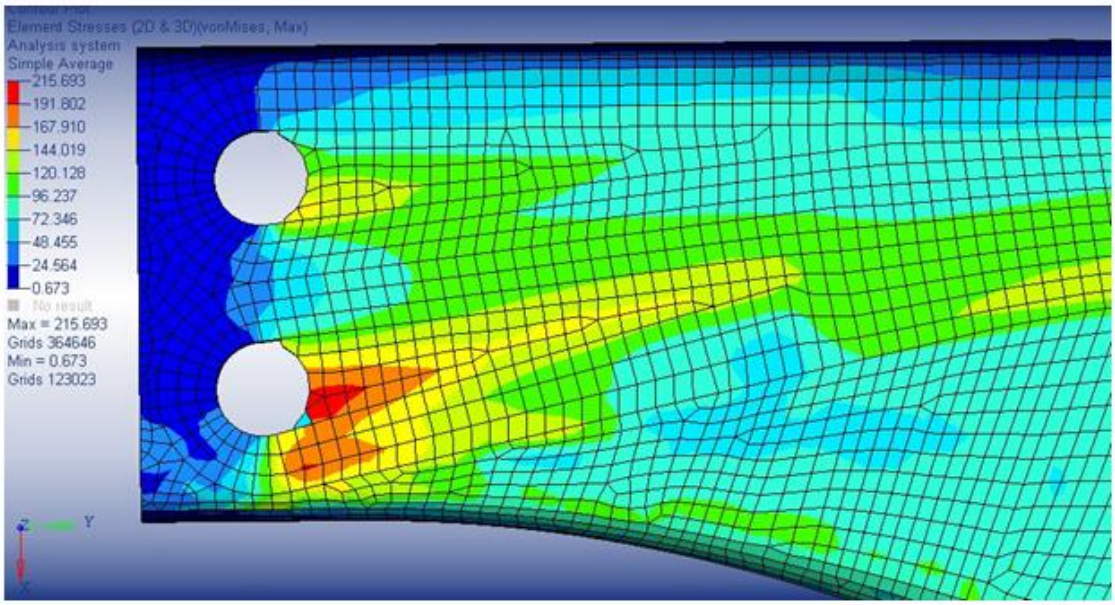
Fig. 4.41. Variaţia tensiunilor echivalente pe *lonjeron*: a) zbor staţionar, b) masa proprie.

Analiza comparativă între rezultatele obţinute pentru pala avansantă şi pala reculantă este ilustrată grafic în figurile 4.42 şi 4.43.

Figura 4.42 prezintă comparativ variaţia tensiunilor echivalente pe înveliş, în zona bucşilor: a) pentru pala avansantă şi b) pentru pala reculantă. După cum se observă în figură pentru cazul palei avansante valorile critice ale tensiunii echivalente sunt semnificativ mai mari (σ_{ech} = 830 N/mm^2) decât pentru pala reculantă (σ_{ech} = 216 N/mm^2). De asemenea, pentru cele două cazuri zona critică apare în regiunea bucşilor.



a)

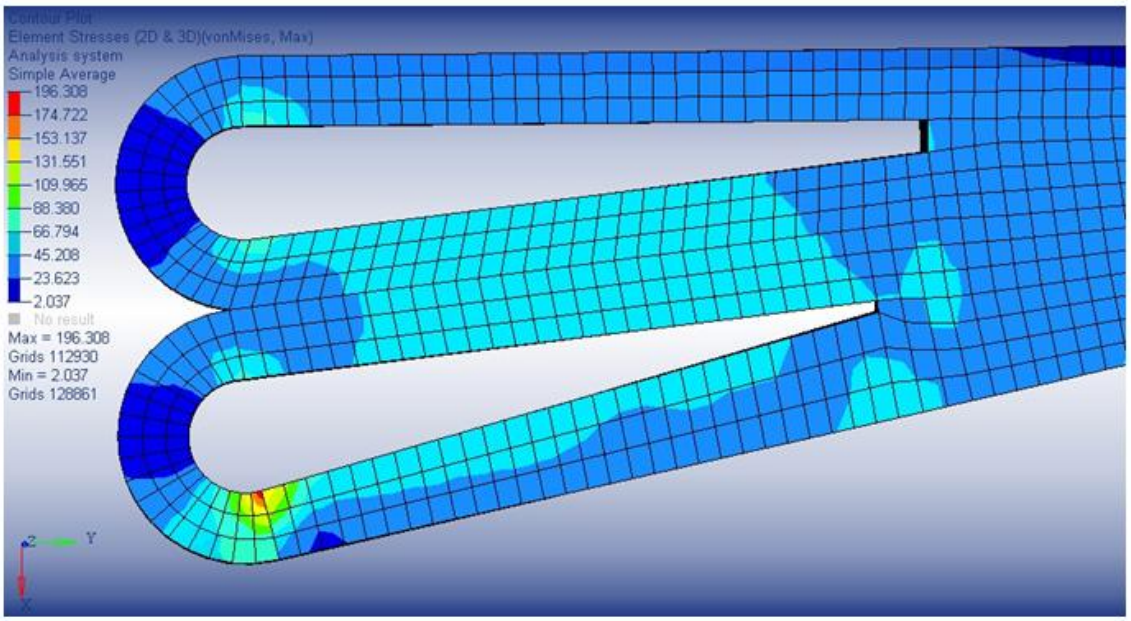


b)

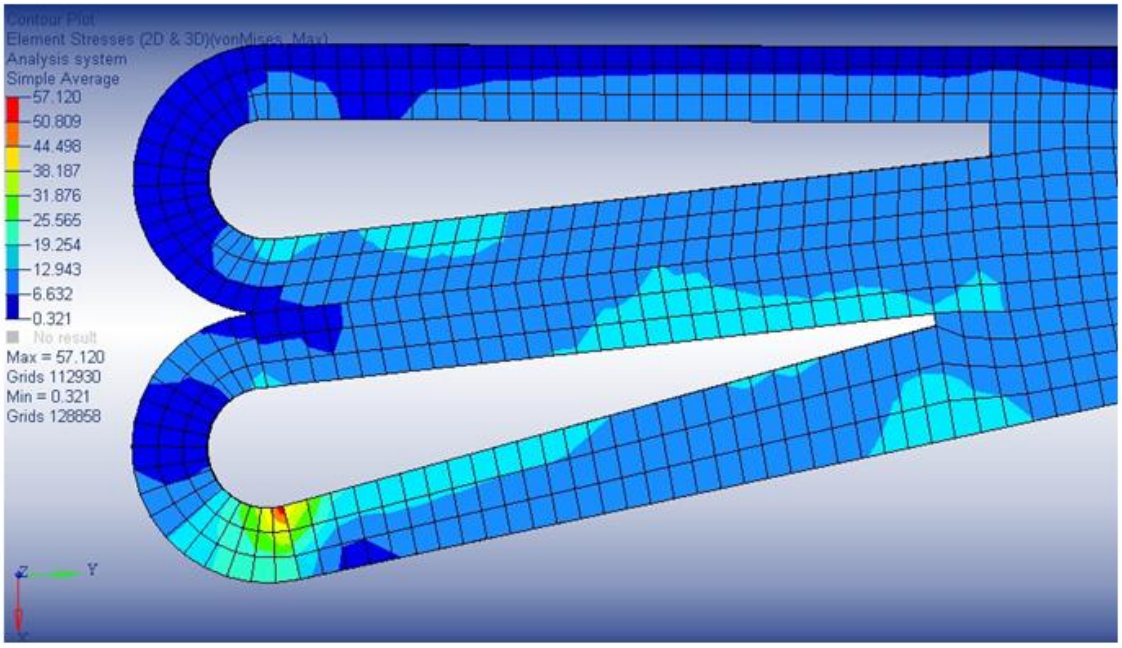
Fig. 4.42. Variatia tensiunilor echivalente pe *înveliş*: a) pala avansantă, b) pala reculantă.

În figura 4.43 este ilustrată variaţia tensiunilor echivalente pe lonjeron, în zona de încastrare, pentru cele două cazuri luate în studiu.

Şi în acest caz de analiză comparativă tensiunile critice mai mari se identifică tot pentru pala avansantă (σ_{ech} = 196 N/mm^2), pala reculantă dezvoltând tensiuni critice mai reduse (σ_{ech} = 57 N/mm^2).



a)



b)

Fig. 4.43. Variaţia tensiunilor echivalente pe *lonjeron*: a) pala avansantă, b) pala reculantă.

Pe baza rezultatelor numerice obţinute în urma analizei FEM pentru cele două regimuri de zbor s-au efectuat o serie de calcule privind diferenţa de tensiuni, atât la întindere cât şi la compresiune, între cazul palei avansante şi cel al palei reculante precum şi între cazul de zbor la punct fix şi cel al încărcării proprii. Rezultatele au fost de asemenea centralizate în tabelul 4.4.

Diferenţa de tensiuni între pala avansantă şi pala reculantă

- **ÎNVELIŞ**
  - Pala avansantă (+6°): σ_1= 725 MPa
  - Pala reculantă (-2.5°): σ_1= 204 MPa,

unde σ_1 este tensiunea maximă principală (întindere)

$\Rightarrow \delta_{\sigma 1} = 725 - 204 = 521\ MPa$.

  - Pala avansantă : σ_3 = -551 MPa
  - Pala reculantă: σ_3 = -57 MPa,

unde σ_3 este tensiunea minimă principală (compresiune)

$\Rightarrow \delta_{\sigma 3} = |-551| - |-57| = |494|\ MPa$.

- **LONJERON**
  - Pala avansantă (+6°): σ_1= 87 MPa
  - Pala reculantă (-2.5°): σ_1= 21 MPa,

$\Rightarrow \delta_{\sigma 1} = 87 - 21 = 66\ MPa$.

  - Pala avansantă : σ_3 = -165 MPa
  - Pala reculantă: σ_3 = -47 MPa,

$\Rightarrow \delta_{\sigma 3} = |-165| - |-47| = |118|\ MPa$.

Diferenţa de tensiuni între cazul zborului la punct fix şi greutatea proprie la sol

- **ÎNVELIŞ**
  - Zbor la punct fix: σ_1 = 285 MPa
  - Greutate proprie: σ_1 = 50 MPa,

$\Rightarrow \delta_{\sigma 1} = 285 - 50 = 235\ MPa$.

  - Zbor la punct fix: σ_3 = -192 MPa
  - Greutate proprie: σ_3 = -40 MPa,

$\Rightarrow \delta_{\sigma 3} = |-192| - |-40| = |152|\ MPa$.

- **LONJERON**
  - Zbor la punct fix: σ_1= 67 Mpa
  - Greutate proprie: σ_1= 8 MPa

$\Rightarrow \delta_{\sigma 1} = 67 - 8 = 59\ MPa$.

  - Zbor la punct fix: σ_3 = -46 MPa

- Greutate proprie: σ_3 = -8 MPa,

$\Rightarrow \delta_{\sigma 3} = |-46| - |-8| = |38| \ MPa.$

Tabel 4.4. Rezultate ale diferenţei de tensiuni pentru cazurile studiate.

CAZ	$\sigma 1$ Înveliş	$\sigma 1$ Lonjeron	$\sigma 3$ Înveliş	$\sigma 3$ Lonjeron	$\Delta 1$ Înveliş	$\Delta 3$ Înveliş	$\Delta 1$ Lonjeron	$\Delta 3$ Lonjeron
01. Pala avansanta 6°	725	87	- 551	-165	521	494	66	118
02. Pala reculanta-2,5°	204	21	-57	- 47				
03. Zbor la punct fix	285	67	-192	-46	235	152	59	38
04. Greutate proprie	50	8	-40	-8				

Utilizând valorile din tabelul 4.4 s-au trasat graficele de variaţie a tensiunilor de întindere şi compresiune atât pe lonjeron cât şi la nivelul învelişului, pentru cele 4 cazuri de solicitare: 1 – cazul palei avansante, 2 – cazul palei reculante, 3 – cazul zborului staționar (zbor la punct fix) și 4 – cazul încărcării proprii.

În figura 4.44 este ilustrată comparativ variaţia tensiunilor de întindere pe înveliș și lonjeron în cele 4 cazuri de solicitare. Conform legendei cu verde sunt reprezentate tensiunile de pe înveliș iar cu roșu, tensiunile de la nivelul lonjeronului. Astfel, se poate observa că tensiunile cele mai mari apar în cazul palei avansante iar minimul îl vom avea la încărcarea greutăţii proprii. Conform graficului, valorile tensiunilor dezvoltate în înveliș sunt mai mari decât cele de la nivelul lonjeronului.

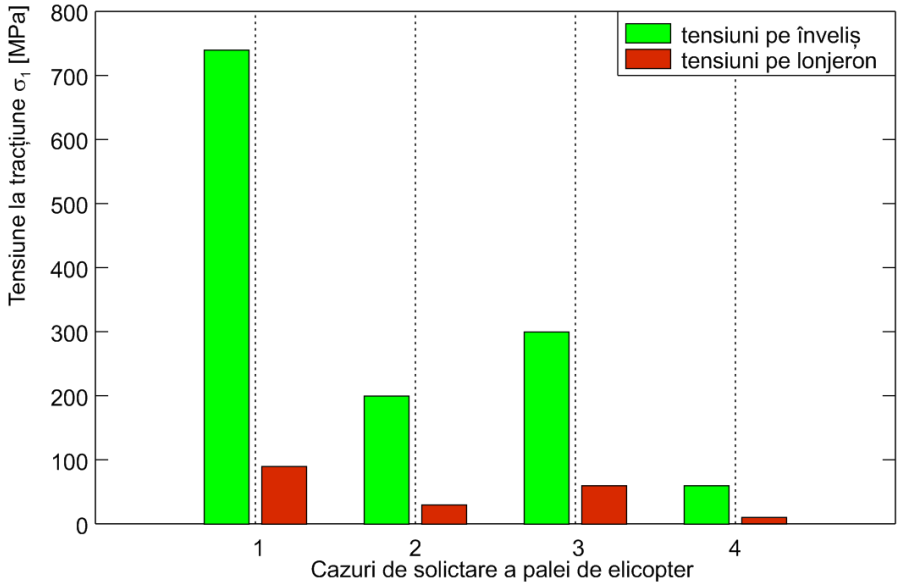


Fig. 4.44. Variaţia tensiunilor σ_1 pe înveliș și lonjeron pentru cele 4 cazuri de solicitare.

Și în acest caz, la elaborarea graficului s-a utilizat o rutină de programare MATLAB care a avut la bază scrierea valorilor sub formă matriceală. Codul MatLab utilizat la realizarea graficului din figura 4.44 este prezentat mai jos:

```
function createaxes(Parent1, ymatrix1)
%CREATEAXES(PARENT1,YMATRIX1)
%  PARENT1:  axes parent
%  YMATRIX1:  bar matrix data

% Create axes
axes1 = axes('Parent',Parent1,'XTick',[1 2 3 4],'XGrid','on',...
    'Position',[0.13 0.11 0.775 0.729]);
box('on');
hold('all');

% Create multiple lines using matrix input to bar
bar1 = bar(ymatrix1,'Parent',axes1);
set(bar1(1),'FaceColor',[0 1 0],'DisplayName','tensiuni pe invelis');
set(bar1(2),'FaceColor',[0.8471 0.1608 0],...
    'DisplayName','tensiuni pe lonjeron');

% Create xlabel
xlabel('Cazuri de solicitare a palei de elicopter');

% Create ylabel
ylabel('Tensiunea la tractíune, [MPa]');

% Create title
title('Variatia tensiunii la tractiune in cele 4 cazuri de solicitare');
```

Variaţia tensiunilor de compresiune pe lonjeron este prezentată în figura 4.45. Conform graficului se poate vedea că şi în acest caz tensiunile maxime se dezvoltă în cazul palei avansante iar nivelul minim apare la cazul de încarcare al masei proprii. Valorile cele mai mari ale tensiunilor apar la nivelul învelişului.

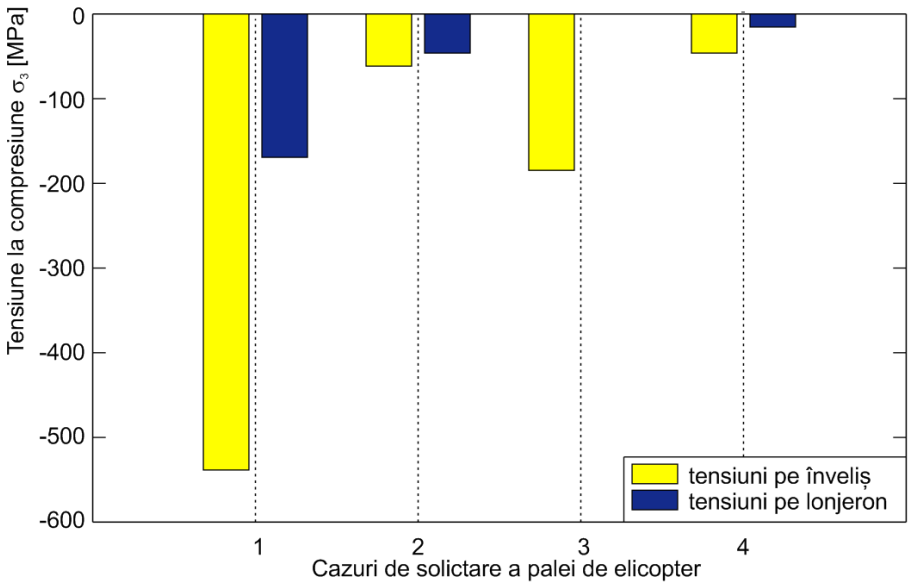


Fig. 4.45. Variaţia tensiunilor σ_3 pe înveliș și lonjeron pentru cele 4 cazuri de solicitare.

Codul MATLAB utilizat pentru trasarea graficului din figura 4.45 este prezentat în cele ce urmează.

```
function createaxes(Parent1, ymatrix1)
%CREATEAXES(PARENT1,YMATRIX1)
%  PARENT1:  axes parent
%  YMATRIX1:  bar matrix data

% Create axes
axes1 = axes('Parent',Parent1,'XTick',[1 2 3 4],'XGrid','on',...
    'Position',[0.13 0.2237 0.775 0.6753]);
box('on');
hold('all');

% Create multiple lines using matrix input to bar
bar1 = bar(ymatrix1,'Parent',axes1);
set(bar1(1),'FaceColor',[1 1 0],'DisplayName','tensiuni invelis');
set(bar1(2),'FaceColor',[0.07843 0.1686 0.549],...
    'EdgeColor',[0.07843 0.1686 0.549],...
    'DisplayName','tensiuni lonjeron');

% Create xlabel
xlabel('Cazuri de solicitare ale palei de elicopter');

% Create ylabel
ylabel('Tensiunea de compresiune [MPa]');

% Create title
title('Variatia tensiunilor de compresiune pe invelis si lonjeron in cele 4
cazuri de solicitare');
```

4.6.7. Rezultate pentru cazul simulării solicitării epruvetei la încovoierea în 4 puncte

După cum se observă în figura 4.46, deformația maximă s-a obținut la mijlocul lungimii epruvetei șă a avut o valoare de 17.205 mm la forța de rupere de F = 3949.4 N. Trebuie specificat că la realizarea simulării s-au utilizat datele extrase în urma experimentului real atât pentru forța de rupere cât și pentru proprietățile de material.

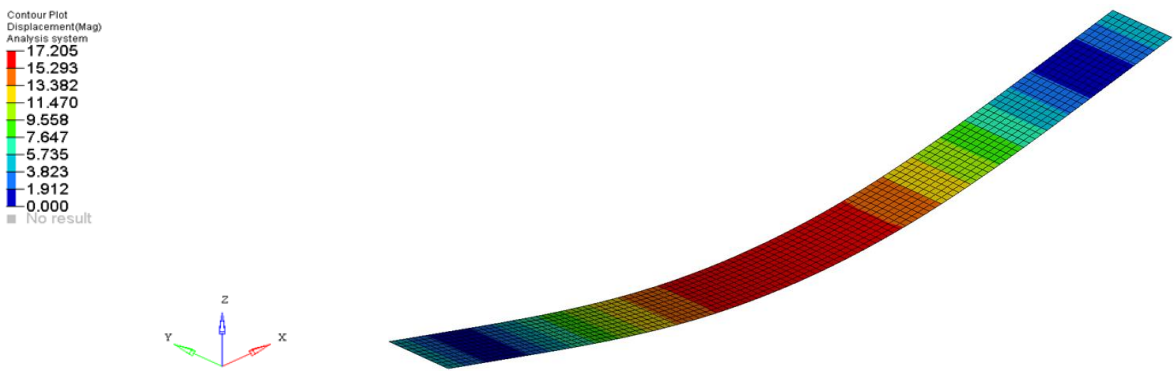


Fig. 4.46. Harta deformațiilor pentru epruveta din compozit stratificat.

Figura 4.47 ilustrează harta tensiunilor von Mises pentru epruveta solicitată. Se poate observa că tensiunile de încovoiere maxime apar în zona centrală a epruvetei (acolo unde sunt poziționate elementele de solicitare). S-a obținut o valoare de 528.733 MPa care este ușor mai ridicată decât valoarea tensiunii obținute pe cale experimentală

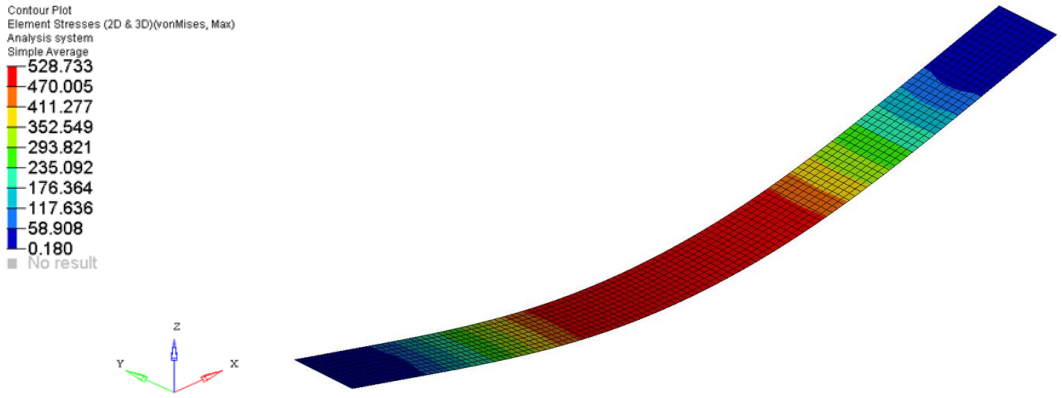


Fig. 4.47. Harta tensiunilor von Mises la nivel macroscopic.

Harta tensiunilor de la nivel interlaminar este prezentată grafic în figura 4.48. Și în acest caz tensiunile cu valoarea cea mai mare apar tot în partea de mijloc a epruvetei.

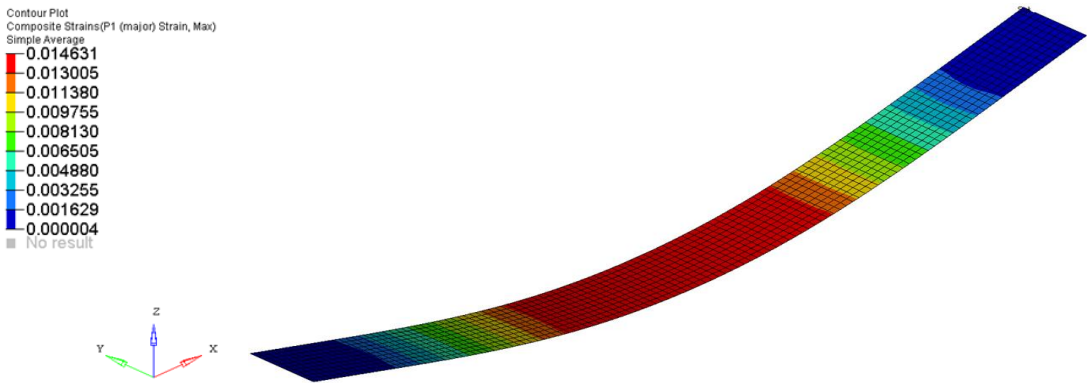


Fig. 4.48. Harta tensiunilor la nivel microscopic (interlaminar).

4.6.8. Analiză comparativă a valorilor parametrilor: simulare vs. experiment

În cazul analizei FEM a epruvetei din compozit stratificat bazat pe fibră de carbon s-au obținut o serie de rezultate numerice privind deformația și tensiunea la încovoiere (prezentate în figurile anterioare). În vederea corelării datelor obținute de la simulare cu cele furnizate în urma experimentelor, aceste rezultate, împreună cu datele obținute de la partea experimentală s-au centralizat în tabelul 4.5. Pe baza acestor valori s-a trasat graficul din figura 4.49 care reprezintă curba caracteristică tensiune – deformație pentru simulare și experiment. Pentru elaborarea graficului s-a creeat o secvență de cod MATLAB.

Tabel 4.5. Simulare vs experiment, rezultate numerice.

Nr. crt.	Deformație *mm*		Tensiunea la încovoiere *MPa*	
	Simulare	**Experiment**	**Simulare**	**Experiment**
1	0.00	0.00	0.280	0.120
2	1.912	1.91214	58.908	49.5233
3	3.823	3.82315	117.636	119.944
4	5.735	5.73532	176.364	195.441
5	7.647	7.647	235.092	272.85
6	9.558	9.55817	293.821	349.522
7	11.470	11.47001	352.549	424.864
8	13.382	12.2842	411.277	455.903
9	15.293	13.382	470.005	491.37
10	17.205	14.1323	528.733	514.834

Codul MATLAB utilizat pentru reprezentarea grafica:

```
function createaxes(Parent1, X1, Y1, X2, Y2)
%CREATEAXES(PARENT1,X1,Y1,X2,Y2)
%  PARENT1:  axes parent
%  X1:  vector of x data
%  Y1:  vector of y data
%  X2:  vector of x data
%  Y2:  vector of y data

% Create axes
axes1 = axes('Parent',Parent1,'YGrid','on','XGrid','on',...
    'Position',[0.13 0.11 0.775 0.7046]);
% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim([0 600]);
box('on');
hold('all');

% Create plot
plot(X1,Y1,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'Color',[1 0 0],...
    'DisplayName','rezultate simulare');

% Create plot
plot(X2,Y2,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'Color',[0 0 1],...
    'DisplayName','rezultate experimental');

% Create xlabel
xlabel('Deformatia, [mm]');

% Create ylabel
ylabel('Tensiunea de incovoiere, [MPa]');

% Create title
title('Reprezentarea comparativa a curbei deplasare - tensiune pentru cele
doua cazuri: simulare vs experiment');
```

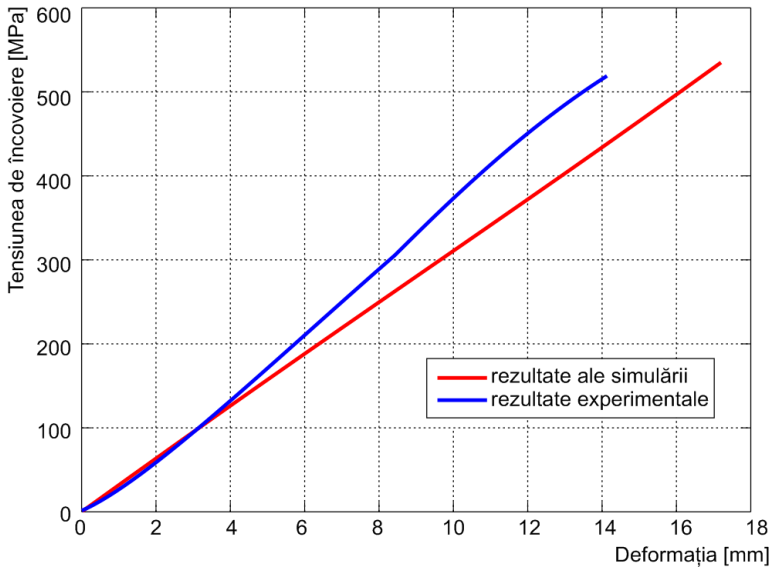


Fig. 4.49 Curba caracteristică deformație – tensiune: comparație simulare vs. experiment.

În cadrul acestui grafic cu culoare roșie s-a trasat curba caracteristică deformație – tensiune pentru cazul simulării iar cu albastru este trasată curba caracteristică deformație – tensiune pentru rezultatele obținute în urma testelor experimentale.

Utilizându-se funcțiile statistice predefinite din programul Microsoft Excel, s-a calculat coeficientul de corelație atât pentru rezultatele obținute în urma simulării dar și pentru datele furnizate de testele experimentale. Pentru partea de simulare s-a obținut un coeficient de corelație cu valoarea 1 iar pentru rezultatele experimentale coeficientul de corelație a avut valoarea de 0.999167. În concluzie, se poate observa un grad de corelare bun al rezultatelor obținute din testul experimental și modelul virtual.

4.7. CONCLUZII

4.7.1. Concluzii privind analiza FEM pentru regimul de zbor la punct fix

Regimul de zbor la punct fix numit şi zbor staţionar constă în planarea elicopterului la o distanţă mică de sol (fără viteză de înaintare).

În urma analizei cu elemente finite a palei proiectate s-au putut identifica o serie de concluzii referitoare atât la partea de modelare, cât şi a comportării structurii în condiţiile de solicitare impuse:

- Modelul geometric 3D proiectat prezintă avantajul că o astfel de pală are greutate ultrauşoară datorită introducerii spumei în locul nervurilor de susţinere existente în cazul palelor de la alte elicoptere cunoscute;

- În cazul regimului de zbor la punct fix se observă că, în zona bucşilor, pe lonjeron, apar deformaţii critice ce au valoarea maximă de 0,006 %;
- Valoarea deplasarii maxime a palei (226 mm) se poate considera ca fiind acceptabilă în condiţiile de solicitare (zbor staţionar) şi ţinând cont de dimensiunile geometrice ale palei;
- Tensiunea maximă obţinută pe lonjeron (78 N/mm2) relevă faptul că acesta prezintă o rigiditate mare;

De regulă, la palele elicopterelor învelişul preia în mare parte eforturile exercitate asupra structurii acestora. Şi în acest caz de solicitare apar tensiuni echivalente critice pe suprafaţa lateral interioară a învelişului în zona lonjeronului.

S-a efectuat o analiză statică structurală privind variaţia tensiunilor echivalente pe învelişul palei atunci când rotorul este oprit, singura încărcare a palei fiind propria greutate.

În urma analizei comparative pentru cele două cazuri de încărcare (regim de zbor la punct fix şi încărcarea greutăţii proprii) s-au identificat valori mai mari ale tensiunilor echivalente, pe înveliş pentru cazul primului regim de zbor. Tensiunile critice se dezvoltă de regulă în zona bucşilor. Pentru lonjeron, tensiunile echivalente mai mari apar pentru cazl încărcării proprii şi sunt localizate în zona de încastrare.

Ca o concluzie finală privind analiza statică structurală a palei se poate afirma că simulările în regim de zbor staţionar contribuie la îmbunătăţirea performanţelor atât a palelor cât şi a rotorului.

4.7.2. Concluzii privind analiza FEM în regimul de zbor cu înaintare

Aplicarea unui regim de zbor cu înaintare în cadrul analizei structurale cu FEM poate conduce la obţinerea unor rezultate deosebit de relevante pentru inginerii proiectanţi din domeniul aerospaţial.

După cum s-a observat în capitolul anterior, regimul de zbor cu înaintare implică două cazuri distincte de analiză:

- cazul palei avansante;
- cazul palei reculante.

Considerând datele de intrare identice cu cele ale unui caz real de zbor, s-au putut determina valori ale unghiurilor de incidenţă α diferite pentru cele două cazuri de încărcare. Acest lucru a condus la rezultate diferite ale tensiunilor von Mises pentru cazurile de solicitare studiate.

Studiind hărţile de tensiuni atât pe lonjeron cât şi la nivelul învelişului se pot identifica

valori semnificativ mai mari ale tensiunilor echivalente dezvoltate pe pala avansantă. Acest lucru este absolut normal pentru regimul de zbor studiat. S-a efectuat o analiză comparativă a valorilor tensiunilor la tracţiune şi compresiune pentru regimul de zbor cu înaintare, considerând cele două cazuri de solicitare care se produc în timpul încărcării. Atât pentru lonjeron cât şi în cazul învelişului s-au evidenţiat tensiuni relativ mai ridicate pentru cazul palei avansante, acestea apărând în apropierea zonei de încastrare.

Ca o concluzie finală se poate sublinia că rezultatele unei analize structurale sunt deosebit de valoroase, putând servi în cazul integrării unui sistem de monitorizare a sănătăţii structurii palei. Hărţile de tensiuni şi deformaţii obţinute pot ajuta la determinarea locaţiilor de plasare a senzorilor în cadrul structurii.

4.7.3. Concluzii privind analiza FEM a epruvetei din material compozit stratificat

Cercetarea teoretică s-a orientat pe lângă analiza structurală a palei de elicopter și pe analiza structurale ale unei epruvete din material compozit stratificat. În acest scop s-a utilizat metoda elementului finit, metodă extrem de des utilizată în ultima vreme pentru estimăriale nivelului de tensiune și deformație.

Analiza structurală cu metoda elementelor finite (MEF) s-a efectuat ţinând cont de proprietăţile mecanice ale materialelor determinate din încercările mecanice. Apropierea cantitativă şi calitativă de realitate a soluţiei oferite de metoda elementelor finite depinde în mare măsură de tipul elementului finit utilizat în analize, de tipul de material utilizat în analiză, de metodologia de modelare pentru atingerea unei convergenţe legate de soluţia finală, de modalitatea de aplicare a condiţiilor de fixare, etc.

Compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale au scos în evidență un grad bun de corelare a acestora, acest lucru putându-se observa din graficul comparativ 4.49, prezentat spre finalul capitolului 4.

Studiul MEF s-a bazat pe metodologia modernă de simulare a materialelor compozite ținând cont de proprietățile structurale ale fiecărui strat. Pe baza acestui tip de modelare, există posibilitatea să se poată obține informații de tip deplasare, tensiune, deformație în orice strat al compozitului stratificat, precum și la interfața dintre straturi. Valoarea maximă a tensiunii von Mises (528,733 MPa) se observă în zona de centru a epruvetei (acolo unde este aplicată sarcina de solicitare) și unde apare o zonă de concentratori de tensiune.

CAPITOLUL 5

CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE

5.1. INTRODUCERE

În domeniul ingineriei mecanice, există o strânsă legătură între efectuarea unor încercări mecanice experimentale și detectarea defectelor survenite în cadrul materialelor în timpul funcționării. După cum s-a prezentat în Capitolul 2, la ora actuală se cunosc o serie de metode și tehnici de detectare a defectelor dintre care cea mai cunoscută este tensometria electrorezistivă.

Pentru a determina răspunsul sistemului de detectare a defectelor, în diferite condiții de solicitare, s-au efectuat o serie de teste experimentale utilizând trei tehnici diferite de detectare a defectelor: tensometria electrorezistivă, metoda acustică și termografia IR.

În acest scop, s-au efectuat două tipuri de încercări mecanice:

- încercarea la încovoiere în 4 puncte:
- încercarea la tracțiune compusă.

Pentru ambele teste s-au utilizat epruvete din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon. Acesta fiind un material ușor și rezistent este deseori utilizat în construcțiile structurilor aerospațiale dar și la unele componente de autovehicole.

În acest capitol sunt prezentate detaliile de proiectare a experimentului cum ar fi: alegerea structurii, selectarea metodei experimentale, descrierea instalației experimentale, modul de obținere a datelor experimentale. În finalul capitolului sunt prezentate și interpretate rezultatele precum și o serie de concluzii identificate în timpul și după terminarea experimentului.

5.2. PROIECTAREA EXPERIMENTULUI

5.2.1. Alegerea structurii

Pentru realizarea epruvetelor s-au elaborat plăci de stratificate armate cu fibre de carbon şi răşină epoxi. De asemenea, s-au realizat şi taloanele necesare pentru încercarea la tracțiune. Plăcile stratificate din care au fost prelevate epruvetele au fost fabricate după o metodologie consacrată, [Roşu, 2010], [Mitu, 2013]. Epruvetele au fost executate cu 3 straturi pentru încercarea la tracțiune și 10 straturi pentru încovoierea în 4 puncte.

Configuraţia orientării fibrelor în cadrul fiecărui strat (lamelă) este prezentată în figura 5.1.

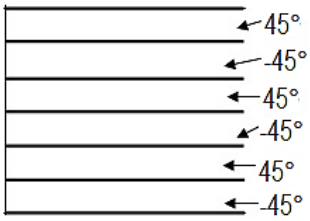


Fig. 5.1. Configuraţia lamelelor stratificatului compozit, după [Mitu, 2013].

Ca și tehnologie de fabricație, s-au realizat plăci de stratificate cu 3 şi 10 straturi din care au fost debitate epruvetele pentru încercare. Procesul de elaborare are următoarele etape de lucru [Mitu, 2013]:

- impregnarea cu răşină epoxidică straturi din ţesătură din fibre de carbon unidirecţionale şi cu legătură tip diagonală (ţesătura cu legătura tip diagonală are o greutate specifică de $0.3 g/m^2$);
- impregnarea cu răşină epoxidică a straturilor de ţesătură;
- acoperirea lamelelor preimpregnate obţinute cu folii de protecţie şi menţinute la o temperatură scăzută până la realizarea stratificatului;
- execuţia finală a plăcilor de stratificat s-a realizat printr-un proces controlat de polimerizare: presiune şi temperatură.

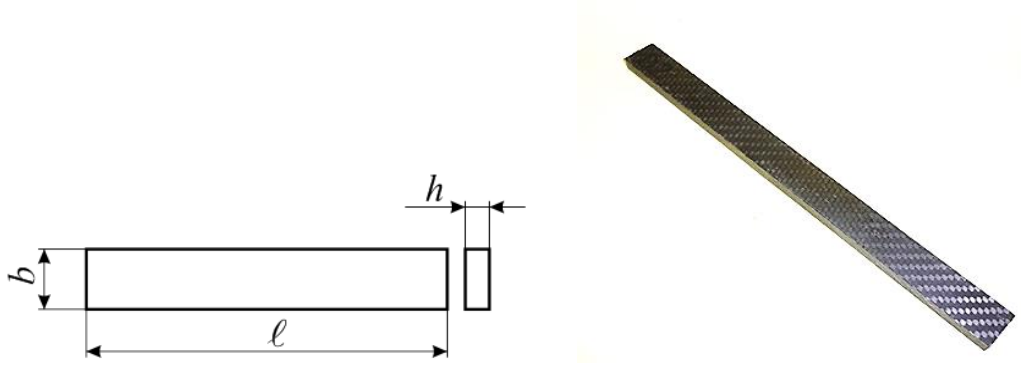
Epruvetele pentru încercarile mecanice la tracțiune şi încovoiere au fost debitate cu ajutorul unui dispozitiv de tăiere Proxxon 27070 (D), cu dimensiunea pânzei diamantate de 80 mm, lăţimea de 2 mm la formele şi dimensunile corespunzătoare fiecărui tip de solicitare.

Epruvetele pentru încercarea mecanică statică la încovoiere în 4 puncte au fost executate la dimensiunile prezentate în tabelul 5.1. Forma epruvetelor este ilustrată schematic în figura 5.2.

Tabel 5.1. Dimensiunile epruvetelor testate la încovoierea în 4 puncte.

	Indicativ epruvetă	**Lungime epruvetă** *l* *mm*	**Distanţa între reazeme** *L* *mm*	**Lăţime** *b* *mm*	**Grosime** *h* *mm*	**Greutate** *g* *g*
Compozite unidirecţionale (0°) şi multidirecţionale (sistemele cu fibre de carbon)	D1	248,62	207,66	20,29	8,79	63,47
	D2	248,92	207,66	20,32	8,51	63,57

Pentru încercarea la tracțiune s-a utilizat același tip de material compozit stratificat armat cu răşină epoxidică şi fibră de carbon fibră de carbon. Dimensiunile principale ale epruvetei sunt prezentate în tabelul 5.2. În figura 5.3 este prezentată epruveta testată la tracțiune.



a) b)

Fig. 5.2. Epruveta D1 utilizată la încercarea la încovoiere în 4 puncte: a) schița cu dimensiunile de gabarit; b) epruveta utilizată la primul test

Tabel 5.2. Principalele dimensiuni de gabarit ale epruvetei.

Lungimea epruvetei *mm*	**Lățimea epruvetei** *mm*	**Grosimea epruvetei** *mm*
250	9,96	2,97

Fig. 5.3. Epruvetă din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon pentru încercarea la tracțiune.

5.2.2. Alegerea metodei experimentale

După cum s-a precizat în partea de introducere, s-a optat pentru două tipuri de încercări mecanice:

- încercarea la încovoiere în 4 puncte;
- încercarea la tracțiune.

Ca metode experimentale de detectare a defectelor s-au ales următoarele trei:

- tensometria electrorezistivă (tracțiune și încovoiere);
- metoda acustică (doar la încovoiere);
- termografia IR (tracțiune și încovoiere).

5.2.2.1. Ipoteze în încercarea experimentală la încovoiere

Conform [Deutsch, 1979], o grindă dreaptă este solicitată la încovoiere dacă în secțiunea transversală a acesteia se dezvoltă momente încovoietoare.

Încercarea la încovoiere în regim static oferă informații asupra comportamentului unui material supus unei sarcini extreme aplicate perpendicular pe axa longitudinală a acestuia.

Metoda de încercare la încovoiere este caracterizată prin următoarele ipoteze:

- *Viteza de încercare v* [mm/min] care se referă la viteza mișcării relative dintre reazeme și elementele de încărcare ale mașinii de încercare;
- *Efortul de încovoiere* σ_f [MPa] care reprezintă efortul nominal pe suprafața epruvetei aplicat în două puncte situate simetric față de punctul de mijloc al distanței dintre reazeme;
- *Rezistența la încovoiere* σ_{fM} [MPa] care este definită ca efortul de încovoiere pe care îl suportă epruveta la încărcarea maximă;
- *Săgeata s* [mm] – distanța pe care se deplasează un punct situat pe suprafața superioară a epruvetei față de poziția sa inițială;
- *Săgeata corespunzătoare rezistenței la încovoiere* s_M [mm] este deformația corespunzătoare forței maxime de încovoiere înregistrată în timpul încercării;
- *Deformarea la încovoiere* ε_f [%] care reprezintă variația dimensională a unui element de lungime aflat pe suprafața exterioară a epruvetei la mijlocul distanței dintre reazeme;
- *Modulul de elasticitate la încovoiere* E_f [MPa].

În figura 5.4 este prezentată curba tipică efort – deformație în cazul încercării la încovoiere statică.

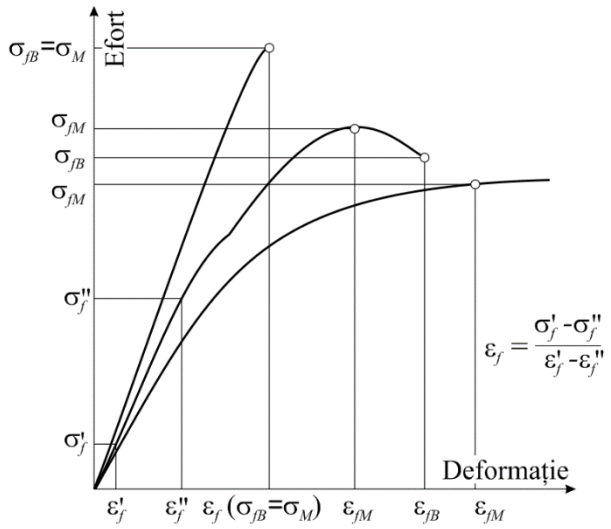


Fig. 5.4. Curba tipică efort – deformație la încercarea de încovoiere, adaptat după [Deutsch, 1979].

5.2.2.2. Ipoteze privind încercarea experimentală la tracțiune

Încercarea la tracţiune se execută aplicând unei epruvete o forţă axială crescătoare, de regulă până la ruperea ei, înregistrând variaţiile corespunzatoare pentru lungimea epruvetei. Determinările se efectuează pe baza următoarelor norme de referinţă:

- ASTM-D618-13 care se referă la procedura de determinare a caracteristicilor la tracţiune ale compozitelor cu matricea polimerică armată cu fibre continue si discontinue; normative şi standarde pentru determinarea caracteristicilor de tracţiune ale compozitelor cu matrice din mase plastice armate cu fibre;
- ASTM E4-14 pentru verificarea sarcinii la maşinile de încercat;
- ASTM E83-10a pentru verificarea şi calibrarea extensoarelor.

Metoda de încercare la tracţiune este caracterizată prin următoarele ipoteze [Deutsch, 1979]:

- *Alungirea* sau *alungirea specifică*, ε, reprezintă raportul dintre deformaţia liniară şi lungimea iniţială a epruvetei;
- *Limita de curgere* (σ_c) se consideră tensiunea minimă la care, sarcina rămânând constantă, alungirea continuă să crească. Aceasta se exprimă prin raportul dintre sarcina minimă corespunzătoare şi secţiunea iniţială a epruvetei;
- *Rezistenţa la rupere la tracţiune* σ_r este dată de raportul dintre forţa maximă de rupere F_{max} şi aria secţiunii transversale iniţiale a epruvetei;
- *Modulul de elasticitate longitudinal E*, în general, reprezintă raportul dintre tensiunea normală şi deformaţia specifică, în condiţiile în care tensiunea nu depăşeşte limita de proporţionalitate.

Pentru a defini comportarea materialului compozit trebuie trasată curba caracteristică a materialului (figura 5.5), care exprimă legătura între tensiunea σ şi deformaţia specifică ε. În cursul încercării se înregistrează curba forţă - alungirea epruvetă (F - ΔL). În general, curba caracteristică prezintă o porţiune liniară OA, în care lungirea epruvetei este proporţională cu forţa aplicată. Tensiunea corespunzătoare punctului A se numeşte limită de proporţionalitate.

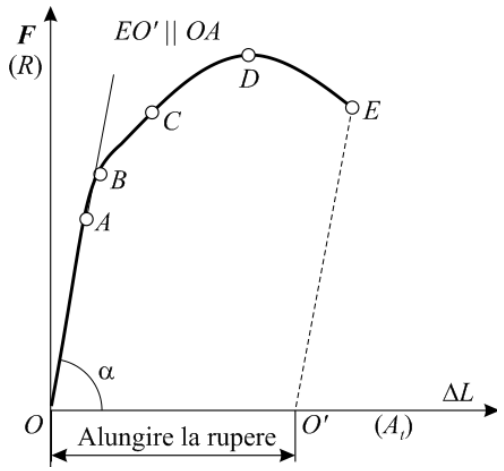


Fig. 5.5. Curba caracteristică la tracţiune a unui material compozit, [Deutsch, 1979],

În zona *OB*, îndepărtarea sarcinii face ca epruveta să îşi recapete lungimea iniţială după îndepărtarea sarcinii. Lungirea epruvetei pe această zonă este elastică, de aceea tensiunea corespunzătoare punctului *B* poartă numele de limită de elasticitate. După depăşirea acestei limite, materialul începe să capete deformaţii remanente (plastice).

Punctul *D* al curbei caracteristice corespunde forţei maxime din timpul încercării F_{max}. Ruperea epruvetei se produce în punctul *E* la un efort mai mic, lucru datorat modului neconvenţional de a se construi diagrama. Tensiunea în epruvetă este raportată întotdeauna la secţiunea ei iniţială şi nu la cea din momentul ruperii.

În timpul măsurătorilor de regulă pot apărea o serie de erori, denumite și erori de măsură. Conform [Zaharia, 2014], eroarea de măsură reprezintă diferenţa între semnalul de ieşire măsurat *s* și valoarea exactă a măsurii *m*. Datorită faptului că valoarea *m* este necunoscuta, eroarea de măsură a acesteia poate fi doar estimata.

În ceea ce priveşte senzorul sau traductorul utilizat, se pot identifica două tipuri de erori:

- erori sistematice;
- erori accidentale.

Erorile sistematice sunt acelea care introduc un decalaj constant între valoarea reală și valoarea măsurată. Acestea rezulta dintr-o utilizare improprie a materialului de achiziţie și pot fi reduse printr-o cunoaştere exactă și o utilizare riguroasa a traductorilor utilizaţi.

Erorile sistematice pot fi [Zaharia, 2014]:

- erori ale valorii unei mărimi de referinţă, datorate utilizării senzorului în condiţii de mediu (temperatura, umiditate,…) neconforme celor prevăzute în specificaţiile aparatului;
- erori ale caracteristicilor traductorului. Acest tip de eroare se poate reduce prin efectuarea unei recalibrări regulate a traductorului;
- erori datorate modului de utilizare a traductorului, cum ar fi nerespectarea timpului de răspuns al acestuia.

Erorile accidentale sunt erorile aleatorii care pot interveni brusc, pe o durată nedeterminată. Cauzele acre pot genera acest tip de erori se referă la:

- mărimile fizice de influenţă și variaţia acestora în timpul funcţionării traductorului;
- poziţionarea defectuoasă a poziţiei traductorului sau schimbarea poziţiei acestuia în timpul încercării;
- zgomote de fond, interferenţe parazite.

5.2.3. Descrierea instalației experimentale

5.2.3.1. Încercarea la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici

Testarea epruvetei la încovoierea în 4 puncte s-a realizat pe o mașină de încercare tip **ZWICK/ROELL Z 300** (fig. 5.6)**.** Principalele detalii tehnice sunt:

- Forța maximă de lucru: 300 kN;
- Înălțimea spațiului de lucru: 1800 mm;
- Lățimea spațiului de lucru: 630 mm;
- Viteza maximă de avans: 250 mm/min.

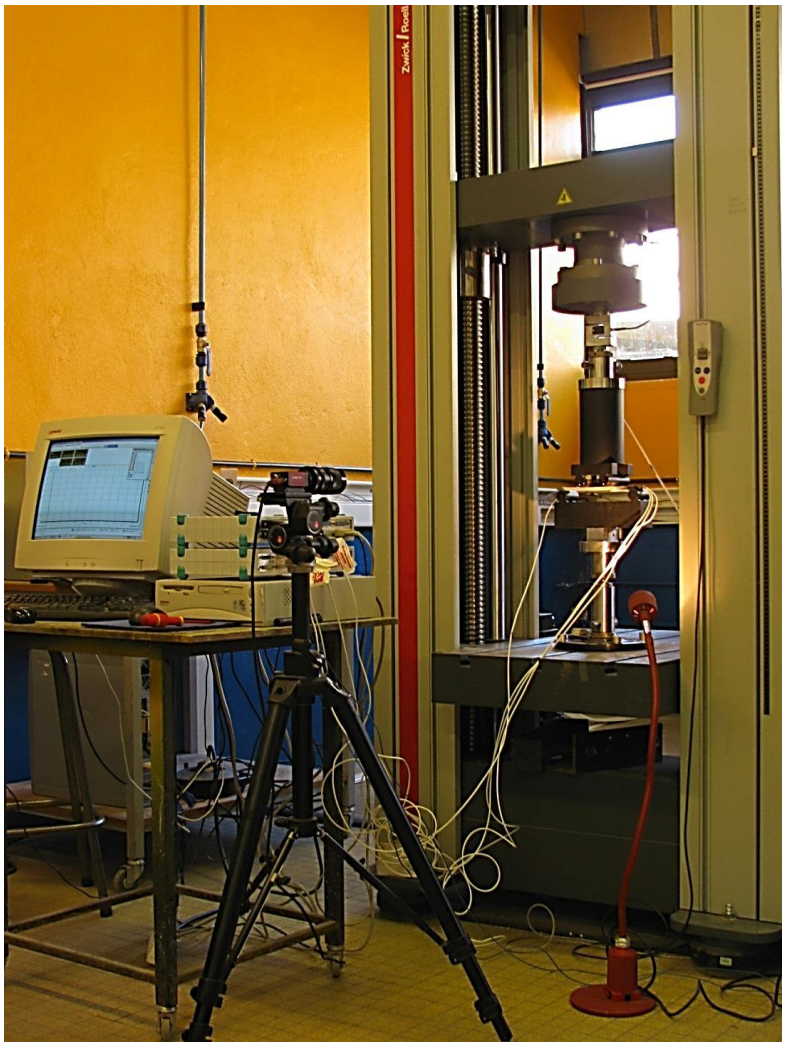


Fig. 5.6. Stand de testare la încovoiere în 4 puncte a epruvetei din compozit armat cu fibră de carbon.

Achiziția datelor de la traductorii tensometrici s-a realizat prin intermediul sistemului de achiziție tip SPIDER 8 prezentat în figura 5.7. Acesta este un sistem electronic complex cu frecvenţă purtătoare de achiziţie şi prelucrare măsurători, având 8 intări-canale active.

Fig. 5.7. Placa de achiziție SPIDER 8.

Sistemul de achiziție funcţionează cu traductori inductivi sau rezistivi (sau alte tipuri) şi permite înregistrarea şi prelucrarea diferitelor mărimi de natură mecanică ca: forţă, deplasare, deformaţii specifice, temperatură, presiune. Prin echiparea cu traductori adecvaţi poate îndeplini şi alte sarcini.

Pachetul software Spider 8 Control *sau Catman 3.0 Express-HBM* este prevăzut cu o interfaţă virtuală utilizată în achiziţia, editarea şi prelucrarea măsurătorilor.

Cele mai importante caracteristici tehnice sunt următoarele [SPIDER 8]:

- Tensiunea de alimentare de 12 V;
- Convertor analog/digital separat pentru fiecare canal;
- Viteza de esantionare până la 9600 valori/s pe canal;
- Filtre analogice anti – aliasing, filtre programabile digital;
- 12 traductori electrici diferiți care pot fi conectați la fiecare canal.
- frecvenţă purtătoare de 4.8 kHz
- traductori inductivi şi rezistivi
- rata de măsurare între 1/s şi 9600/s
- măsurători simultane pe toate canalele
- interfeţe de calculator: Spider 8 Control, Catman 3.0 Expres.

5.2.3.2. Încercarea la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acustici

În scopul testării la încovoiere în 4 puncte a celei de a doua epruvete (D2) s-a utilizat maşina de încercare la încovoiere tip ZWICK ROELL Z 300 ale cărei detalii tehnice sunt prezentate anterior.

De asemenea, pentru determinarea deplasărilor din material pe durata încercării s-a utilizat metoda tensometriei electrorezistive prezentată anterior.

Pentru detectarea microfisurilor și a delaminărilor care pot apărea în materialul epruvetei pe durata testării s-a utilizat un sistem de detectare a microfisurilor bazat pe emisia acustică furnizat de compania MISTRAS Holding (Fig. 5.8).

Fig. 5.8. Sistem de detectare a microfisurilor bazat pe metoda emisiei acustice.

În vederea captării semnalelor provenite de la epruvetă s-au utilizat 3 senzori acustici de tip NANO 3 furnizați de către Compania MISTRAS Holding. Dintre caracteristicile tehnice mai importante ale senzorilor se pot preciza [MISTRAS 2010]:

- Amplitudinea maximă – 70.15 dB;
- Senzitivitatea de referință – 1 V/ubar;
- Frecvența maximă – 230.47 kHz;
- Frecvența de lucru: 0.7 – 0.8 MHz.

Placa de achiziție utilizată pentru detectarea emisiei acustice, tip PCI - 2 a fost furnizată tot de Compania MISTRAS Holding și prevede următoarele detalii tehnice [MISTRAS 2007]:

- Rezoluție – 18 Bits A/D;
- Frecvența de lucru: 3 kHz – 3 MHz;
- Puterea de alimentare: 12 Watt;
- Tensiunea de alimentare: +12 V, 1 Amp; -12 V, 0.05 Amp; +5 V, 1.5 Amp;
- Temperatura de lucru: 5 – 45 °C;
- Impedanța de lucru: 50 Ω sau 1000 Ω;
- Puterea de preamplificare: selectabilă între 0 – 28 V DC;
- Filtre: 4 filtre trece sus selectabile de 1 kHz, 20 kHz, 100 kHz, 200 kHz (al patrulea este de tip Butterworth); 6 filtre trece jos – selectabile de 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 3 MHz (al șaselea este de tip Butterworth);
- Pragul de zgomot minim: 17 dB fără senzor de emisie acustică și 22 dB cu senzor AE tip R15 și 2/4/6 preamplificatoare;

- Amplitudinea maximă a semnalului: 100 dB;
- Viteza de eșantionare: selectabilă din computer de 100 kS/s, 200 kS/s, 500 kS/s, 1 M – Sample/s, 2 MSPS, 5 MSPS, 10 MSPS, 20 MSPS, 40 MSPS;
- 8 intrări digitale;
- 8 ieșiri digitale.

5.2.3.3. Încercarea la tracțiune

Pentru efectuarea încercării la tracțiune a epruvetei din fibră de carbon s-a utilizat mașina de încercare la tracțiune – compresiume tip ZWICK/ROELL Z010 (Fig. 5.9). Aceasta are următoarele caracteristici tehnice principale:

- Forța maximă de 10 kN;
- Înălțimea ariei de testare de 1041 mm;
- Lățimea ariei de testare de 420 mm;
- Viteza de avans – 0.1 mm/min maxim și 0.001 mm/min minim.

Fig. 5.9. Maşina de încercări la tracțiune/compresiune tip ZWICK/ROELL Z010.

Traductorii tensometrici au fost aplicați pe suprafața epruvetei utilizând același procedeu ca și în cazul încercărilor anterioare. Montajul experimental este prezentat în figura 5.10.

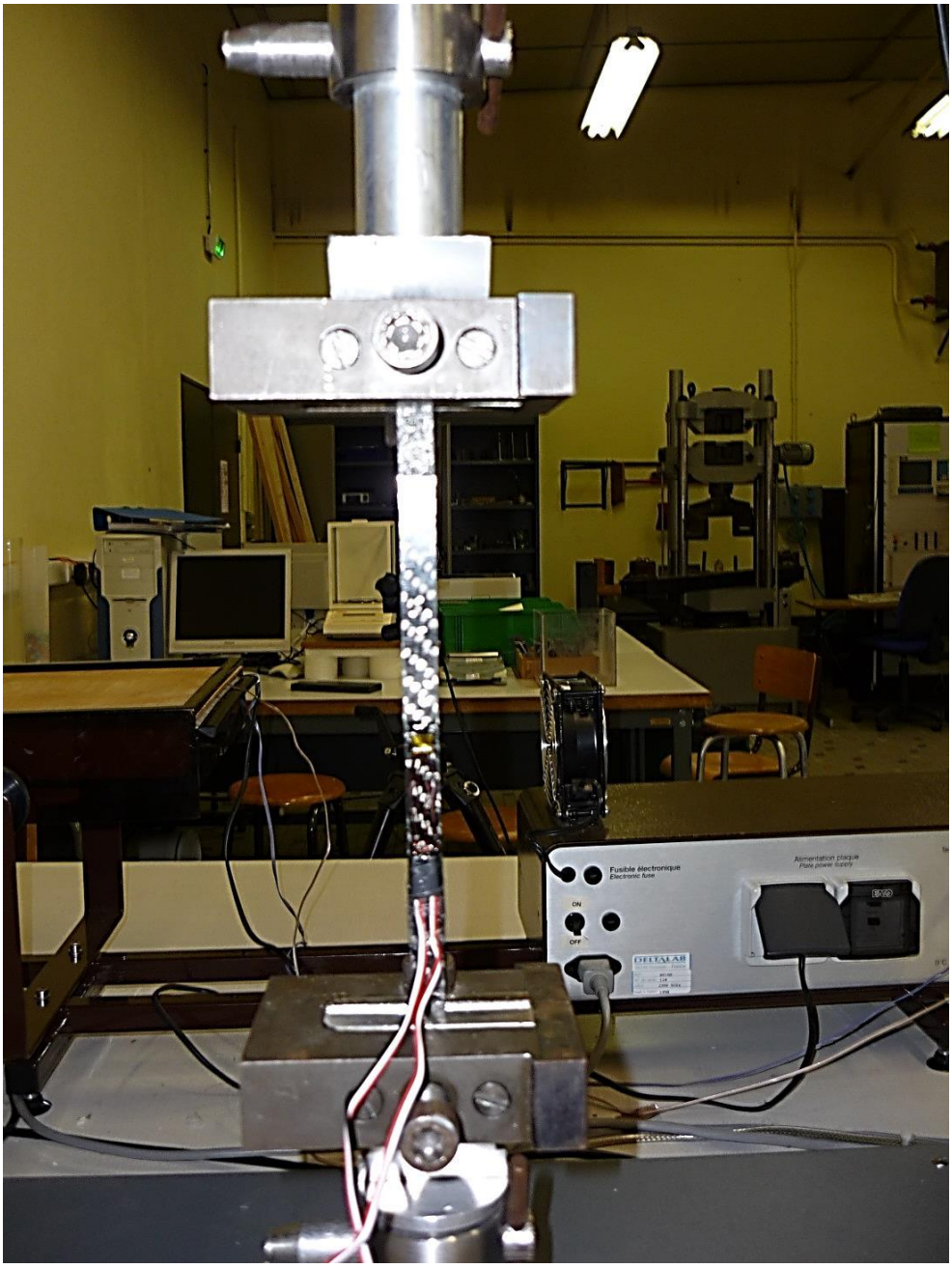


Fig. 5.10. Montaj experimental pentru încercarea la tracțiune a epruvetei din fibră de carbon.

Pentru detectarea deplasărilor din material în timpul încercării la tracțiune s-au aplicat pe suprafața epruvetei 2 traductori tensometrici, astfel:

- un traductor transversal cu rezistența de 120 ± 0.6 Ω și factor de calibrare de 1.950 ± 0.5 %;
- un traductor longitudinal cu rezistența de 120 ± 0.6 Ω și factor de calibrare de 2.010 ± 0.5.

5.2.3.4. Încercarea la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea termografiei în infraroșu

Pentru acest experiment s-a optat pentru o cameră termografică de ultimă generație tip FLIR SC 7000 (Fig. 5.11). Alţi parametrii importanţi luaţi în considerare în alegerea camerei au fost rezoluția şi sensibilitatea detectorului infraroşu. Camera este dotata cu un detector InSb 320x256 pixeli ce oferă o sensibilitate satisfăcătoare. Frecvența imaginilor şi timpul de integrare sunt programabile.

- Domeniul de operare în infraroşu: 1,50 μm – 5,10 μm;
- Numărul de pixeli: 320x256;
- Intervalul de temperatură optim de operare: -20^{o}C ... +55^{o}C;
- Frecvența de înregistrare a imaginilor: 170Hz – 380 Hz la calitate maximă;
- Soft de analiză şi control al camerei: ALTAIR.

Fig. 5.11. Camera de termografie în infraroşu – SC FLIR 7000.

a) b)

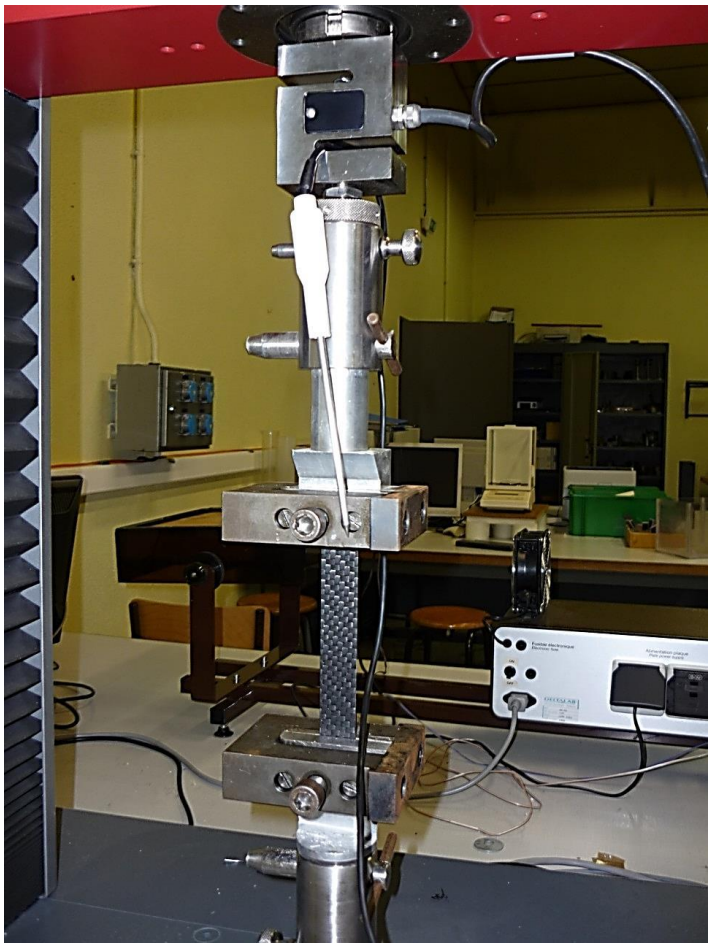
Fig. 5.12. Detalii camera de termografie în infraroșu: față (a), spate (b).

Camera termografică a fost conectată la un computer unde s-a realizat stocarea și analiza imaginilor captate. Conectarea cu computerul a fost efectuată prin cablajele existente în partea din spate a camerei (Fig. 5.12).

În figura 5.13 este prezentat montajul experimental pentru încercarea la încovoiere. Pentru a se capta imaginii cât mai clare ale variației de temperatură pe suprafața epruvetei în spatele dispozitivului de prindere s-a așezat o placă de culoare neagră (culoarea neagră are emisivitatea egală cu 1).

5.13. Montaj experimental – detectarea defectelor la încovoierea în 4 puncte prin termografia în infraroșu.

Figura 5.14 ilustrează montajul experimental utilizat penttru încercarea la tracțiune. De menționat este că la ambele experimente unde s-a utilizat camera termografică, a fost montat un termometru digital în apropierea epruvetei pentru a se citi temperatura mediului la începutul experimentului.



5.14. Montaj experimental pentru detectarea defectelor la tracțiune prin termografia în infraroşu.

5.2.4. Condiții de mediu

Încercările experimentale la tracțiune și încovoiere (exceptând cele unde s-a utilizat camera termografică) s-au realizat în condiții de laborator cu temperatura de 18,6 °C cu luminozitate normală (naturală + iluminat artificial).

Testele mecanice care au necesitat utilizarea camerei termografice IR s-au realizat în condiții de luminozitate foarte redusă pentru a nu afecta calitatea hărților termice. Temperatura din laborator a fost de 18.3 °C iar umiditatea aerului de 24%.

5.3. OBȚINEREA DATELOR EXPERIMENTALE

5.3.1. Încercarea la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici

În scopul detectării deformațiilor (deplasărilor) care se produc în timpul procedeului de încercare la încovoiere în 4 puncte a epruvetei D1 s-a aplicat metoda tensometriei electrorezistive.

Tensometria electro-rezistivă este una din cele mai utilizate tehnici experimentale, utilizată atât pentru determinarea caracteristicilor elastice ale materialelor compozite, dar şi pentru studiul comportării acestora sub acţiunea diferitelor solicitări exterioare.

Pentru determinarea deplasărilor s-au aplicat 4 mărci tensometrice pe suprafața epruvetei de următoarele tipuri:

- 2 buc tip N11 – FA – 8 – 350 – 11 cu rezistența 350.0 ± 0.3 Ω și factor de calibrare de 2.17 ± 1 % - acestea s-au aplicat pe lățimea epruvetei (Fig. 5.15, a);
- 2 buc tip N11 – MA – 5 – 120 – 11 cu rezistența de 120.0 Ω și factor de calibrare de 2.09 ± 1 % - acestea au fost aplicate pe grosime (Fig. 5.15, b).

Mărcile tensometrice utilizate au fost achiziționate de la firma SHOWA Measuring Instruments Co. Ltd.

a) b)

Fig. 5.15 Mărci tensometrice utilizate pentru determinarea deplasărilor în cazul încercării epruvetei la încovoierea în 4 puncte: tip N11 – FA – 8 – 350 – 11 (a); tip N11 – MA – 5 – 120 – 11 (b).

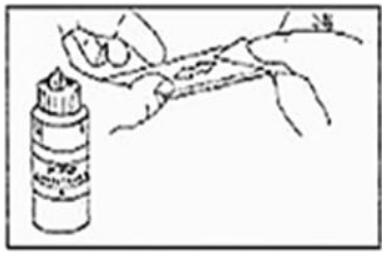
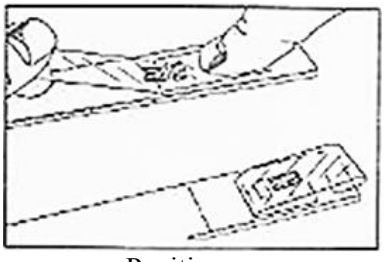
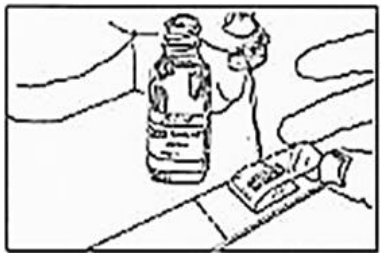
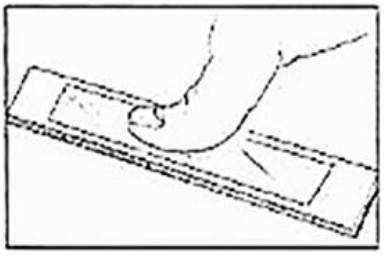
Aplicarea mărcilor tensometrice s-a realizat prin procedeul de lipire cu ajutorul instalației speciale de lipit M – Bond 200.

În cadrul procedeului de aplicare a mărcilor tensometrice pe suprafața epruvetei s-au urmărit o serie de etape ca (Tabel 5.3):

- degresarea epruvetei în zona de aplicare a senzorului cu ajutorul unui solvent și a unui neutralizator;
- curățarea zonei de aplicare a mărcii tensometrice cu hârtie abrazivă de două tipuri (mai dură și mai fină); Se îndepărtează foarte bine lichidul rămas pe suprafața epruvetei;
- marcarea locului unde se va aplica marca tensometrică (se evită atingerea cu mâna a epruvetei în locul unde se va aplica traductorul);
- aplicarea mărcii tensometrice se face cu ajutorul unei soluții speciale de lipit (pentru a grăbi procesul de lipire se adaugă și un catalizator);
- aplicarea circuitului (terminalelor) prin intermediul aceluiași procedeu. S-a utilizat conexiunea cu trei fire;
- lipirea firelor de la marca tensometrică în punctele terminalelor;
- aplicarea conectorilor (prin lipire) utilizând același procedeu. S-au selectat conectori potriviti pentru ca atașarea acestora la placa de achiziție să fie posibilă.

Etapele de aplicare a mărcilor tensometrice pe suprafața epruvetei sunt ilustrate destul de sugestiv în imaginile din tabelul 5.3.

Tabel 5.3. Etapele aplicării mărcilor tensometrice pe suprafața epruvetei, adaptat după [Zaharia, 2014].

Degresarea suprafeței probei	 Curățire suprafață	Neutralizare suprafață
 Poziționare	  Lipire	

În scopul verificării corectitudinii aplicării și lipirii mărcilor tensometrice s-a analizat vizual zona de lipire la microscop. Astfel în figura 5.16 se poate observa detaliat marca tensometrică aplicată pe suprafața epruvetei (pe lățime).

În același mod s-au achiziționat o serie de imagini (fig. 5.17) cu ajutorul microscopului pentru a se putea observa în detaliu aplicarea corectă a traductorilor tensometrici pe grosimea epruvetei.

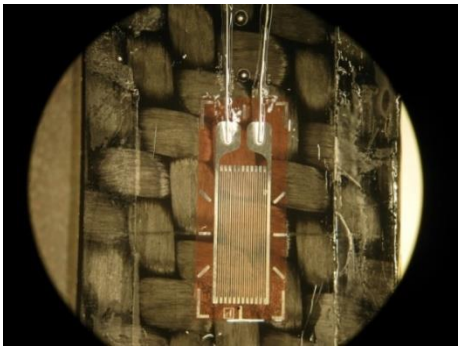


Fig. 5.16. Vizualizare cu ajutorul microscopului a mărcii tensometrice aplicate pe lățimea epruvetei.

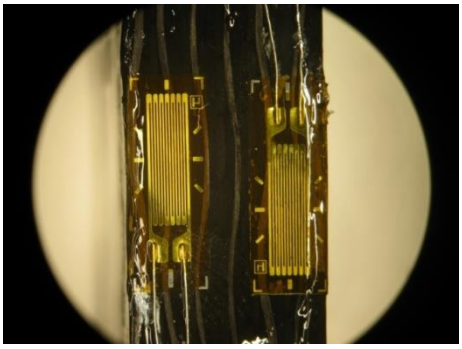


Fig. 5.17. Vizualizare mărci tensometrice aplicate pe grosimea epruvetei.

După lipirea firelor conectorilor pentru fiecare traductor tensometric în parte s-a procedat la verificarea funcționării mărcilor tensometrice și a cablajelor aferente prin intermediul unui ohmetru (pentru verificarea rezistenței electrice a acestora). Pentru achiziționarea semnalelor de la traductori s-a utilizat placa de achiziție SPIDER 8 prezentată anterior. S-au verificat atât valorile rezistențelor emise de firele traductorilor cât și cele ale conectorilor pentru a se asigura că rezultatele vor fi corecte. După efectuarea detaliată a verificării, epruveta pentru testare s-a montat în dispozitivul de încercare la încovoiere în 4 puncte așa cum este ilustrat în figura 5.18.

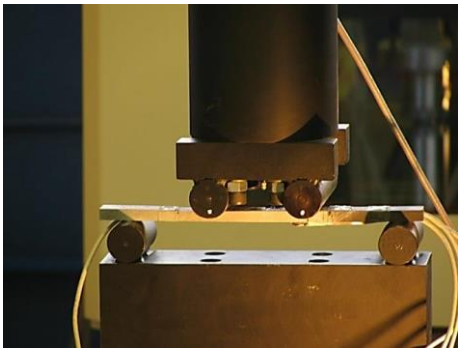


Fig. 5.18. Montaj experimental pentru încercarea la încovoiere în 4 puncte.

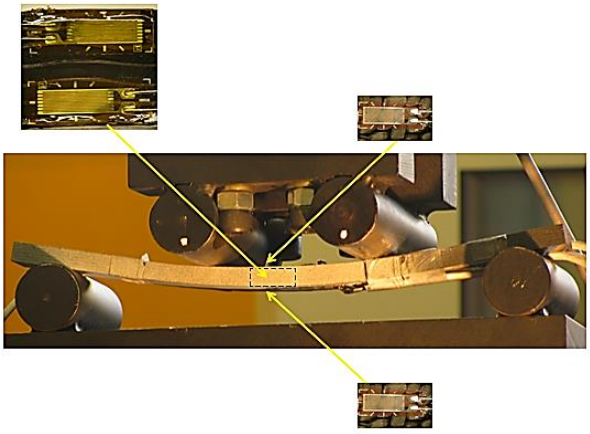


Fig. 5.19. Detaliu cu modul de poziționare al senzorilor pe suprafața epruvetei în timpul încercării la încovoiere.

Modul de poziționare a traductorilor tensometrici pe suprafața fibrei în timpul procedeului de încercare mecanică este ilustrat în figura 5.19.

În momentul când toate verificările au fost efectuate s-a procedat la începerea testului. S-a selectat viteza de lucru a mașinii și s-a procedat la începerea testării. Astfel, în figura 5.20 este prezentată etapa intermediară de încărcare a epruvetei (înainte ca încărcarea să ajungă la forța maximă).

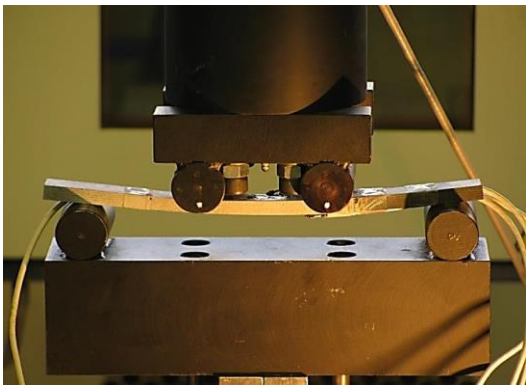


Fig. 5.20. Încercarea la încovoiere în 4 puncte – etapa intermediară.

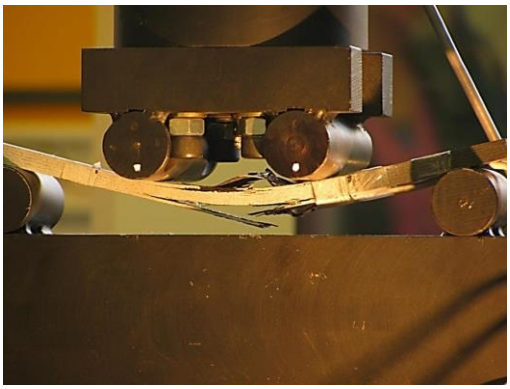


Fig. 5.21. Încercarea la încovoiere în 4 puncte – etapa finală de rupere a epruvetei.

Ruperea totală a epruvetei este ilustrată în figura 5.21. Se poate observa distrugerea fibrelor atât în partea superioară cât și la suprafața inferioară a epruvetei testate.

După efectuarea testării, epruveta s-a vizualizat din nou la microscop pentru a se controla modul de distrugere a fibrelor și a traductorilor tensometrici. Acest lucru se poate observa în figura 5.22.

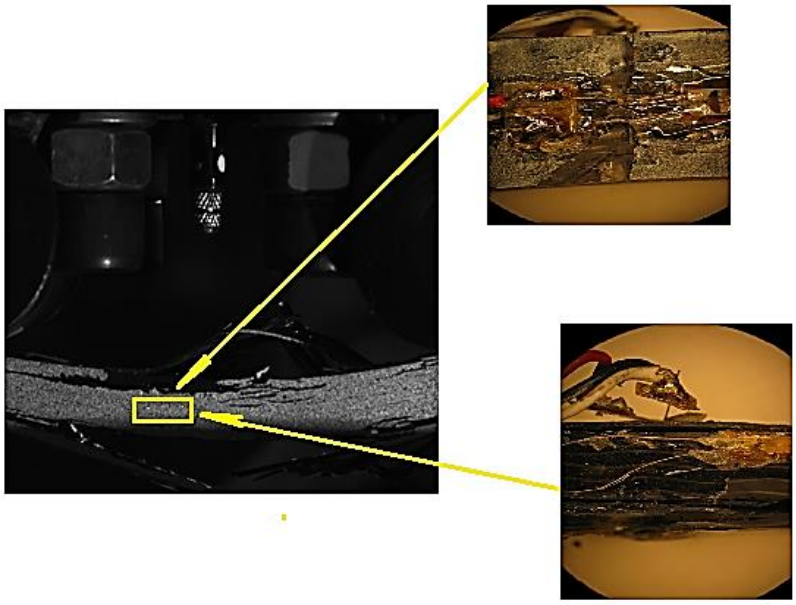


Fig. 5.22. Modul de distrugere a senzorilor aplicați pe suprafața epruvetei.

5.3.2. Achiziționarea datelor experimentale în urma încercării de încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici

La prima încercare experimentală, achiziționarea rezultatelor s-a efectuat prin intermediul computerelor conectate la mașina de încercare și la placa de achiziție utilizată, sub forma unor fișiere text. Acestea au fost apoi convertite în format .xls pentru a putea fi introduse în programul GRAPHER şi construite graficele aferente. Fișierele text achiziționate conțin o serie de informații cu privire la forța aplicată (F, în N), săgeata sau deformația în zona centrală a epruvetei (v, în mm), valorile tensiunilor σ, în MPa și deformațiilor dezvoltate ca urmare a solicitărilor. Prin intermediul acestor informații se pot estima următoarele mărimi:

- Modulul de elasticitate la încovoiere, E_f a stratificatului compozit;
- Tensiunea de încovoiere σ_f;
- Rigiditatea la încovoiere R_i.

Astfel în figura 5.23 este prezentată curba caracteristică forță – deplasare pentru epruveta testată. Analizând graficul precum și ținând cont de rezultatele numerice furnizate de mașina de încercări se poate constata că forța de rupere a epruvetei a atins în timpul procesului de încovoiere valoarea maximă de 3949,04 N.

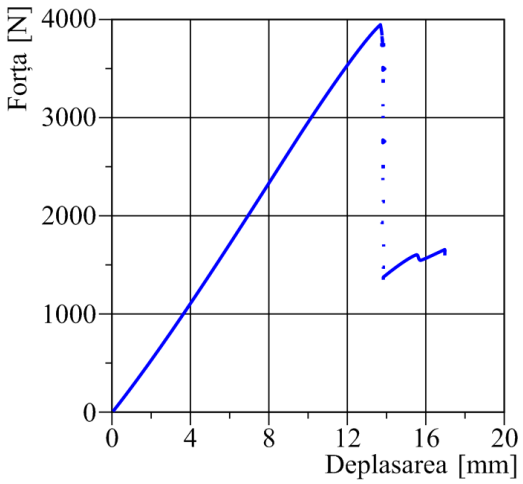


Fig. 5.23. Curba caracteristică forță – deformație în cazul încovoierii în 4 puncte a epruvetei din material compozit pe bază de fibră de carbon.

Utilizând rezultatele numerice obținute de la sistemul de achiziție a datelor, s-au trasat graficele corespunzătoare deformațiilor obținute de la senzorii aplicați. Graficul din figura 5.24 ilustrează curba caracteristică tensiune – deformație obținută pentru cele două cazuri care se produc în timpul procesului de încovoiere: tracțiune (albastru) și compresiune (roșu). Aceste date

au fost achiziționate de la senzorii poziționați pe suprafețele superioară și cea inferioară a epruvetei.

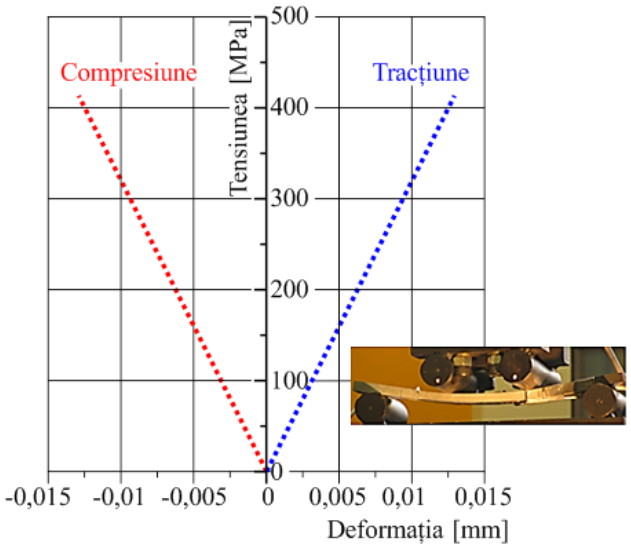


Fig. 5.24. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața superioară și inferioară a epruvetei.

În figura 5.25 este prezentată curba caracteristică tensiune – deformație obținută în urma analizei rezultatelor numerice achiziționate de la traductorii tensomentrici montați pe suprafața laterală a epruvetei.

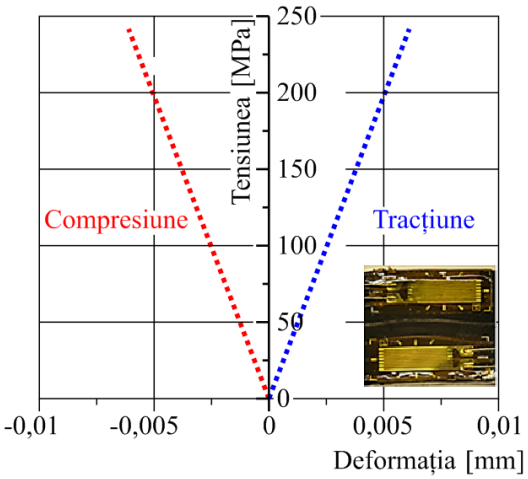


Fig. 5.25. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața laterală a epruvetei.

5.3.3. Achiziționarea datelor experimentale în urma încercării de încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acustici

Pe suprafața epruvetei s-au aplicat atât 4 senzori tensometrici de tipul celor prezentați la testul anterior precum și 3 senzori acustici de tip NANO 3. Aceștia au fost aplicați pe suprafața epruvetei la anumite distanțe pentru a detecta microfisurile din zona lor de acțiune.

Modul de dispunere al senzorilor pe suprafața epruvetei precum și distanțele între aceștia sunt prezentate schematic în figura 5.26.

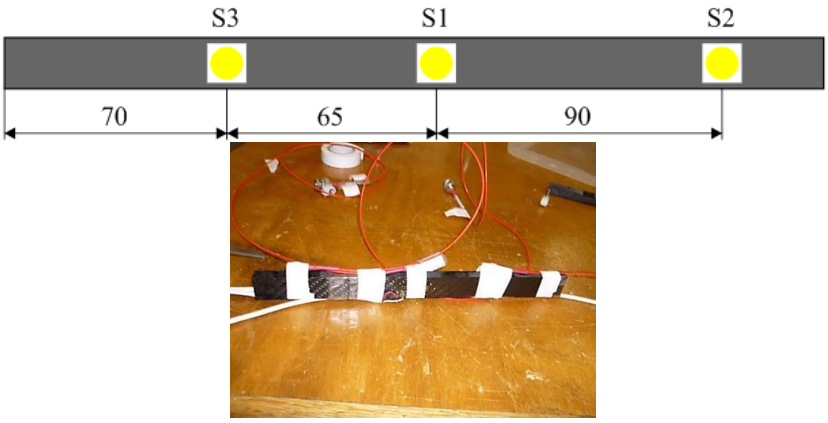


Fig. 5.26. Modul de plasare a senzorilor acustici pe suprafața epruvetei.

Epruveta a fost poziționată în dispozitivul de testare în același mod ca și la încercarea anterioară. S-a realizat conectarea prin cablaje atât cu placa de achiziție tip SPIDER 8 cât și cu sistemul de detectare a emisiei acustice tip MISTRAS. Montajul experimental este prezentat în figura 5.27.

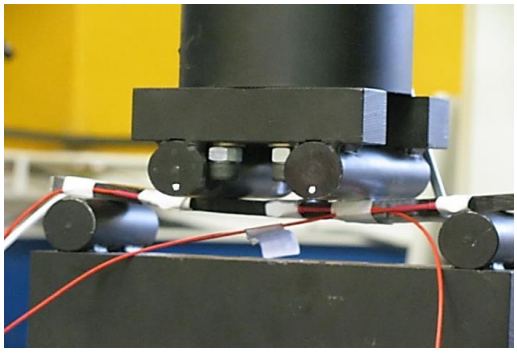


Fig. 5.27. Montajul experimental pentru încercarea la încovoiere în 4 puncte – epruveta D2.

Utilizând sistemul de achiziție tip MISTRAS și software-ul specific AEWin for PCI2 s-au putut înregistra o serie de informații privind sănătatea structurală a epruvetei. Astfel se poate observa în figura 5.28 redarea semnalelor acustice furnizate de cei trei senzori.

S-au selectat culori diferite de redare pentru semnalele provenite de la fiecare senzor în parte, astfel: cu roșu este marcat semnalul provenit de la primul senzor, cu albastru este redat semnalul de senzorul al doilea iar cu violet este reprezentat semnalul furnizat de senzorul al treilea. Conform teoriei analizei și procesării semnalelor, termenul ”hit” se referă la un semnal de emisie acustică al cărui nivel depășește un prag de amplitudine stabilit.

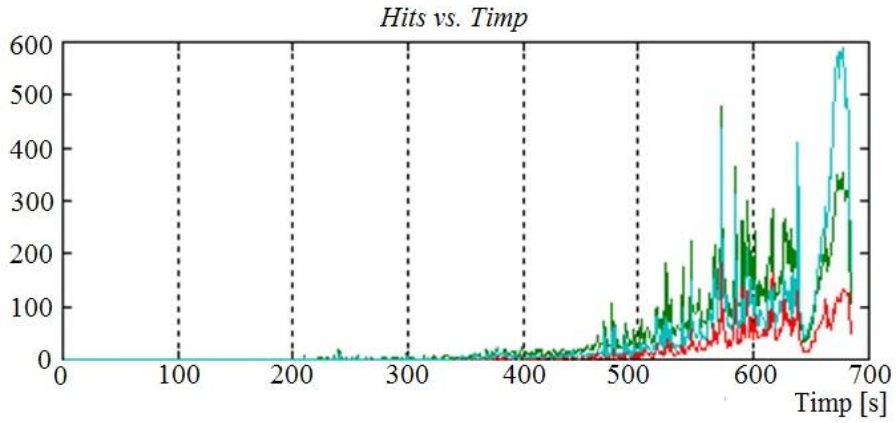


Fig. 5.28. Variația semnalelor acustice provenite de la cei 3 senzori (*Hits* vs *Timp*).

În același mod ca și la încercarea anterioară s-a obținut un fișier text cu datele numerice furnizate de către mașina de încercare la încovoiere care a fost convertit apoi in fișier tip xls.

Pe baza acestor informații s-a trasat curba caracteristică forță – deplasare pentru încercarea efectuată (Fig. 5.29).În acest caz curba caracteristică forța – deplasare obținută se prezintă diferit deoarece încercarea la încovoiere a fost oprită înainte de ruperea finală a epruvetei.

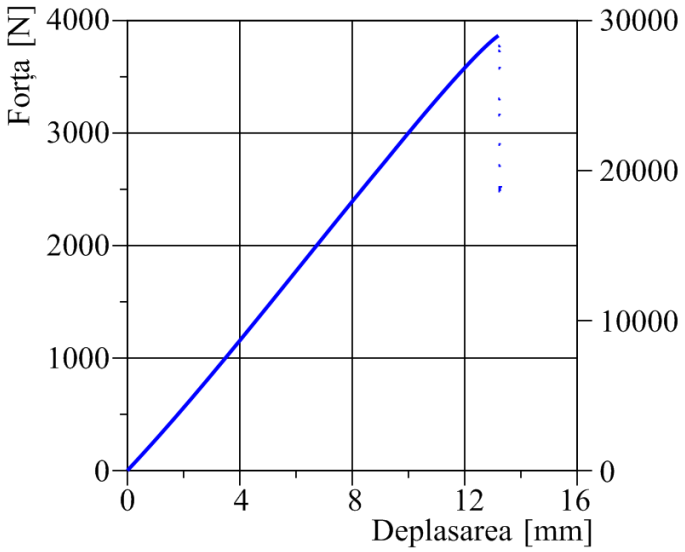


Fig. 5.29. Curba caracteristică forță – deplasare pentru încercarea la încovoiere în 4 puncte (epruveta D2).

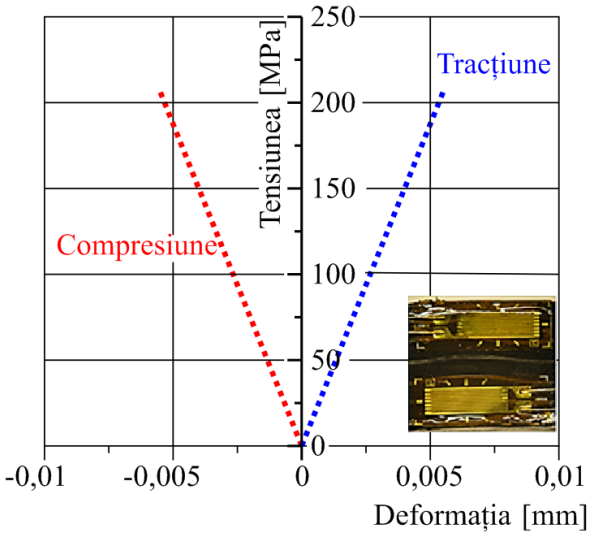


Fig. 5.30. Curba caracteristică tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața laterală a epruvetei.

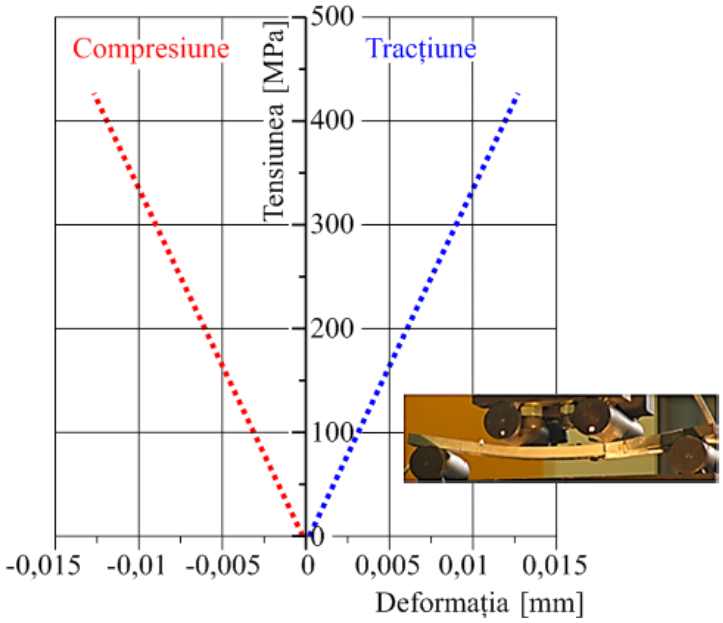


Fig. 5.31. Curba caracteristică Tensiune – deformație pentru cazul de tracțiune și compresiune achiziționată de la traductori aplicați pe suprafața superioară și inferioară a epruvetei.

5.3.4. Încercarea la tracțiune cu utilizarea traductorilor tensometrici

Ca și în cazul încercărilor anterioare s-au achiziționat date atât de la mașina de încercări cât și de la sistemul de achiziție SPIDER 8 la care au fost conectați cei doi senzori tensometrici. Datele s-au extras sub forma unor fișiere text care apoi au fost convertite în fisier xls pentru a se putea trasa graficele aferente Pe baza datelor extrase de la mașina de încercări s-a trasat curba caracteristică la tracțiune (fig. 5.32) pentru epruveta din fibră de carbon.

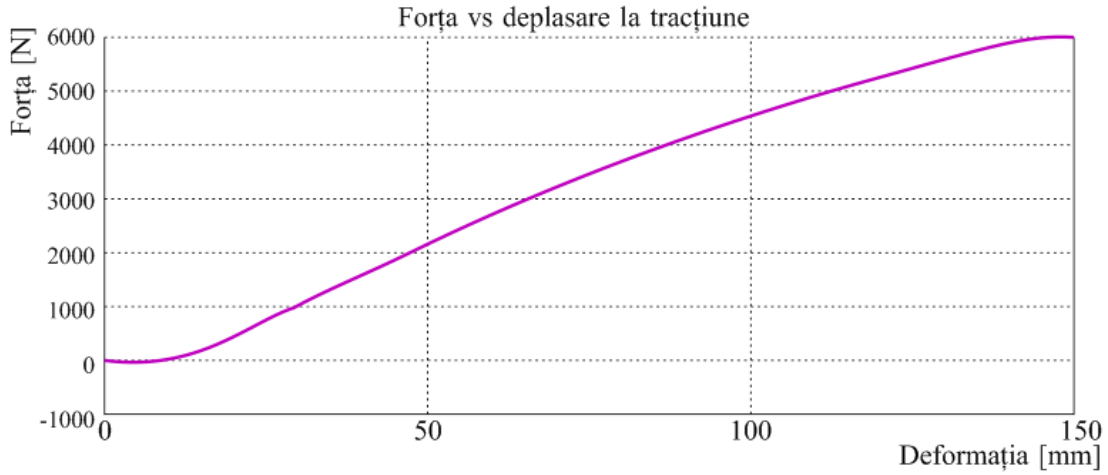


Fig. 5.32. Curba caracteristică la tracțiune pentru epruveta D3.

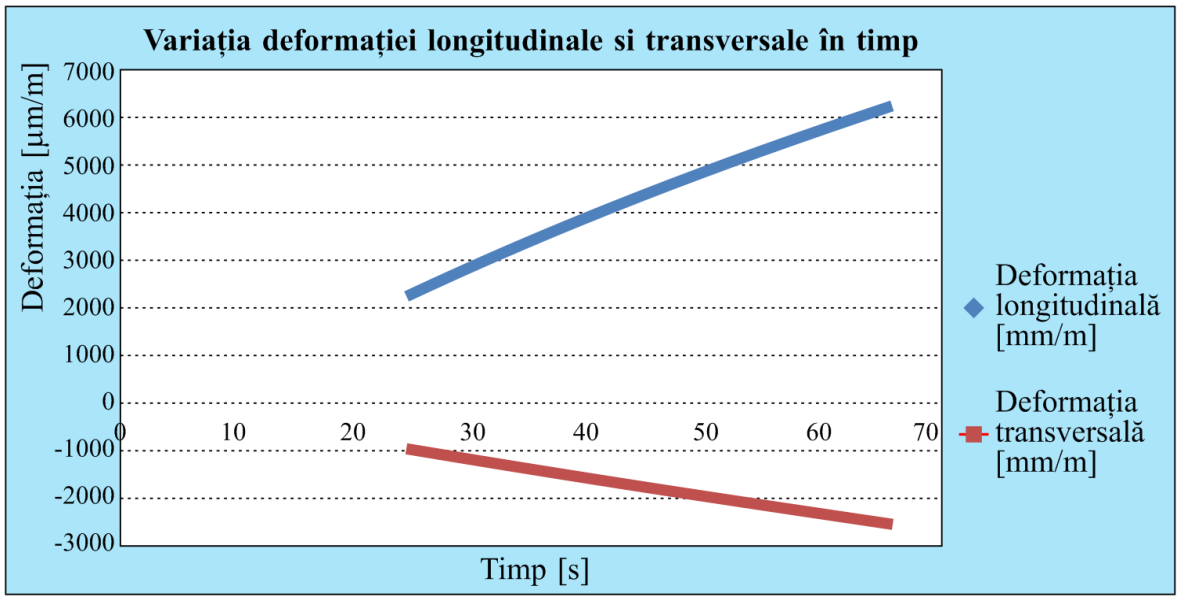


Fig. 5.33. Variația deformației longitudinale și transversale la tracțiune în funcție de timp.

5.4. PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE

5.4.1. Procesarea datelor obținute în urma încercării la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor tensometrici

În urma analizei graficului din figura 5.29 și a valorilor numerice achiziționate de la mașina de încercare se pot extrage informații cu privire la forța de rupere și deformația epruvetei în anumite puncte.

Utilizând relațiile clasice de calcul (metoda triunghiului) și pe baza valorilor numerice extrase din curba forță – deplasare s-au calculat energia totală, energia elastică și energia disipată necesare procesului de încercare la încovoiere. Acestea au fost redate grafic în figura 5.34.

Energia mecanică totală reprezintă capacitatea unui corp de a efectua un lucru mecanic.

Energia elastică este energia stocată de un corp atunci când este deformat. Energia disipată reprezintă energia eliminată de corp sub formă de căldură în timpul deformației. În acest caz de solicitare datorită faptului că încercarea s-a efectuat până la ruperea totală a epruvetei se poate observa pe grafic că există o cantitate semnificativă de enegie disipată.

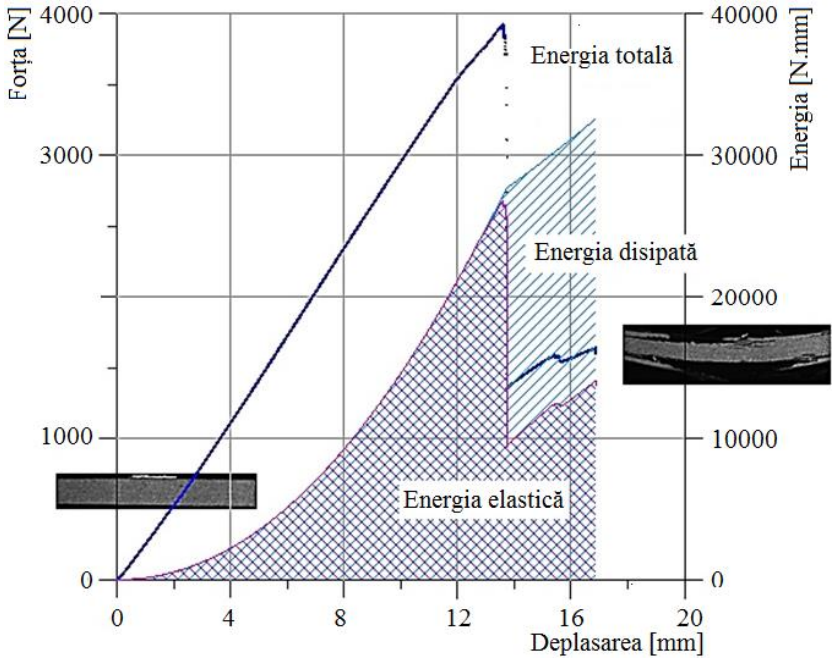


Fig. 5.34. Reprezentarea grafică a forței de rupere, energiei totale, energiei elastice și energiei disipate în funcție de forța de rupere.

Analizând graficul se poate constata că energia elastică este prezentă pe toata durata deformației (fiind parte a energiei totale) iar în momentul critic (când forța este maximă) aceasta de transformă în energiei disipată.

În scopul determinării modulului de elasticitate la încovoiere și utilizând valorile pentru dimensiunile geometrice ale epruvetei s-a extras din graficul din figura 15, panta $\frac{F}{\delta}$. Acest lucru s-a realizat prin trasarea unei drepte (tangente) care intersectează curba forță – deplasare. Acest lucru este ilustrat grafic în figura 5.35. Pentru calculul numeric al pantei s-au utilizat funcțiile predefinite ale unui program specializat – GRAPHER. În acest scop s-au important datele

numerice din Excel și s-au trasat graficele aferente, iar după efectuarea calculelor s-au obținut și anumite rezultate numerice.

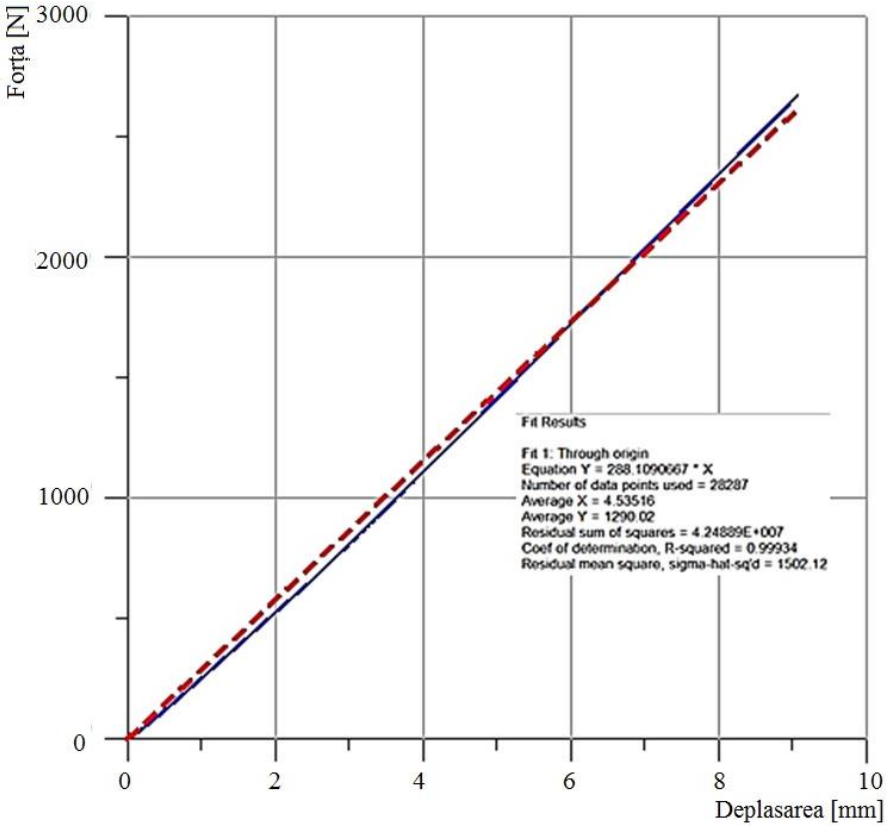


Fig. 5.35. Trasarea pantei F/δ necesare în calculul modulului de elasticitate la încovoiere al epruvetei D1.

Analizând curba caracteristică forță – deformație și studiind datele numerice rezultate în urma încercării de încovoiere în 4 puncte, pentru epruveta testată, se poate constata că:

- Forța maxima de rupere D1: 3949,04 N
- Alungirea în punctul critic: 14,1323 mm.

Pentru calculul valorilor rezistenței la încovoiere și a modulului de elasticitate s-a elaborat o aplicație, denumită DC_1, în mediul de programare grafică LabVIEW (**Lab**oratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench). Aceasta este o platformă și un mediu de programare dezvoltat de compania National Instruments (NI) care permite utilizatorilor să proiecteze aplicații în limbaj grafic. Inițial lansat pentru Macintosh în 1986, LabVIEW este frecvent folosit pentru achiziții de date,ca instrument de control, și automatizări industriale pe o diversitate de de platforme, inclusiv Microsoft Windows, diverse sisteme UNIX, Linux, și Mac OS.

Panoul destinat utilizatorilor poate fi vizualizat în figura 5.36. Acesta prezintă două module esențiale: un panou pentru introducerea datelor inițiale și unul pentru afișarea rezultatelor.

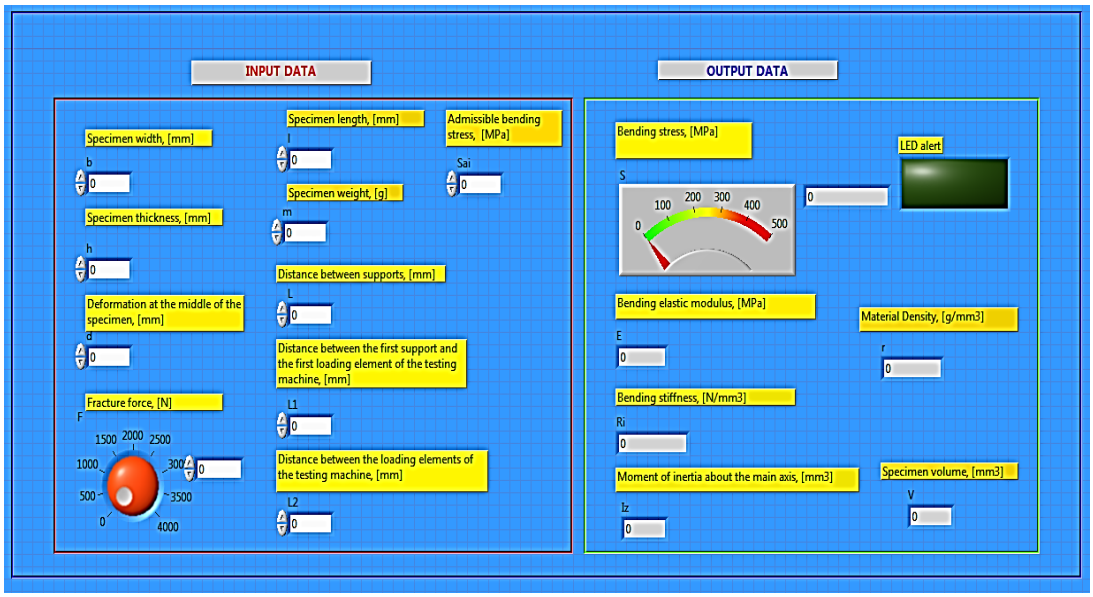


Fig. 5.36. Panoul aplicației LabVIEW pentru calculul la încovoiere în 4 puncte (cu considerarea pantei) – (program DC_1).

După cum se observă în imaginea din figura 5.36 panoul conține:

- 8 controale tip numeric pentru introducerea manuală a dimensiunilor epruvetei: lățimea (*b*), grosimea (*h*), lungimea (*l*), masa (*m*); panta curbei forță - deplasare (*p*), distanța între reazeme (*L*), distanța între primul reazem și primul element de încărcare (*L1*), distanța între elementele de încărcare ale mașinii (*L2*);
- Un control tip knob (buton rotativ) cu display digital pentru setarea valorii forței de rupere;
- Un indicator tip meter cu display digital pentru afișarea valorii rezistenței la încovoiere;
- 5 indicatoare numerice tip display digital pentru afișarea valorii modulului de elasticitate (*E*), rigidității la încovoiere (R_i), momentului de inerție față de axa principală (I_z), volumului (*V*) și masei volumice a epruvetei (ρ).

Figura 5.37 și 5.38 ilustrează cele două cadrane ale diagramei (codul de programare LabVIEW) pentru aplicația elaborată. Se poate observa că pe lângă elementele de introducere a datelor inițiale și cele de afișare a rezultatelor, diagrama conține și elemente de calcul și programare. Astfel sunt introduși operatori aritmetici tip multiplicare, scădere, împărțire, înmulțire multiplă dar și o structură de programare tip Formula Node. Aceasta conține formule matematice mai complexe scrise în limbaj C++. Spre deosebire de codul C++ unde intrările se introduc în interiorul codului ca linii de comandă, în cazul programării grafice, pentru efectuarea

operațiilor din interiorul structurii, este necesar să fie definite în partea stângă intrările (datele inițiale) și în partea dreaptă ieșirile (variabilele).

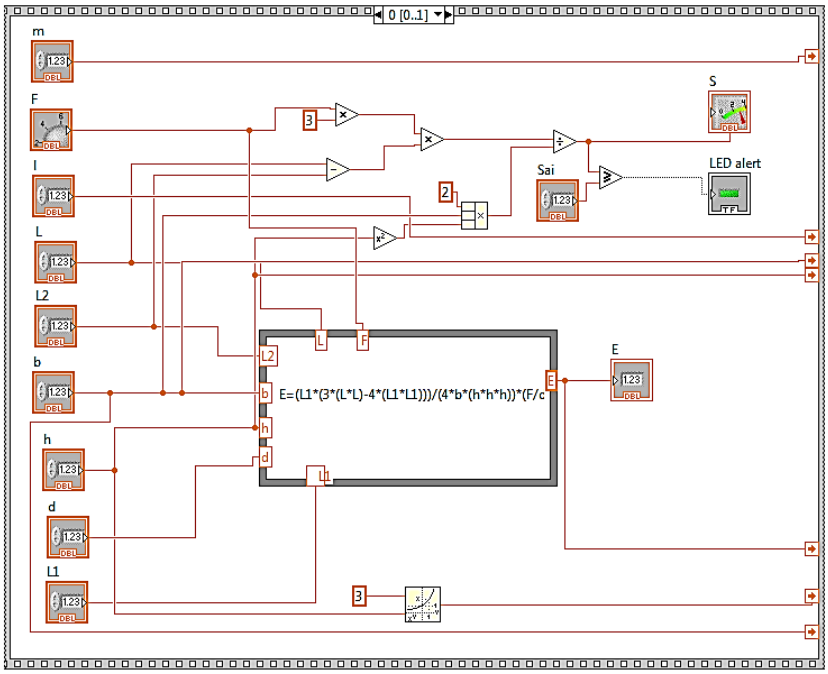


Fig. 5.37. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere (cu considerarea pantei) – secvență I (program DC_1).

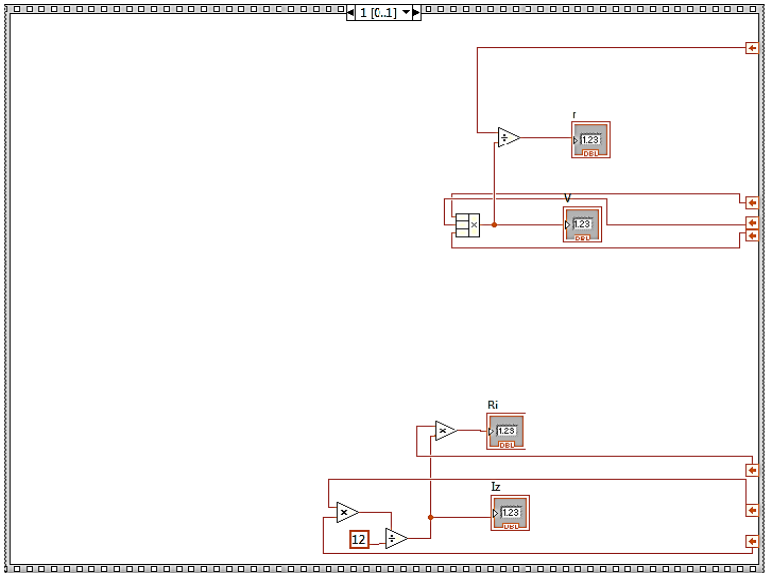


Fig. 5.38. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere (cu considerarea pantei) – secvența II (program DC_1).

Pentru realizarea aplicației în mediul de programare grafică s-a ținut cont de relațiile specifice din Rezistența materialelor și anume [Deutsch, 1979]:

- Tensiunea la încovoierea în 4 puncte se calculează conform relației lui Navier astfel [Deutsch, 1979]: $\sigma_{max} = \frac{3F(L-L_2)}{2bh^2}$; (5.1)

- Modulul de elasticitate: $E = \frac{L_1(3L^2 - 4L_1^2)}{4bh^3} \cdot \frac{F}{\delta} = \frac{L_1(3L^2 - 4L_1^2)}{4bh^3} \cdot p$; (5.2)

- Rigiditatea la încovoiere: $R_i = E \cdot I_z$, unde $I_z = \frac{bh^3}{12}$, (5.3)

în care: F [N] este forța de rupere, L [mm] este distanța între reazeme, L_2 [mm] este distanța între elementele de încărcare ale mașinii, L_1 [mm] este distanța între primul punct de reazem și primul punct de încărcare, b [mm], lățimea epruvetei, h [mm] este grosimea epruvetei, δ [mm] fiind deformația la mijlocul epruvetei, cu E [MPa] modulul de elasticitate la încovoiere al epruvetei, R_i, [MPa] rigiditatea la încovoiere, σ_{max} [MPa] tensiunea maximă la încovoiere și I_z [mm^3] momentul de inerție față de axa principală.

Aplicația elaborată reprezintă atât o metodă rapidă de calcul a unor caracteristici ale materialului compozit la încovoiere cât și o combinație între două limbaje de programare diferite. Inserarea codului C++ în structura de programare este o metodă de simplificare a codului grafic pentru înțelegerea acestuia de către utilizatorii neexperimentați. În scopul facilitării înțelegerii modului de funcționare, s-a utilizat o structură secvențială programare, tip Stacked cu două cadrane. Primul cadran a fost utilizat pentru calculul tensiunii la încovoiere și a modulului de elasticitate iar cel de-al doilea cadran conține rezultatele volumului, masei volumice a epruvetei precum și ale rigidității la încovoiere și momentului de inerție față de axa principală.

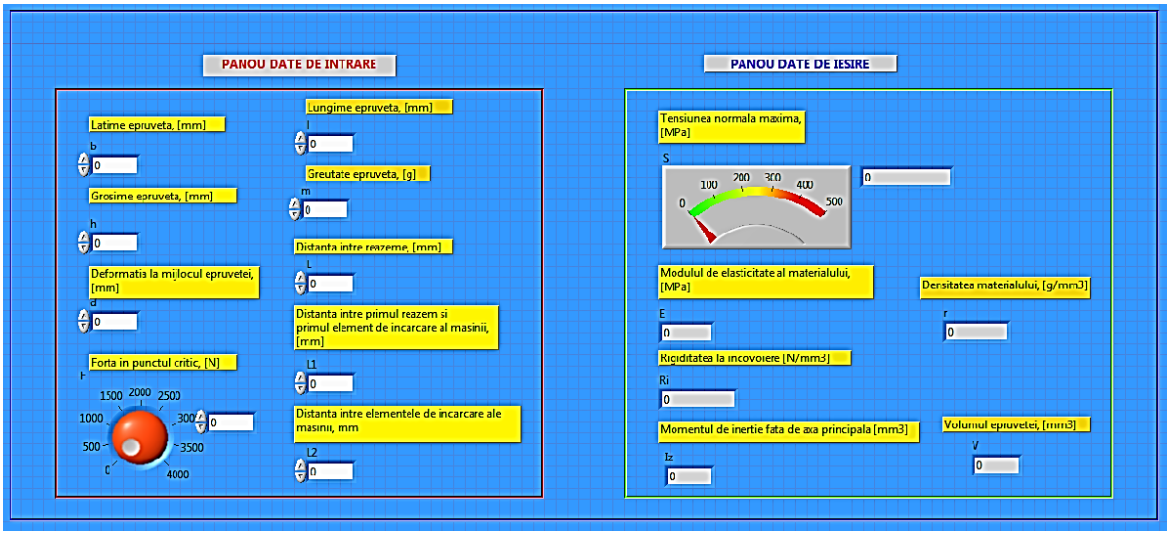


Fig. 5.39. Panoul aplicației LabVIEW pentru calculul la încovoiere în 4 puncte (cu considerarea deformației la mijlocul epruvetei) – program DC_2.

În scopul verificării rezultatelor obținute în urma calculelor de rezistență s-au elaborat două aplicații diferite. Astfel în prima aplicație, în calculul de modulului de elasticitate s-a luat în considerare valoarea pantei obținută prin intersecția tangentei cu curba forță – deplasare în software – ul Grapher. Pentru cea de-a doua aplicație (DC_2), ilustrată în figurile 5.39, 5.40 și 5.41 s-a luat în considerare valoarea deformației la mijlocul epruvetei.

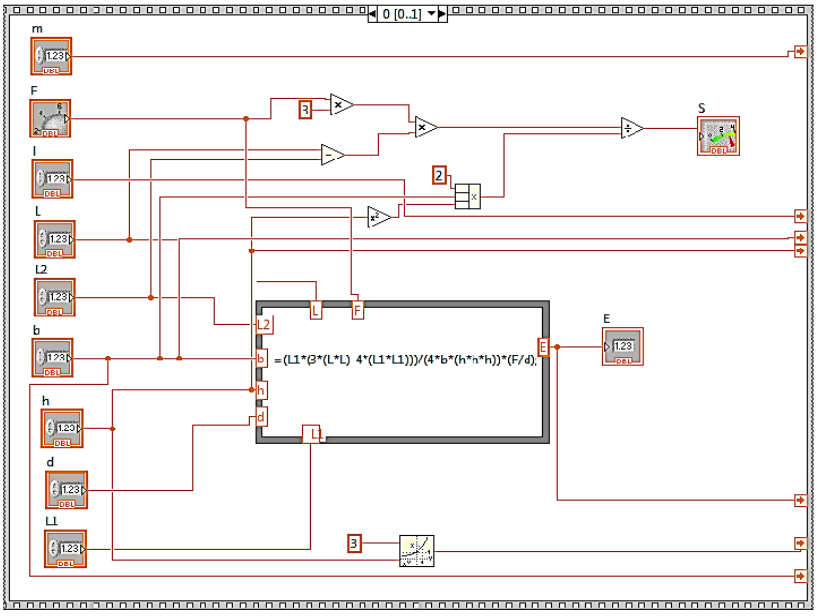


Fig. 5.40. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere (cu considerarea deformației la mijlocul epruvetei) – secvență I (program DC_2).

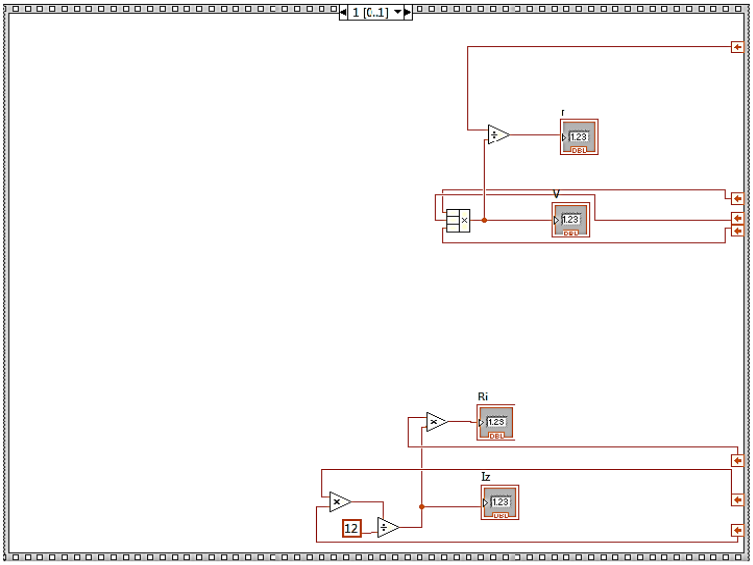


Fig. 5.41. Diagrama aplicației de calcul a variabilelor la încovoiere (cu considerarea deformației la mijlocul epruvetei) – secvență II (program DC_2).

5.4.2. Procesarea datelor obținute în urma încercării la încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acustici

Datele provenite de la sistemul acustic au fost apoi prelucrate statistic prin intermediul unui analize comparative - Boxplot - în vederea comparației modului de propagare a defectelor în cele trei locuri unde s-au aplicat senzorii acustici.

În acest scop, utilizând funcțiile predefinite din programul Microsoft Excel 2010 s-au calculat o serie de variabile necesare analizei statistice, prima cuartilă (Q1), minimul (min), mediana (median), maximul (max) și a treia quartila (Q3). Toate aceste date se pot regăsi în Tabelul 5.4.

Tabelul 5.4. Valori ale variabilelor utilizate în analiza statistică.

	S1	**S2**	**S3**
Q1	0	0	0
Min	0,0000	0,0000	0,0000
Median	6,0000	1,0000	3,0000
Max	478,0000	208,0000	589,0000
Q3	53,75	13,75	28,75

Boxplot – ul este o reprezentare grafică care arată distribuția unei variabile în diferite cazuri. În cazul de față această variabilă este considerată valoarea amplitudinii semnalului provenit de la senzori în timpul încercării de încovoiere în 4 puncte a epruvetei.

Cuartila Q1 este acea valoare dintr-o serie de valori, pentru care 25 % din valorile seriei sunt sub Q1 și 75% peste Q1.

Cuartila Q3 este acea valoarea dintr-o serie de valori pentru care 75% din valorile seriei sunt sub Q3 și 25% peste Q3.

Mediana unui set de valori măsurate este valoarea care cade în mijloc când valorile măsurate sunt aranjate în ordinea mărimii.

Percentila este valoarea unei variabile sub care se încadrează („cade”) un anumit procent din observații.

Valoarile aberante (outliers) sunt considerate valorile mai mari decât Q3+1,5IQR sau valori mai mici decât Q1-1,5IQR. Intervalul IQR este reprezentat grafic printr-un dreptunghi („cutie”). În interiorul său se află mediana reprezentată grafic prin o linie orizontală. Intervalele (X_{min} , Q1) și (Q3, X_{max}) sunt reprezentate de câte o linie („mustață”) trasată în continuarea dreptunghiului.

Figura 5.42 ilustrează analiza comparativă (BOXPLOT) pentru rezultatele furnizate de cei trei senzori acustici utilizați în timpul încercării. Astfel se poate observa că pentru cele trei seturi de date valoarea minimă este 0, ceea ce este absolut normal pentru acest caz de achiziție. Valoarea maximă a amplitudinii se poate regăsi în cazul datelor provenite de senzorul 3, situat în partea stângă a epruvetei. Aceasta rezultă că în acest caz microfisurile cât și delaminarea s-au propagat și au ajuns la un nivel critic mult mai rapid în acea zonă a epruvetei.

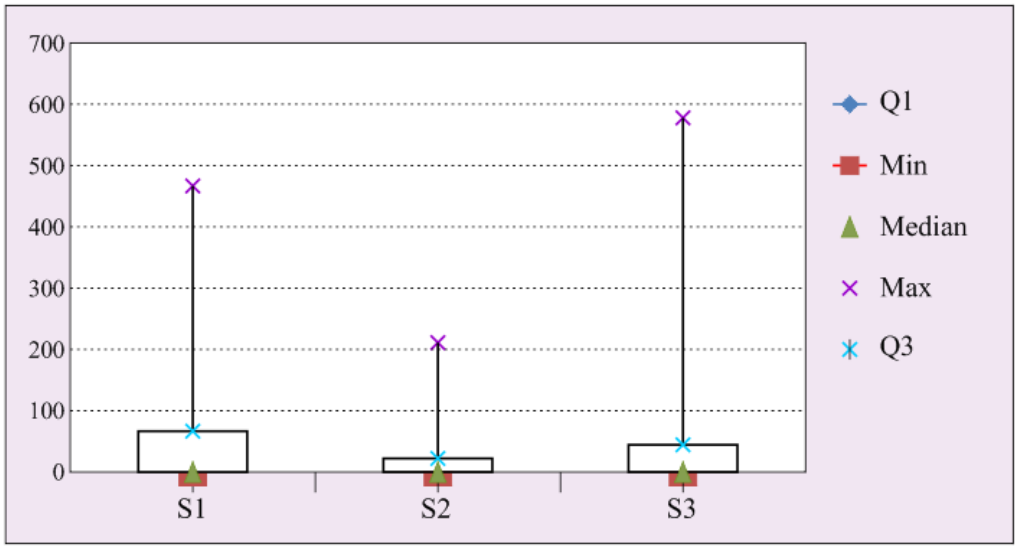


Fig. 5.42. Analiza statistică – BOXPLOT – de comparare a rezultatelor achiziționate de la cei trei senzori.

Utilizând procedura aplicată în calculul caractristicilor primei epruvete, s-au extras valorile numerice ale forței de rupere și deplasărilor specifice în punctele semnificative. Acestea s-au înregistrat în tabelul 5.5.

Tabel 5.5. Valorile numerice ale forței de rupere și deformației la mijlocul epruvetei în puncte semnificative de pe curba forță – deplasare.

Forța *N*	**Deformația** *mm*
500,041	1,8208
1000,05	3,50231
1500	5,1428
2000,03	6,76832
2500,04	8,4078
3000,03	10,0836
3500,15	11,7713
3894,7	13,4656

Analiza frecvențială FFT (Fast Fourier Transform)

Transformata Fourier rapidă (FFT – Fast Fourier Transform) este numele generic pentru o serie de algoritmi rapizi de calcul al transformatei Fourier discrete (TFD), pentru semnale cu suport finit.

Analiza în frecvență (spectrală) a unui semnal presupune descompunerea acestuia în componente sinusoidale. Rolul prismei este preluat de seria şi transformata Fourier. La fel ca și în fizică, termenul de spectru se referă la conținutul de frecvențe al semnalului. Procesul de obținere a spectrului de frecvențe se numește analiză spectrală. În practică determinarea spectrului unui semnal achiziționat de la anumite tipuri de surse externe (senzori), poartă numele de estimare spectrală. Transformata Fourier a unui semnal poate fi considerată funcție de densitate spectrală sau, mai simplu, spectrul semnalului.

Pentru a putea aplica algoritmul FFT în practică, este necesar să se dispună de un număr de eșantioane egal cu o putere a lui 2 (de exemplu 16, 32, 64,…, 256, 512, 1024,…) și să se respecte teorema lui Shannon referitoare la frecvența de eșantionare a semnalului. Frecvența de eșantionare $f_s = 1/T$ reprezintă frecvența cu care sunt prelevate eșantioanele semnalului analogic. Pentru ca un semnal să poate fi refăcut complet din eșantioanele sale, conform teoremei eșantionării, trebuie satisfăcut criteriul Nyquist și anume că frecvența de eșantionare trebuie să fie cel puțin dublul frecvenței maxime f_m din spectrul semnalului:

$$f_s \geq 2 \cdot f_m .$$

Pentru a micșora erorile apărute în timpul procesării unui semnal, de cele mai multe ori se utilizează tehnica “ferestrelor de ponderare” (window). Cele mai des utilizate “ferestre de ponderare” sunt ferestrele Hamming, Hanning, Blackman, Bartlett, Cebyshev, Kaiser şi fereastra triunghiulară.

Utilizând datele furnizate de sistemul acustic de achiziție, s-a proiectat o aplicație LabView (DC_3 Fig. 5.43 și Fig. 5.44) care să efectueze analiza spectrală a semnalelor furnizate de senzori. Datele numerice în prealabil salvate separat în fișiere cu extensia .lvm au fost introduse în algoritm utilizând un VI specific – Read from measurement file. Pentru obținerea spectrului de frecvențe (atât magnitudinea semnalului cât și faza) s-a utilizat un instrument virtual existent în LabView (Spectral Measurements) unde s-a selectat tipul de fereastră (în cazul de față s-a optat pentru fereastra de tip Hamming) și tipul de măsurători dorite (Magnitude – RMS în cazul de față). Pentru reprezentarea grafică a semnalelor, atât cel inițial cât și cele pentru magnitudine și fază s-au utilizat 3 osciloscoape de tip Graph. Pentru obținerea valorilor magnitudinii și ale fazei s-a utilizat un instrument de procesare a semnalului (Transformata Fourier).

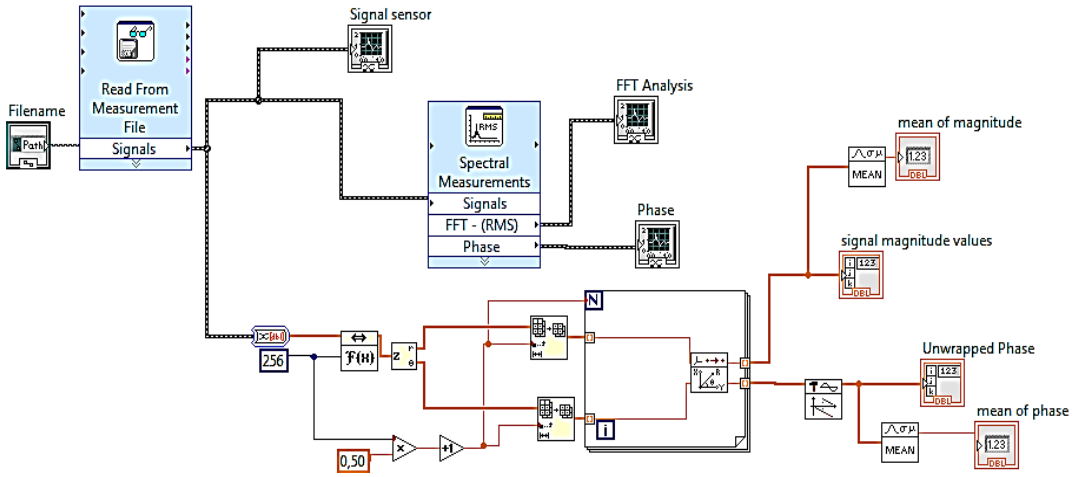


Fig. 5.43. Codul programului LabVIEW DC_3 de analiza frecvențială.

După cum se cunoaște din matematică, aplicarea transformatei Fourier asupra unui semnal generează atât o componentă reală cât și una imaginară. La prelucrarea unui semnal acustic este nevoie să se ia în considerare ambele componente pentru ca rezultatul să fie unul pertinent. Astfel, în cadrul codului grafic, la ieșirea din transformata Fourier s-a aplicat elementul ”complex to polar” pentru a putea împărți semnalul obținut în cele două componente. În acest fel s-au obținut cele două semnale de interes (real și imaginar) care vor deveni magnitudinea și faza semnalului transformat. Programul mai conține o serie de operatori matematici și de manipulare a vectorilor (arrays) precum și o structură de programare de tip FOR. În interiorul acestei structuri se află elementul de procesare a semnalelor punct cu punct tip ”1D rectangular to polar” care transformă semnalul în coordonate polare. Valorile celor două componente sunt afișate prin intermediul unor indicatori numerici.

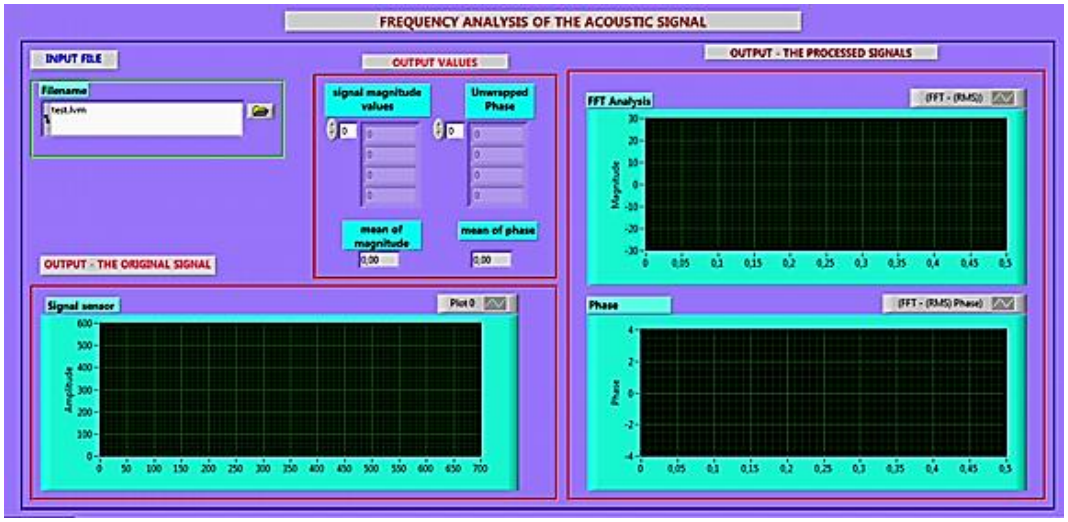


Fig. 5.44. Panoul programului DC_3 pentru realizarea analizei frecvențiale.

Cele trei osciloscoape se pot observa și pe panoul aplicației, astfel: unul pentru semnalul inițial dat de sistemul de achiziție, al doilea pentru reprezentarea magnitudinii semnalului din cadrul analizei spectrale iar ultimul pentru reprezentarea fazei.

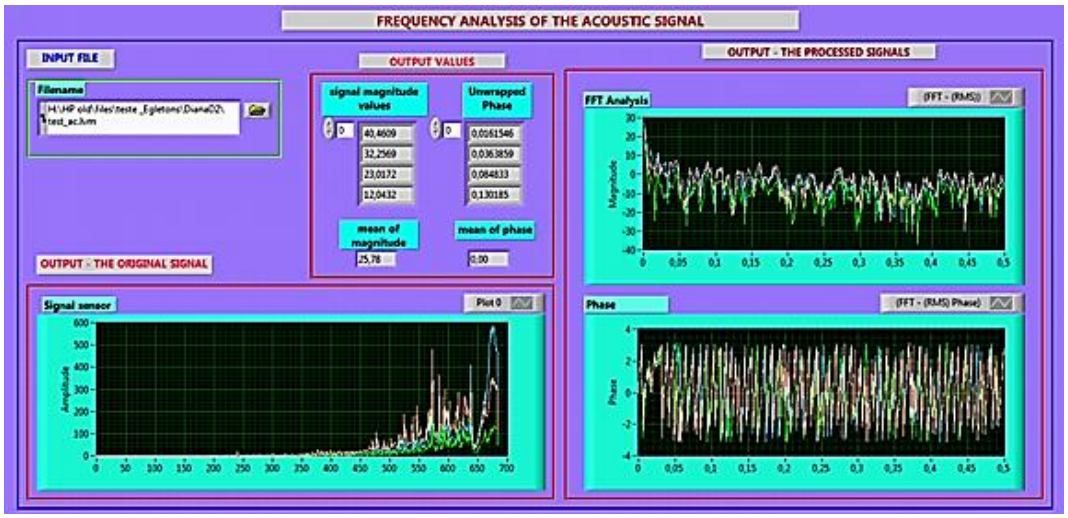


Fig. 5.45. Analiză spectrală - reprezentarea semnalelor de la cei 3 senzori: semnal senzor 1 marcat cu roz, semnal senzor 2 este marcat cu culoare verde, semnal senzor 3 este marcat cu albastru.

În figura 5.45 este ilustrată rezultatele analizei spectrale pentru semnalele provenite de la cei 3 senzori. Astfel cu culoare roz este marcat semnalul de la senzorul 1, culoare verde este selectată pentru semnalul provenit de la senzorul 2 iar cu albastru s-a marcat semnalul obținut de la senzorul 3. Poziția celor 3 senzori aplicați pe suprafața epruvetei este ilustrată în figura 5.46.

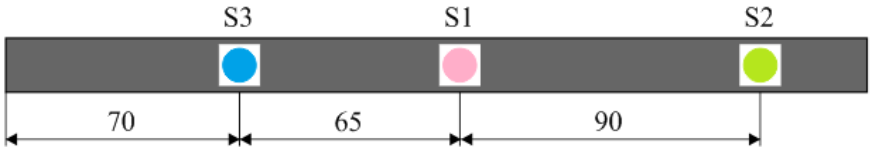


Fig. 5.46. Poziția senzorilor pe suprafața epruvetei.

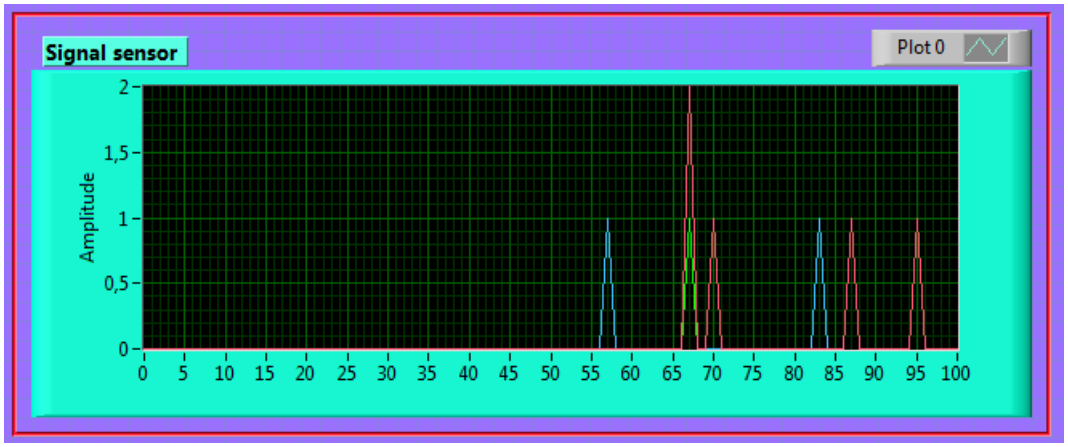


Fig. 5.47. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la 0 – 100 s.

Pentru a se putea face o analiză corectă a semnalului acustic s-a examinat activitatea semna-lelor pe intervalul de timp de la 0 la 100 s (Fig. 5.47). În primele 55 s de la pornirea experimentului, semnalul este nul. La t = 56 s se observă o creștere a voltajului semnalului provenit de la senzorul S3, ceea ce denotă că în zona senzorului S3 apare primul fenomen critic în structura materialului epruvetei - practic acolo se produce un defect. Propagarea defectului se produce până în zona senzorului S1 unde fenomenul critic devine mult mai intens: apare o creștere a voltajului semnalului până la 2 V. După acest fenomen, semnalul își păstrează un nivel acceptabil (1 V) până la t = 200 s, după care semnalul S1 reîncepe să crească până la 22V la t = 240 s (Fig. 5.48) când apare primul fenomen major de distrugere.

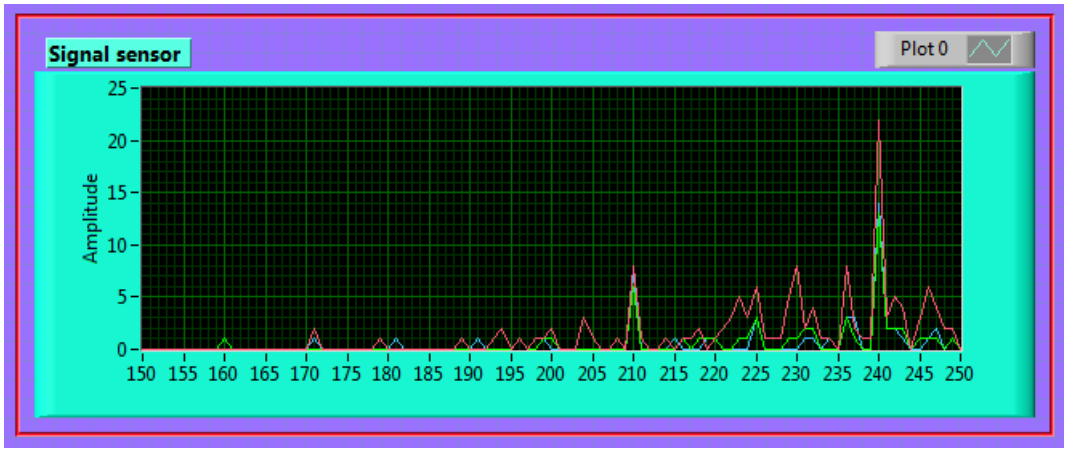


Fig. 5.48. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la150 – 250 s.

Se observă că forma semnalelor diferă de la un senzor la altul ceea ce duce la concluzia că materialul epruvetei are un comportament diferit în fiecare din cele 3 zone. Din analiza semnalelor acustice se poate deduce că prima zonă critică este cea unde a fost aplicat senzorul S3 (acest lucru va fi demonstrat ulterior și de metoda termografiei IR). De acolo se produce propagarea defectului până spre centrul epruvetei (zona senzorului S1) unde tensiunile devin critice și se produce ruperea.

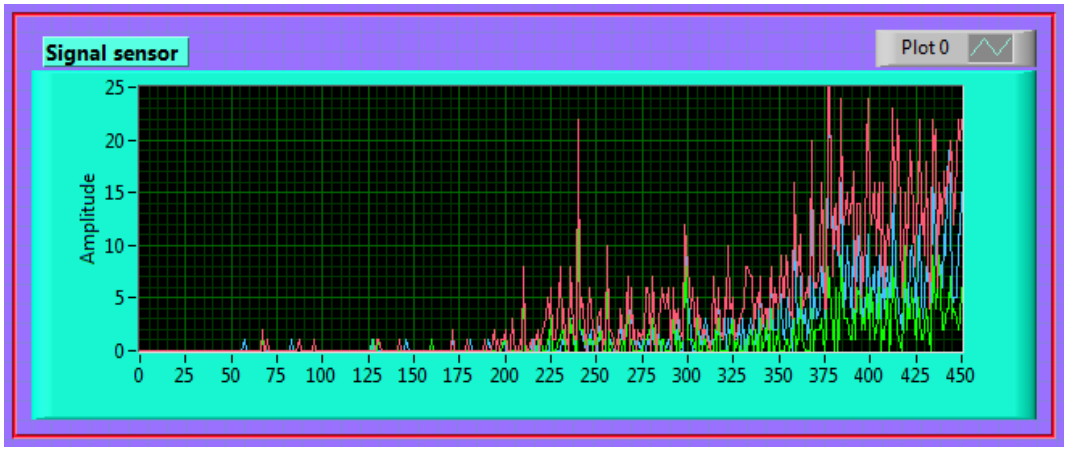


Fig. 5.49. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la 0 – 450 s.

Fenomenele din interiorul epruvetei încep să se intensifice după 350 s de la pornirea experimentului (Fig. 5.49). Apar creşteri ale voltajului pentru fiecare dintre cele 3 semnale iar activitatea acestora începe să se intensifice. Din acest moment legăturile între straturile compozitului încep să cedeze iar ruperea finală se va produce la t = 640 s, când zona senzorului S3 a fost deteriorată (Fig. 5.50).

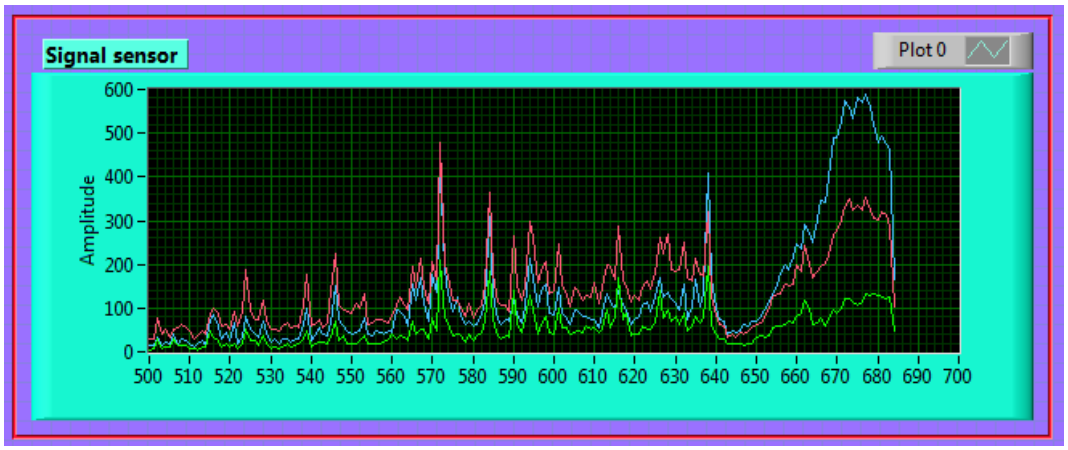


Fig. 5.50. Ilustrarea semnalului acustic furnizat de cei 3 senzori pe intervalul de timp de la 500 – 700 s.

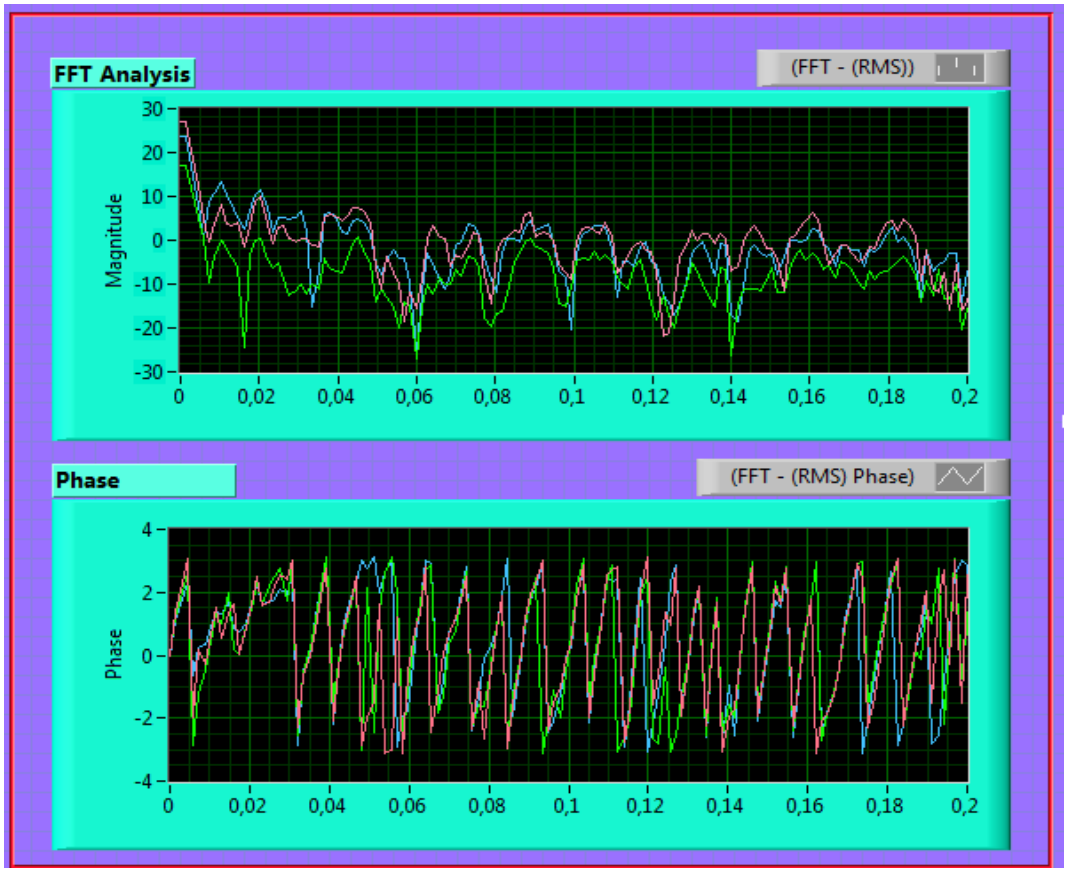


Fig. 5.51. Analiza spectrală a semnalelor acustice obținute de la cei 3 senzori la începutul experimentului.

Analiza spectrală (Fig. 5.51 și Fig. 5.52) a semnalelor provenite de la cei 3 senzori a arătat că pe toată durata experimentului magnitudinea a fost mai redusă pentru semnalul provenit de la senzorul 2 (situat în capătul din dreapta al epruvetei) ceea ce demonstrează comportamentul materialului compozit în timpul experimentului.

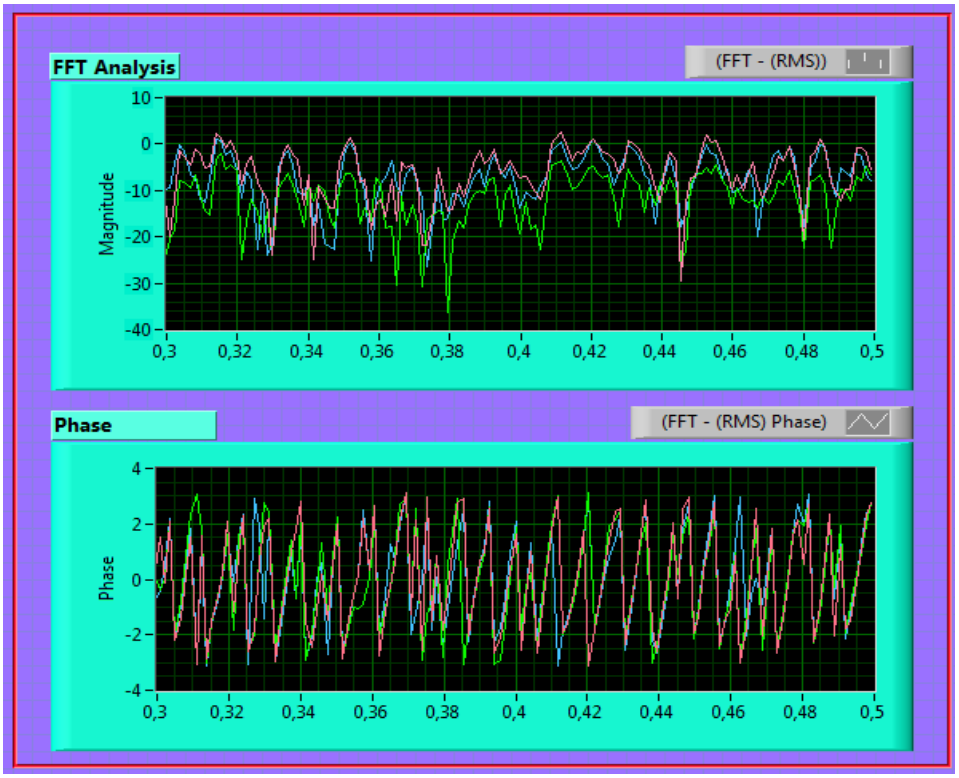


Fig. 5.52. Analiza spectrală a semnalelor acustice obținute de la cei 3 senzori la finalul experimentului.

5.4.3. Procesarea datelor obținute în urma încercării la tracțiune

Pe baza curbei caracteristice forță – deplasare în cazul tracțiunii, s-au extras valori ale forței de rupere și ale deplasărilor în 12 puncte semnificative. Acestea au fost înregistrate în tabelul 5.6.

Tabel 5.6. Valorile numerice ale forței de rupere și deplasării extrase din curba caracteristică forță – deplasare.

Forta *N*	**Deplasarea** *mm*
484,6278	0,28748
1050,5080	0,454449
1507,128	0,587960
2011,3004	0,738267
2494,5947	0,888643

3009,5668	1,05557
3486,1171	1,222612
4006,426	1,422948
4491,1611	1,62343
5018,3979	1,8571
5496,6035	2,0909254
5999,4790	2,371129

În scopul determinării rezistenței la tracțiune și a alungirii specifice și utilizând formulele stan-dard din Rezistența materialelor [Deutsch, 1979], s-a elaborat o aplicație (program DC_4) scrisă în cod grafic prin intermediul mediului de programare LabVIEW prezentat anterior. Datorită informațiilor de intrare numeroase, codul se împarte pe trei cadrane ilustrate în figurile 5.53, 5.54 și 5.55.

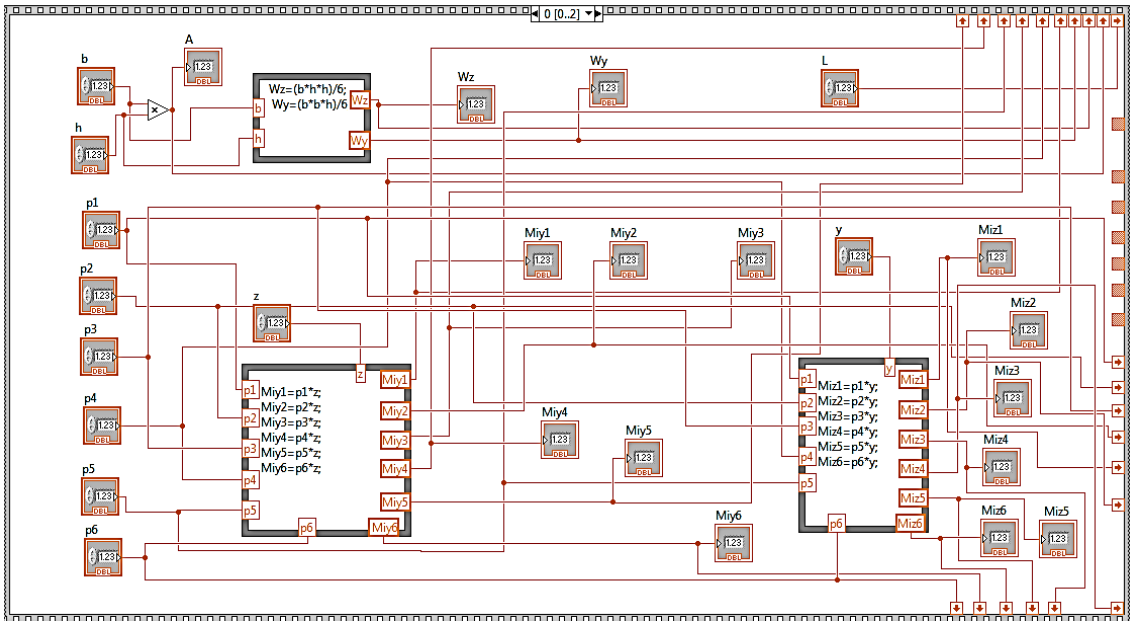


Fig. 5.53. Cod LabVIEW pentru calculul la tractiune compusă – secvență I (program DC_4).

Cunoscându-se că încercarea de tracțiune a fost excentrică, pentru calculul rezistenței la tracțiune și a elongației specifice, s-au utilizat cele două relații de bază din rezistența materialelor [Deutsch, 1979]:

$$\sigma = \left(\frac{p}{A} + \frac{M_{iy}}{W_y} + \frac{M_{iz}}{W_z} \right), \tag{5.4}$$

unde: σ [MPa] este rezistența la tracțiune, p [N] este forța de rupere la tracțiune care se extrage din curba caracteristică forță – deformație, A [mm^2] este aria secțiunii, W_y, W_z [mm^3] sunt

modulele de rezistență ale secțiunii plane în raport cu axa *Oy*, respectiv *Ox* și M_{iy}, M_{iz} [N·mm] sunt momentele de încovoiere pe axa *Oy*, respectiv *Oz* și

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} = \frac{\ell_u - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100\,[\%], \tag{5.5}$$

în care: $\Delta\ell$ este deplasarea extrasă din curba caracteristică forță – deplasare, ℓ_0 este lungimea inițială a epruvetei și ℓ_u, distanța ultimă între repere după alungire.

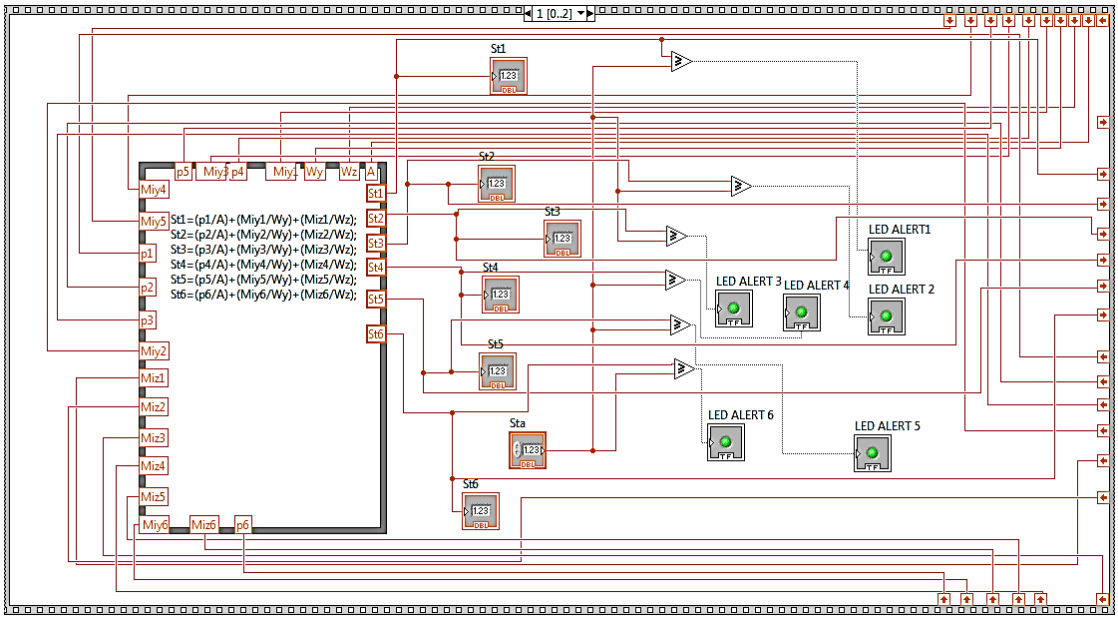


Fig. 5.54. Cod LabVIEW pentru calculul la tractiune compusă – secvență II (program DC_4).

Pentru calculul rezistențelor la tracțiune și elongațiilor specifice, în cazul de tracțiune excentrică, s-a proiectat o aplicație LabVIEW. Codul a fost împărțit pe trei cadrane, prin introducerea unei structuri secvențiale tip Stacked, astfel:

- Primul cadran a fost dedicat calculului modulelor de rezistență W_y, W_z, momentelor de încovoiere M_{iy1}, ..., M_{iy6}, M_{iz1},..., M_{iz6} și calculului ariei suprafeței transversale a epruvetei. Acest lucru a fost realizat prin introducerea a trei structuri de programare tip Formula Node unde codul a fost scris în limbaj de programare C++. Pentru calculul ariei s-a utilizat un multiplicator;
- În al doilea cadran s-a realizat calculul rezistențelor la tracțiune σ_{t1}, ..., σ_{t6} tot prin introducerea unei structuri de programare Formula Node. De asemenea s-au introdus 6 blocuri comparatoare de tip ”≥” pentru compararea rezistențelor la tracțiune obținute cu rezistența admisibilă σ_{ta}. Pentru avertizarea vizuală a utilizatorilor s-au introdus 6

indicatori de tip boolean (LED) care se vor aprinde în cazul în care valoarea rezistenței obținute depășește rezistența admisibilă la tracțiune;

- Al treilea cadran conține o structură de programare de tip Formula Node care efectuează calculul elongațiilor specifice. De asemenea aici s-au introdus și 6 operatori de diviziune pentru calculul modulului de elasticitate longitudinal.

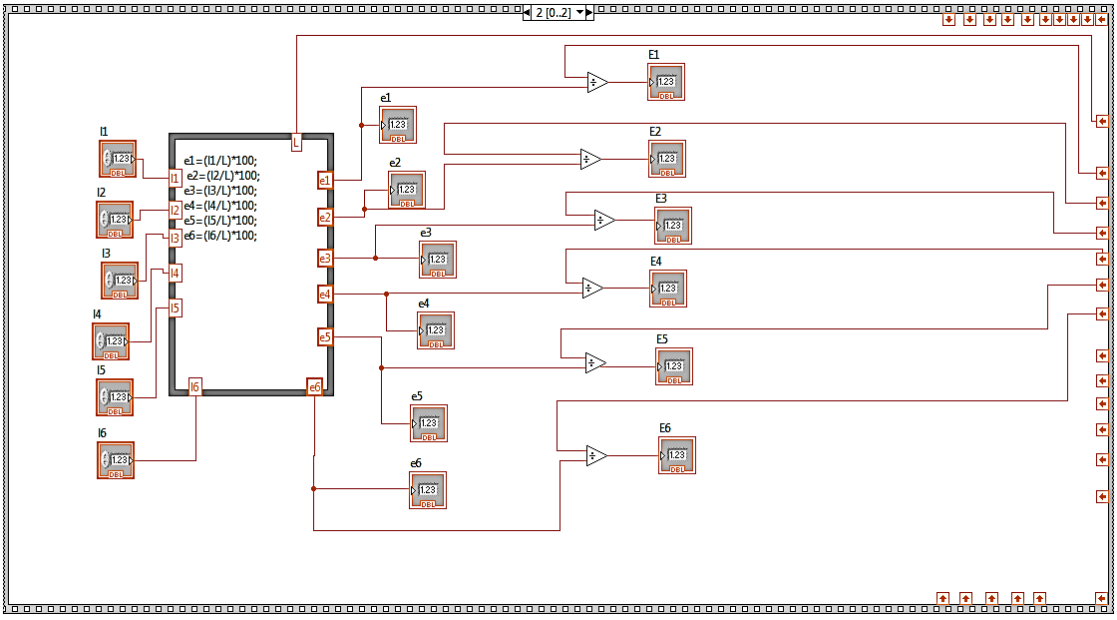


Fig. 5.55. Cod LabVIEW pentru calculul la tractiune compusă – secvență III (program DC_4).

În figura 5.56 este ilustrat panoul aplicației de calcul al caracteristicilor mecanice la tracțiune. Panoul prezintă două module: unul pentru introducerea datelor (în chenar de culoare verde) și altul pentru afișarea rezultatelor (în chenar de culoare roșie).

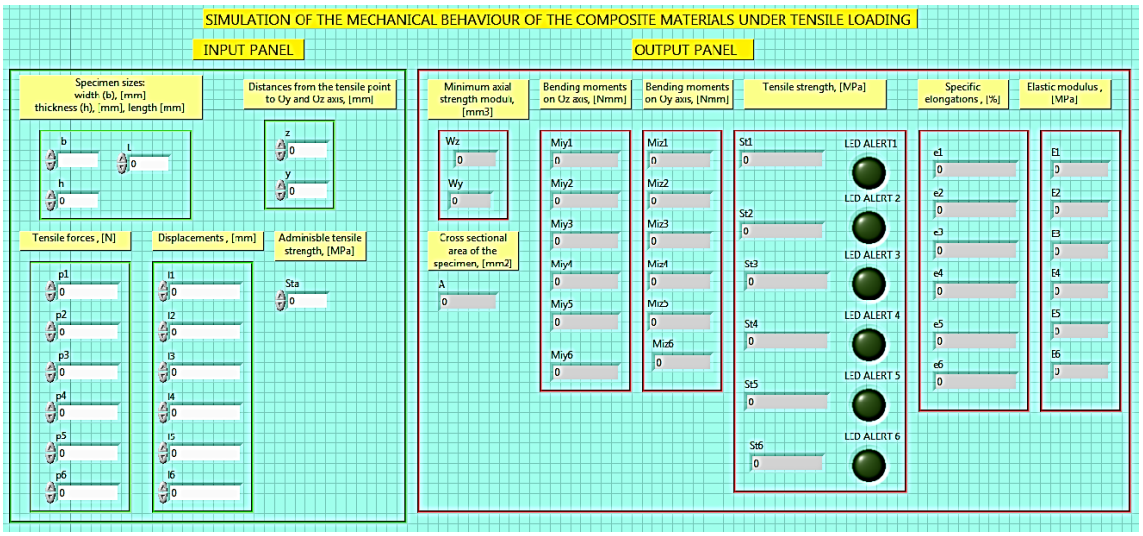


Fig. 5.56. Panoul aplicației de calcul la tracțiune excentrică (program DC_4).

Pentru calculul momentelor de încovoiere s-au utilizat cele două relații clasice din rezistența materialelor: $M_{iy}=pxz$ și $M_{iz}=pxy$.

Ținând cont de modul de efectuare a încercării de tracțiune și de regulile de bază din rezistența materialelor, s-a considerat că axa neutră a fost tangentă la conturul suprafeței în partea stângă. Acest lucru înseamnă că z_0 va avea valoarea $-b/2$ (z_0 fiind coordonata unui punct situat pe axa neutră). În același mod, se va considera că axa neutră este tangentă la conturul suprafeței în partea inferioară ($y_0 = -h/2$, y_0 – coordonata unui punct situat pe axa neutră). Astfel, aplicând relațiile vom avea [Deutsch, 1979]:

$$z = \frac{2I_y}{A \cdot b} = \frac{2\frac{b^3 h}{12}}{bh \cdot b} = \frac{b}{6} \tag{5.6}$$

$$y = \frac{2I_z}{A \cdot h} = \frac{2\frac{bh^3}{12}}{bh \cdot h} = \frac{h}{6}. \tag{5.7}$$

Cunoscând că, $b = 9{,}96$ mm și $h = 2{,}97$ mm, se va obține $z = 1{,}66$ mm și $y = 0{,}495$ mm.

5.5. REZULTATE. DISCUȚII. CONCLUZII

5.5.1. Rezultate pentru testul de încovoiere în 4 puncte cu traductori tensometrici

Pentru cazul considerării pantei la curba forță – deplasare, calculată cu programul Grapher, în urma rulării aplicației DC_1, s-a obținut modulul de elasticitate la încovoiere de valoarea 39451,9 MPa. Acest lucru poate fi vizualizat în figura 5.57.

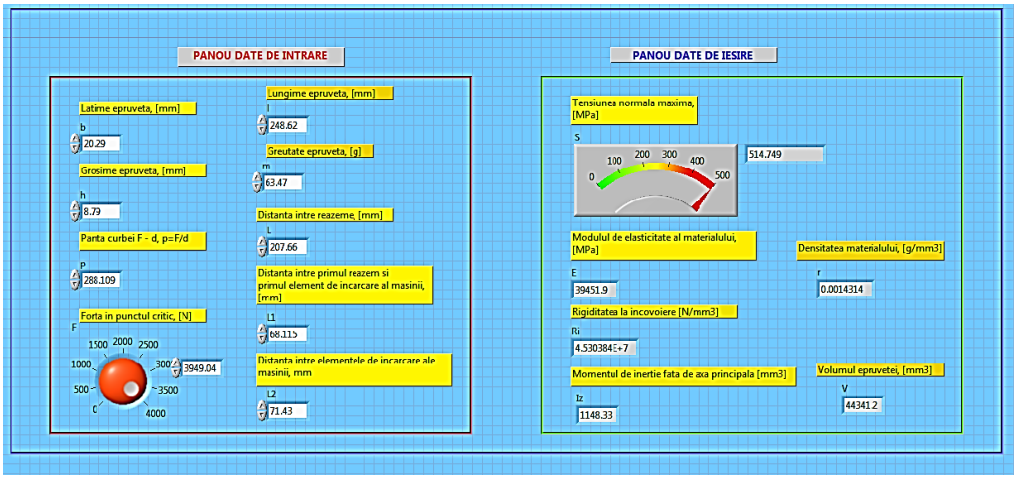


Fig. 5.57. Rezultate numerice ale variabilelor calculate în cazul încercării de încovoiere în 4 puncte – cazul forței maxime (pentru cazul considerării pantei).

Pentru cazul considerării deformației la mijlocul epruvetei, s-a utilizat aplicația DC_2 și s-au obținut rezultatele prezentate în panoul din figura 5.58.

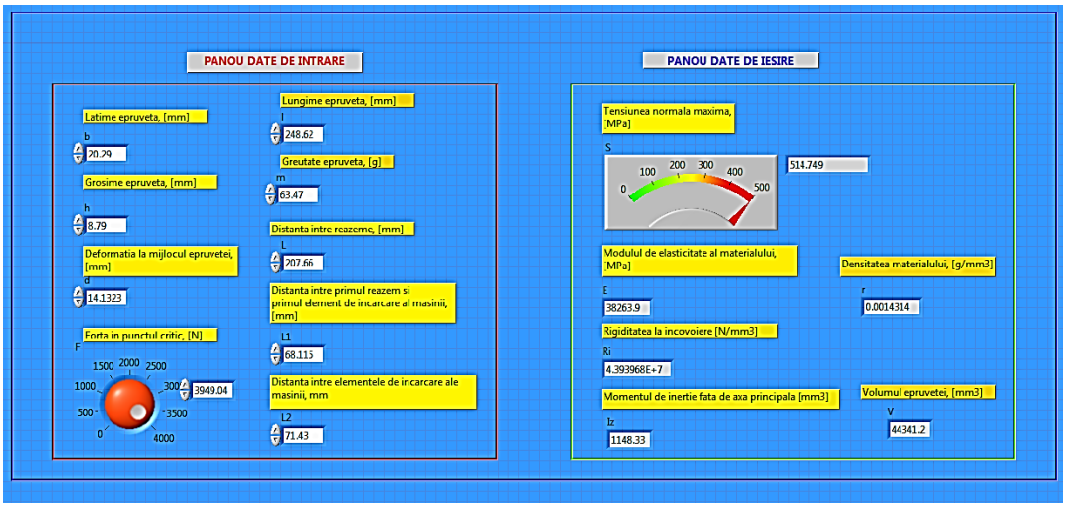


Fig. 5.58. Rezultate numerice ale variabilelor calculate în cazul încercării de încovoiere în 4 puncte – cazul forței maxime (pentru cazul considerării deformației la mijlocul epruvetei).

În tabelul 5.6 sunt redate valorile numerice ale forței de rupere și deformației specifice în câteva puncte semnificative de pe curba caracteristică forță – deformație.

Tabel 5.6. Valorile numerice ale forței de rupere și deformației la mijlocul epruvetei.

Forta *N*	**Deformația** *mm*
500,01	2,34915
1000,01	4,09015
1500,04	5,73782
2000,07	7,34617
2500,01	8,96316
3000,06	10,6078
3500,11	12,2947
3949,04	14,1323

În figura 5.58 sunt redate doar rezultatele pentru cazul de încărcare critică (la forța maximă). Utilizând aplicația DC_2 au fost calculate pe rând valorile tensiunii de încovoiere, modulului de elasticitate la încovoiere și a rigidității la încovoiere pentru forțe de rupere și deformații semnificative din timpul procesului. Rezultatele numerice obținute au fost centralizate în tabelul 5.7. Pe baza acestora s-a trasat graficul $F - \sigma$ (variația tensiunii la încovoiere în funcție de forța de încărcare – fig. 5.59) și $F - E$ (variația modulului de elasticitate în funcție de forța de

încărcare – fig. 5.60) precum și curba F - R_i (variația rigidității la încovoiere în funcție de sarcina aplicată – fig. 5.61).

Tabel 5.7. Rezultate numerice ale variabilelor în cazul încovoierii în 4 puncte a epruvetei testate.

Forța *N*	**Tensiunea la încovoiere** *MPa*	**Rigiditatea la încovoiere** *MPa*	**Modulul de elasticitate** *MPa*
500,01	65,1753	$3{,}346926 \cdot 10^7$	29146,0
1000,01	130,349	$3{,}84453 \cdot 10^7$	33479,3
1500,04	195,527	$4{,}110873 \cdot 10^7$	35798,7
2000,07	260,705	$4{,}281169 \cdot 10^7$	37281,6
2500,01	325,871	$4{,}385901 \cdot 10^7$	38193,7
3000,06	391,052	$4{,}44716 \cdot 10^7$	38727,1
3500,11	456,232	$4{,}476535 \cdot 10^7$	38982,9
3949,04	514,749	$4{,}393968 \cdot 10^7$	38263,9

Analizând graficul din figura 5.59 și calculând coeficientul de corelație se poate observa că între cele două șiruri de valori există o foarte bună corelație (coeficient de corelație ≅ 1) distribuția fiind liniar ascendentă; cu creșterea forței de rupere crește și tensiunea de încovoiere. Se poate afirma că între cele două șiruri de valori există o corelație puternică, pozitivă și liniară.

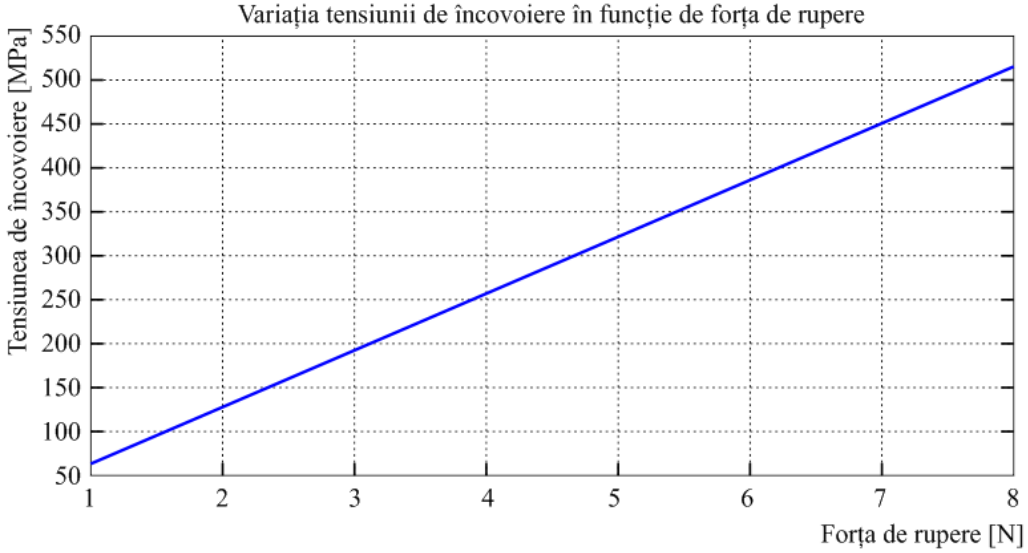


Fig. 5.59. Variația tensiunii la încovoiere în funcție de forța de încărcare.

În mod asemănător, pentru graficul ilustrat în figura 5.60, s-a calculat coeficientul de corelație (0,870763) ceea ce conduce la o corelație puternică, pozitivă, neliniară între cele două

şiruri de valori. Se poate observa că modulul de elasticitate creşte exponenţial până la valoarea critică a forţei de rupere după care suferă o descreştere liniară.

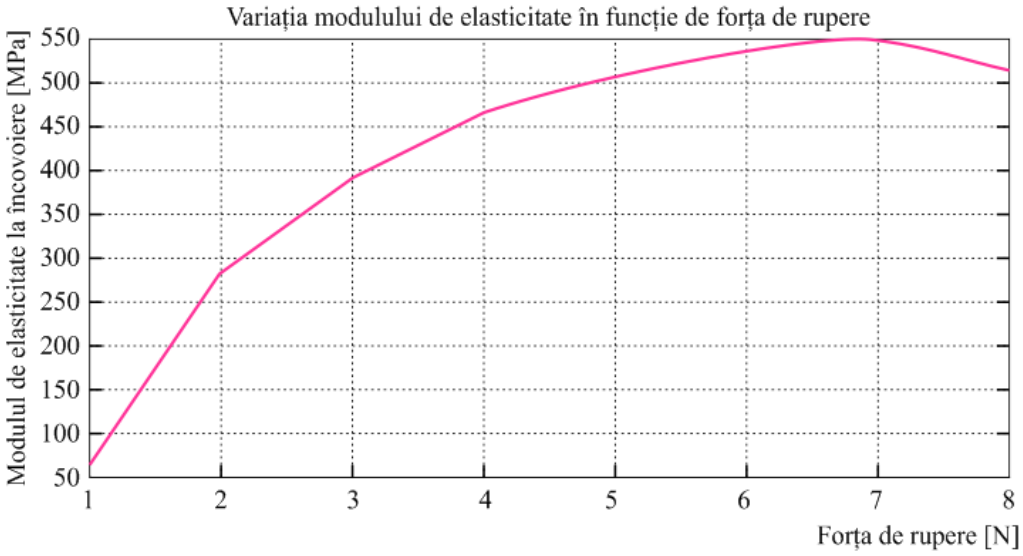


Fig. 5.60. Variaţia modulului de elasticitate la încovoiere în funcţie de forţa de încărcare.

Referitor la variaţia rigidităţii la încovoiere în timpul procesului de încovoiere în 4 puncte (fig. 5.61) se poate vedea că aceasta creşte exponenţial până când forţa de rupere atinge valoarea critică după care apare o descreştere liniară. Aplicând funcţiile predefinite din statistică s-a obţinut coeficientul de corelaţie pentru cele două serii de 0,870765 ceea ce rezultă că există o corelaţie puternică, pozitivă, neliniară între acestea.

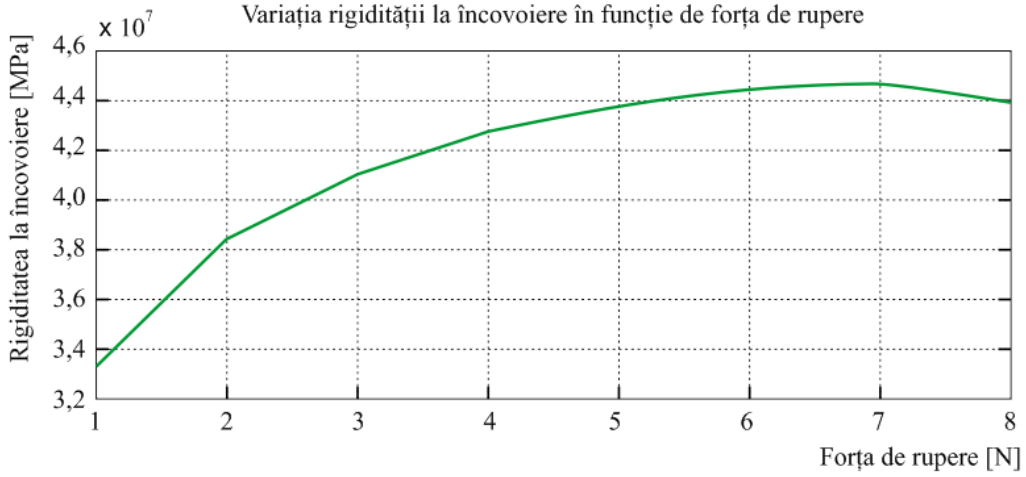


Fig. 5.61. Variaţia rigidităţii la încovoiere în funcţie de forţa de încărcare.

5.5.2. Rezultate pentru testul de încovoiere în 4 puncte cu utilizarea traductorilor acusticiici

Prin intermediul aplicației DC_2, prezentată anterior, s-au calculat valorile caracteristicilor mecanice ale materialului pentru epruveta D2. Acestea au fost centralizate în tabelul 5.8.

Tabel 5.8. Rezultate numerice ale variabilelor în cazul încovoierii în 4 puncte a epruvetei testate.

Forța *N*	**Tensiunea la încovoiere** *MPa*	**Rigiditatea la încovoiere** *MPa*	**Modulul de elasticitate** *MPa*
500,041	69,4363	$4{,}318387 \cdot 10^7$	41380
1000,05	138,868	$4{,}489989 \cdot 10^7$	43024,3
1500	208,292	$4{,}586378 \cdot 10^7$	43948
2000,03	277,727	$4{,}646584 \cdot 10^7$	44524,9
2500,04	347,159	$4{,}675658 \cdot 10^7$	44803,5
3000,03	416,588	$4{,}678301 \cdot 10^7$	44828,8
3500,15	486,035	$4{,}675633 \cdot 10^7$	44803,2
3894,7	540,823	$4{,}548063 \cdot 10^7$	43580,0

Pe baza datelor din tabel s-au trasat curbele de variație a tensiunii de încovoiere în funcție de forța de rupere (Fig. 5.62), variația modulului de elasticitate în funcție de forța de rupere (Fig. 5.63) și variația rigidității în funcție de forța de rupere (Fig. 5.64).

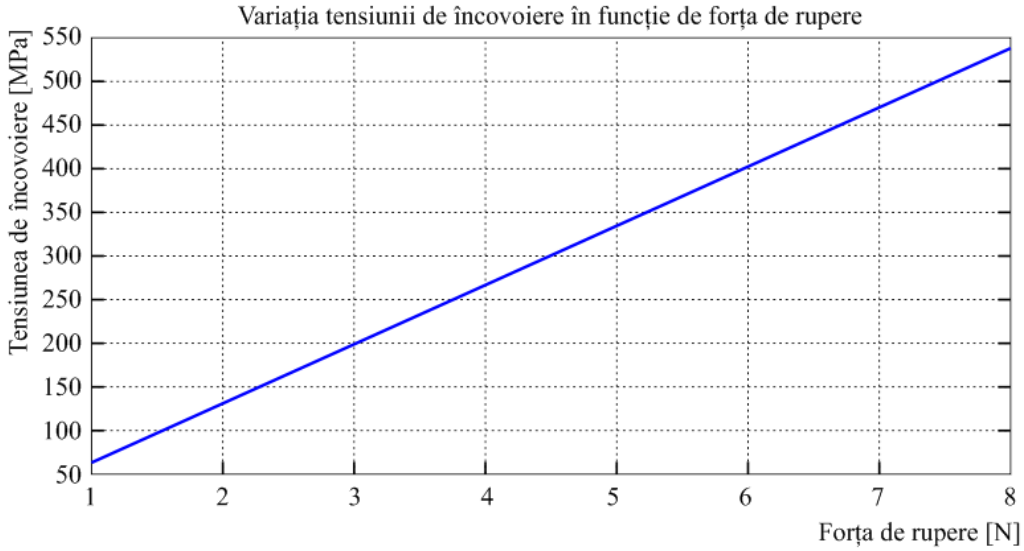


Fig. 5.62. Variația tensiunii la încovoiere în raport cu forța de rupere.

Analizând graficul din figura 5.62 se poate observa ca tensiunea de încovoiere are o variație ascendentă liniară; cu cât crește forța de rupere va crește și tensiunea de încovoiere. Efectuând calculele s-a obținut valoarea $r \cong 1$ pentru coeficientul de corelație Pearson ceea ce semnifică că există o corelație puternică, pozitivă și liniară între valorile forței de rupere și cele ale tensiunii de încovoiere.

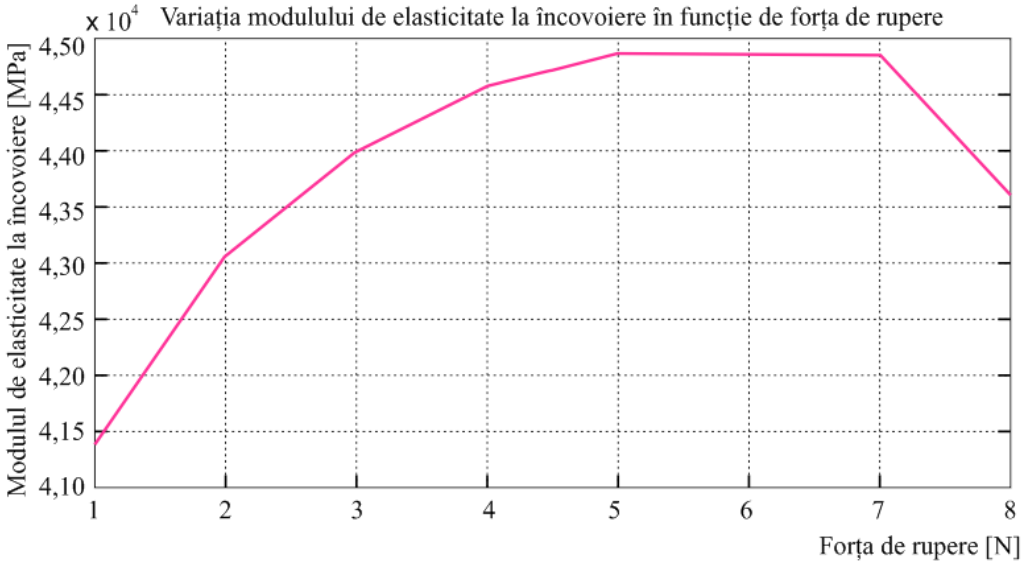


Fig. 5.63. Variația modulului de elasticitate în funcție de forța de rupere.

În cazul variației modulului de elasticitate se poate observa că acesta crește cu creșterea forței până la o anumită valoare (momentul critic), are o stabilizare aproape liniară după care acesta scade liniar. Scăderea modulului de elasticitate după ce forța de rupere a atins pragul maxim se poate explica prin apariția plasticității materialului odată cu apariția și propagarea microfisurilor. S-au utilizat funcțiile predefinite pentru analiza statistică și a rezultat un coeficient de corelație, r = 0,6753 ceea ce arată o corelație moderată, pozitivă și neliniară între cele două serii de valori.

Conform graficului din figura 5.64 și în cazul variației rigidității la încovoiere, se poate observa că va exista o creștere exponențială până în punctul critic după care apare un moment de stabilizare în jurul valorii de $4{,}675 \cdot 10^7$ MPa. Din acest moment curba caracteristică va suferi o descreștere liniară. Această scădere a valorii rigidității este absolut normală deoarece după apariția microfisurilor și a delaminării materialul își pierde treptat rigiditatea. Și în acest caz s-a obținut un coeficient de corelație de (r = 0,6755) ceea ce rezultă că există o corelație moderată, pozitivă și neliniară între cele două serii de valori. Și pentru acest caz de încovoiere s-a realizat un calcul al energiei totale, elastice și disipate (fig. 5.65). Spre deosebire de testarea epruvetei D1

se poate constata că în acest caz cantitatea de energie disipată este aproape inexistentă. Acest lucru este posibil deoarece încercarea a fost oprită înainte de ruperea completă a epruvetei urmărindu-se doar apariția și propagarea defectului, ci nu distrugerea completă.

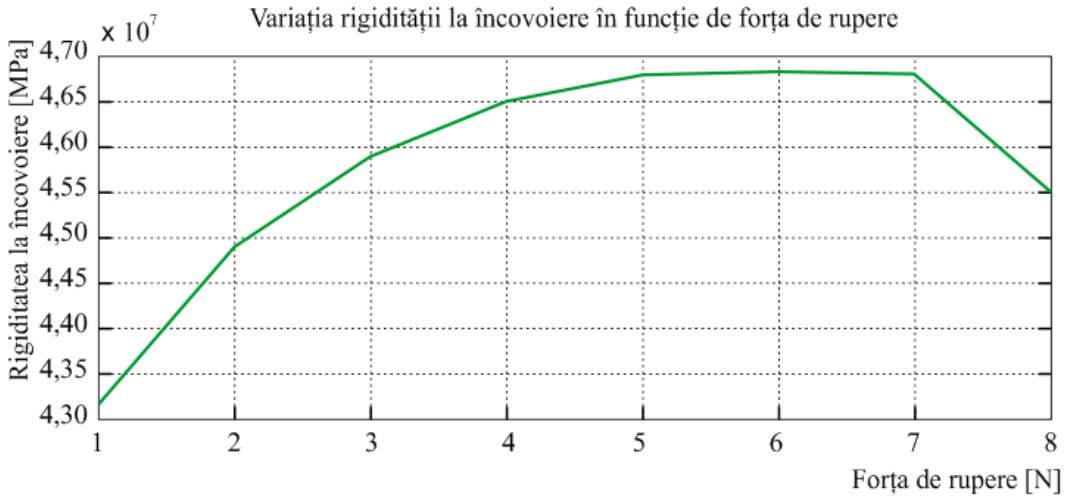


Fig. 5.64. Variația rigidității în funcție de forța de rupere.

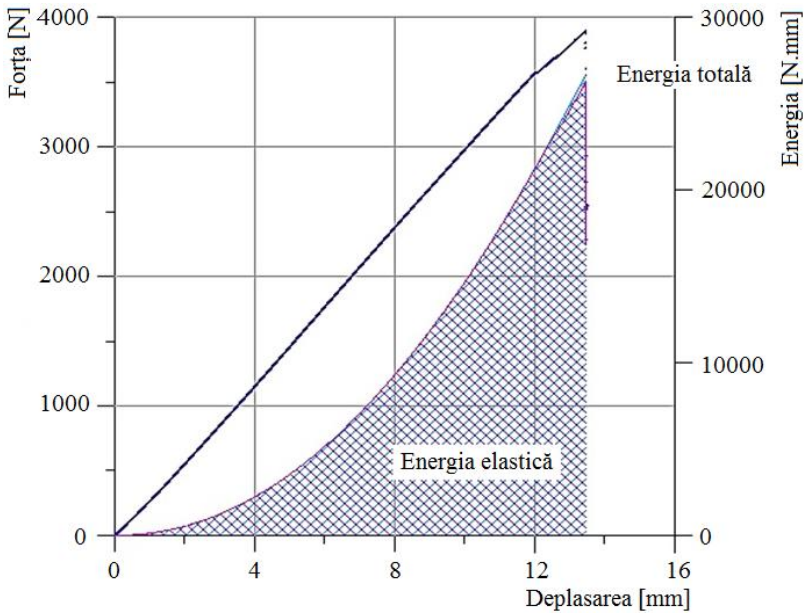


Fig. 5.65. Reprezentarea grafică a forței de rupere, energiei totale, energiei elastice și energiei disipate în funcție de forța de rupere.

S-a efectuat un calcul al caracteristicilor mecanice pentru cazul epruvetei D2 utilizând metoda pantei. Valoarea pantei a fost extrasă prin trasarea unei tangente la curba caracteristică forță – deplasare. Calculul pantei s-a realizat prin intermediul programului Grapher 7, care este specializat în trasarea de grafice avansate si calcul matematic.

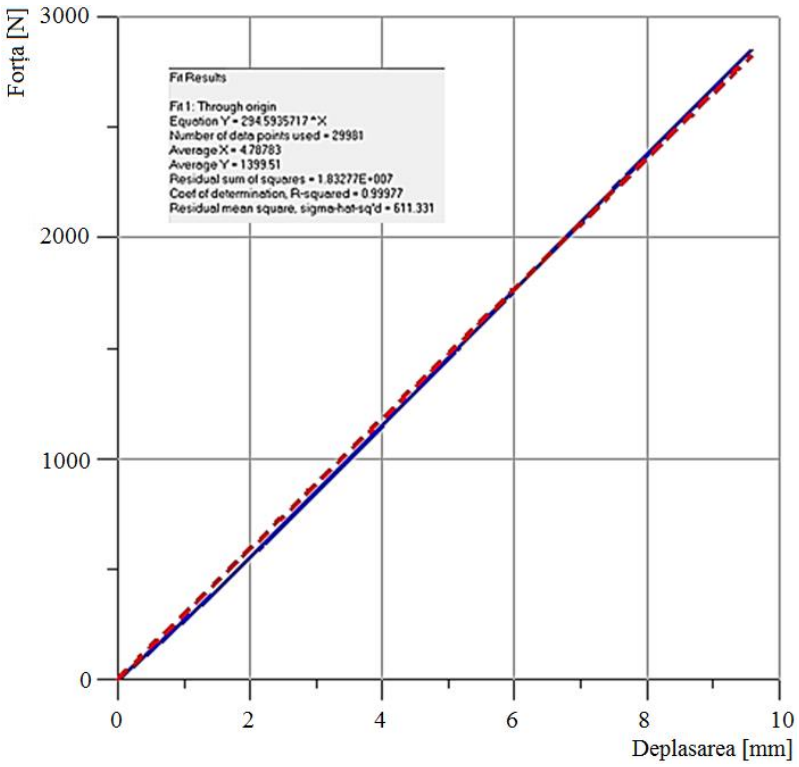


Fig. 5.66. Trasarea pantei F/δ necesare în calculul modulului de elasticitate la încovoiere al epruvetei D2.

Pentru calculul caracteristicilor de rezistență ale materialului epruvetei D2 s-a utilizat aplicația LabVIEW, DC_2, dezvoltată anterior. Ca rezultate numerice s-au obținut valorile: σ_{max} = 540,823 MPa – pentru tensiunea maximă de încovoiere, E = 44388,4 MPa – pentru modulul de elasticitate la încovoiere și R_i = 4,63234·10^7 MPa. Comparativ cu rezultatele obținute prin metoda forței și a deplasării la mijlocul epruvetei se constată că diferențele sunt minore.

5.5.3. Rezultate pentru încercarea la tracțiune

Afișarea rezultatelor ultimelor 6 valori ale caracteristicilor mecanice ale materialului este ilustrată în figura 5.67. Se poate observa că pentru cazul epruvetei testate rezistența maximă la tracțiune nu a depășit valoarea admisibilă. Acest lucru este absolut normal deoarece încercarea la tracțiune a fost oprită înainte de ruperea finală a epruvetei.

Utilizând aplicația DC_4 s-au calculat atât rezistențele la tracțiune cât și elongațiile specifice în 12 puncte esențiale (valorile acestora au fost extrase din curba caracteristică forță – deplasare) ale încercării. Rezultatele obținute s-au centralizat în tabelul 5.9.

Ținându-se cont de rezultatele din tabelul de mai sus și utilizând programul specific ORIGIN s-au trasat graficele de variație a rezistenței de tracțiune în funcție de forța de rupere (Fig. 5.68) și variația elongației specifice în funcție de forța de rupere (Fig. 5.69).

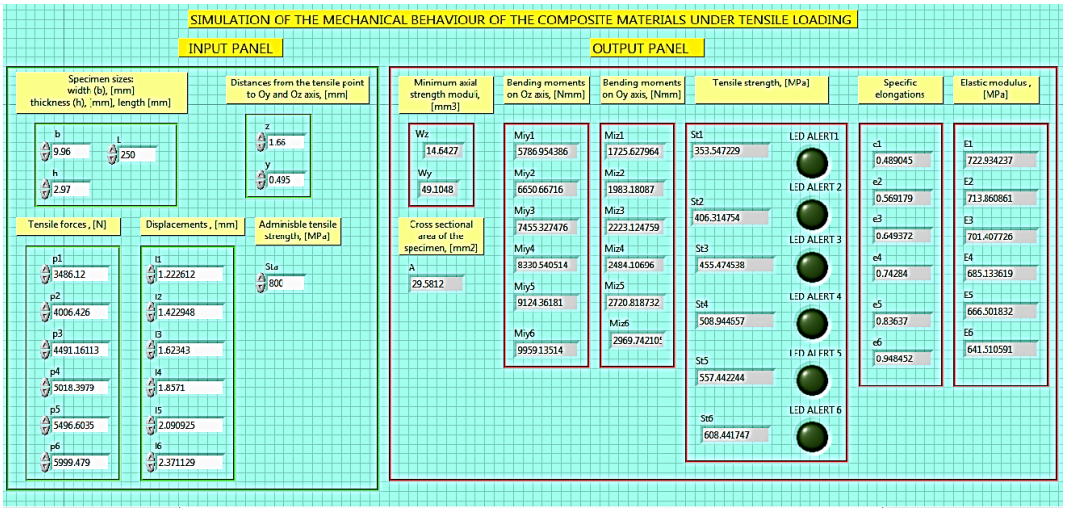


Fig. 5.67. Afișarea rezultatelor finale ale calculului la tracțiune excentrică pentru epruveta testate.

Tabel 5.9. Rezultate numerice ale variabilelor în cazul tracțiunii a epruvetei testate.

Forța *N*	**Rezistența la tracțiune** *MPa*	**Modulul elastic la tracțiune** *MPa*	**Elongația specifică la tracțiune** %
484,6278	49,148905	427,407053	0,114993
1050,5080	106,538071	586,08376	0,18178
1507,128	152,846538	649,901939	0,235184
2011,3004	203,977567	690,731019	0,295307
2494,5947	252,991228	711,734711	0,355457
3009,5668	305,217517	722,873289	0,422228
3486,1171	353,547229	722,934237	0,489045
4006,426	406,314754	713,860861	0,569179
4491.1611	455,474538	701,407726	0,649372
5018,3979	508,944657	685,133619	0,742284
5496,6035	557,442244	666,501832	0,83637
5999,4790	608,441747	641,510591	0,948452

Utilizând funcțiile predefinite din Microsoft Excel pentru analiza statistică s-a calculat coeficientul Pearson (de corelație) pentru cele trei curbe obținute. Conform graficului din figura 5.68 și în urma calculelor coeficientului de corelație ($r \cong 1$) se poate afirma că între cele două serii de valori există o corelație puternică, pozitivă și liniară. Creșterea forței de rupere aplicată asupra epruvetei va determina creșterea rezistenței la tracțiune a materialului epruvetei.

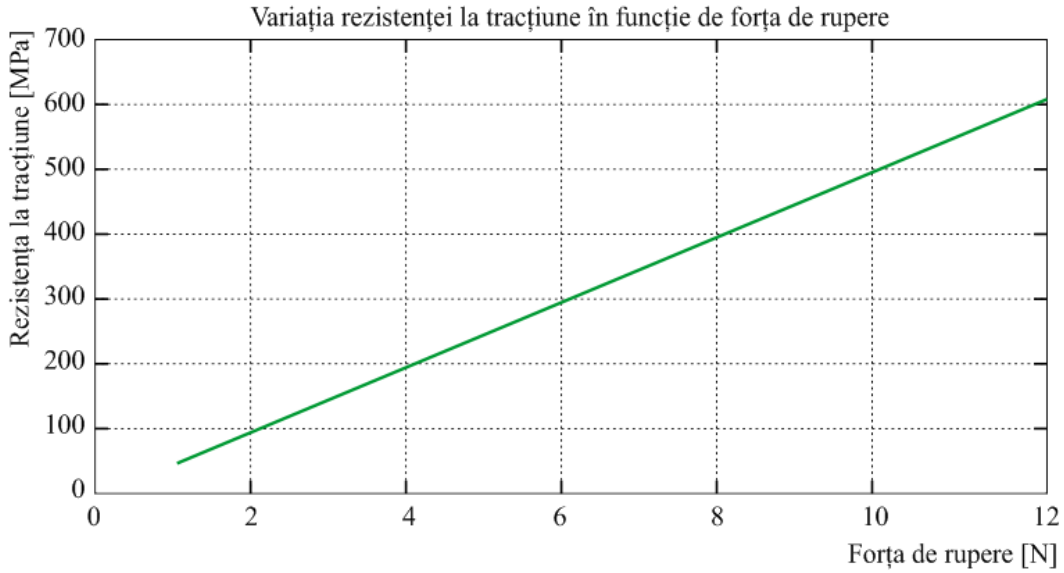


Fig. 5.68. Variația rezistenței la tracțiune în funcție de forța de rupere.

Analizând graficul din figura 5.69 și ținând cont de valoarea coeficientului de corelație (r = 0,994) se poate spune că între cele două șiruri de valori corelația este putenică, pozitivă dar neliniară. Creșterea forței de rupere va determina creșterea exponențială a elongației specifice.

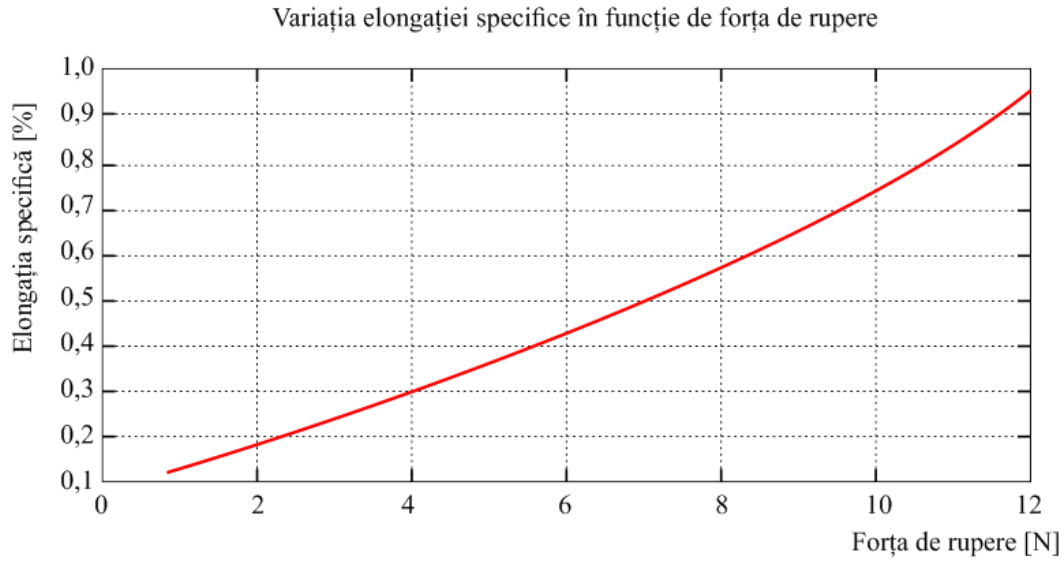


Fig. 5.69. Variatia alungirii specifice la tracțiune în funcție de forța de rupere aplicată.

Graficul din figura 5.70 ilustrează variația modulului de elasticitate la tracțiune în funcție de forța de rupere aplicată. În urma calculelor coeficientului de corelație (r = 0,493) și analizând graficul se poate constata că între cele două serii de valori există o corelație slabă și neliniară. Valoarea modulului de elasticitate crește exponențial până în momentul când se produce prima fisură în material după care începe să scadă exponențial.

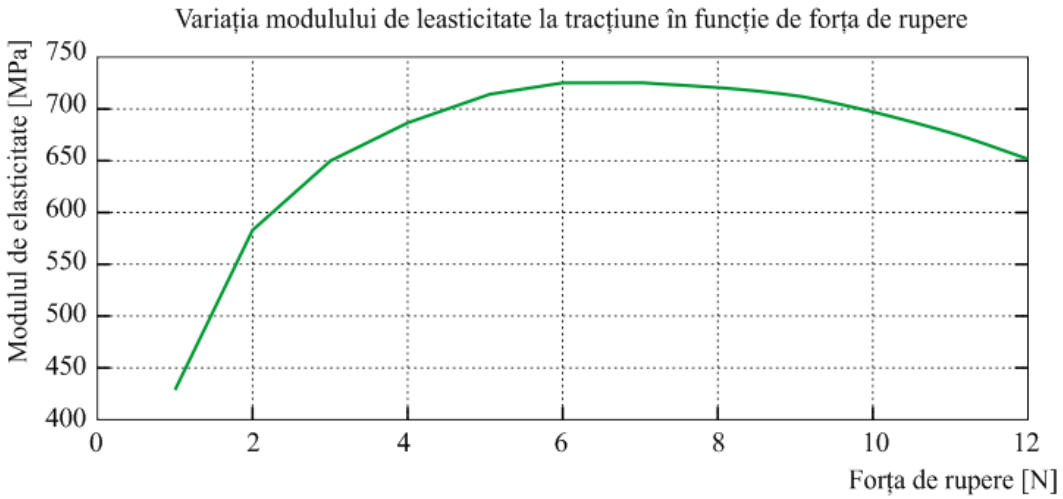


Fig. 5.70. Variația modulului de elasticitate la tracțiune în funcție de forța de rupere.

De asemenea, utilizând valorile deplasărilor pe direcție longitudinală și transversală oferite de traductorii tensometrici s-a calculat valoarea coeficientului lui Poisson care reprezintă raportul între alungirea laterală și longitudinală a epruvetei:

$$\nu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta \ell}{\ell}}. \qquad (5.7)$$

Pentru calcule s-au utilizat funcțiile predefinite din Microsoft Excel și s-a obținut o valoare medie de 0,3944.

5.5.4. Analiza rezultatelor de la termografia în infraroșu

5.5.4.1. Încercarea la încovoiere în 4 puncte

Cu ajutorul programului ALTAIR s-a realizat o analiză a variațiilor de temperatură înainte și după producerea defectului. Astfel în figurile 5.71 și 5.72 sunt ilustrate hărțile termice înainte și după realizarea încercării la tracțiune. Analizând hărțile termice se poate observa că temperatura maximă a epruvetei în stare inițială (înainte de experiment) a fost 16,61°C iar după efectuarea experimentului a ajuns la 17,50°C.

În figura 5.73 este ilustrată harta termică a zonei de apariție și propagare a delaminării. Urmărind hărțile termice ale zonelor de interes se poate observa că odată cu apariția defectului în material există o ușoară creștere a temperaturii maxime (de la 16.61 °C pentru epruveta în stare inițială la 16.63 °C pentru epruveta cu defect).

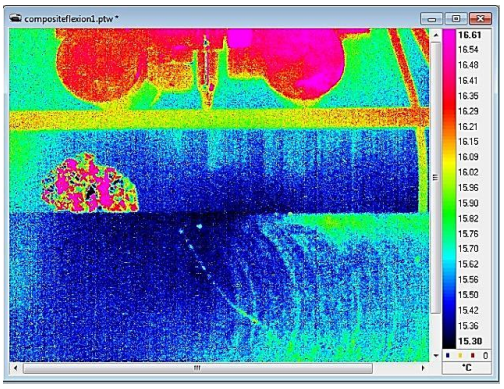


Fig. 5.71. Harta termică epruvetei inainte de încercarea la încovoiere – faza inițială.

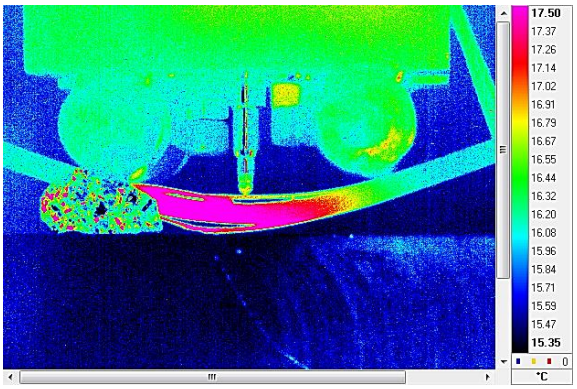


Fig. 5.72. Harta termică epruvetei după de încercarea la încovoiere – faza finală.

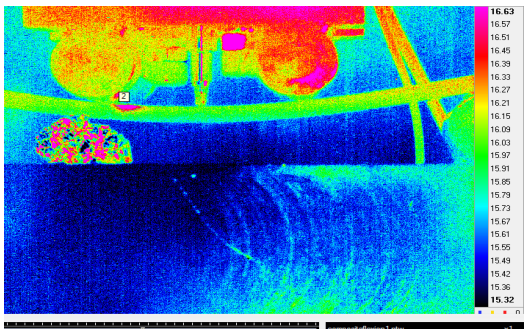
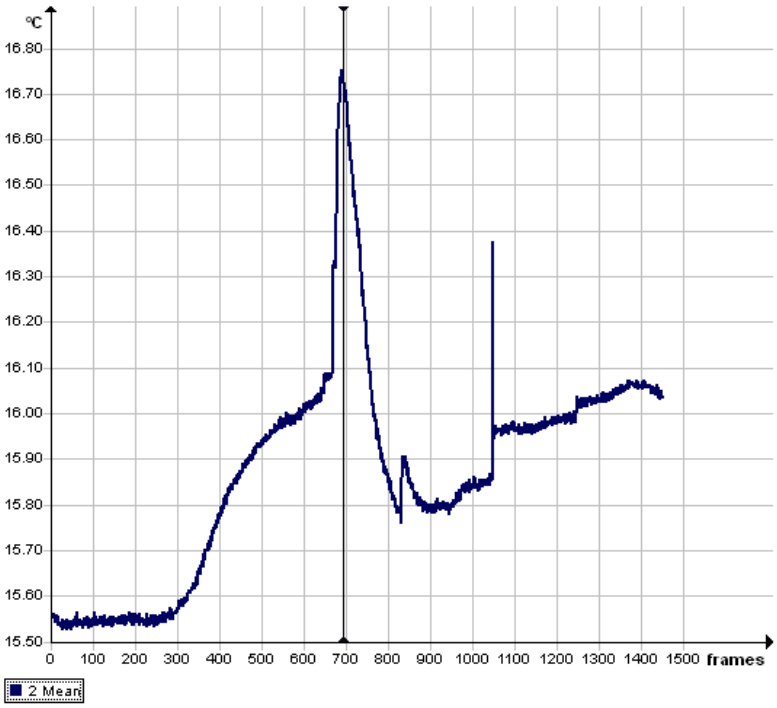


Fig. 5.73. Harta termică a zonei critice înainte de producerea primei fisuri.



5.74. Variația temperaturii medii în timp în zona 2.

În graficul din figura 5.74 este ilustrată curba de variație a temperaturilor medii în zona de producere a microfisurii.

Pe măsură ce epruveta se încovoaie, defectul din zona critică (Fig. 5.73) se mărește semnificativ, propagându-se spre zona centrală a epruvetei, în dreptul dispozitivului de apăsare situat între cele două role (Fig. 5.75).

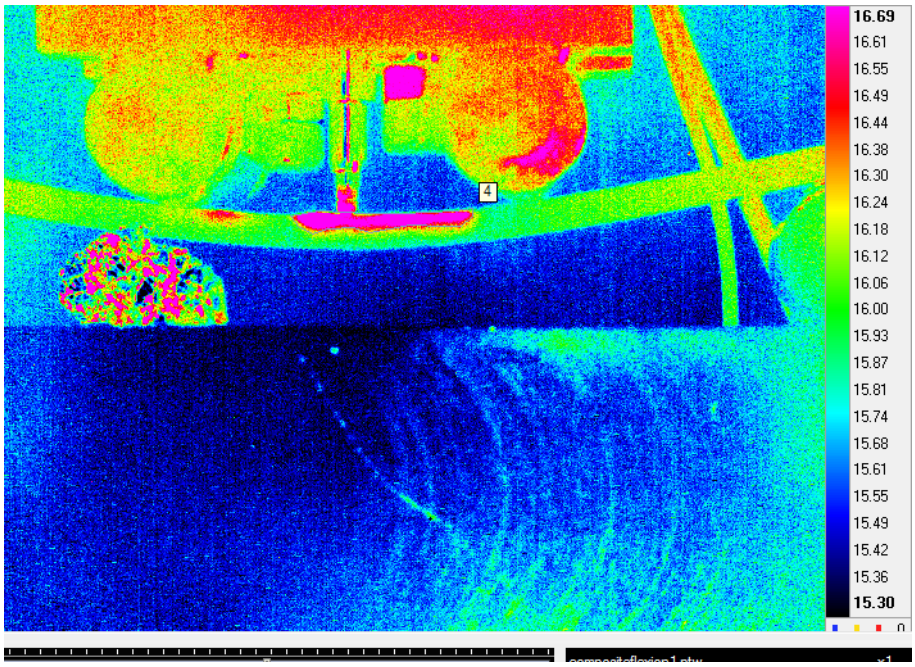


Fig. 5.75. Harta termică a epruvetei la producerea unei fisuri în material.

Modul de propagare a fisurii în zona din centrul epruvetei este ilustrată foarte sugestiv în Fig. 5.75. Comparând valoarea temperaturii maxime din starea inițială cu cea din timpul apariției fisurii se poate observa o ușoară creștere (de la 16.61 °C la 16.69 °C). Deci pe măsură ce defectul se propagă (crește suprafața acestuia), temperatura din zona afectată va începe să crească treptat.

Valoarea maximă a temperaturii în timpul experimentului a fost atinsă exact în momentul apariției delaminării (Fig. 5.76). Astfel, datorită forței de rupere, apar tensiuni în interiorul materialului ceea ce conduc la creșterea temperaturii acestuia și implicit la dezlipirea straturilor de fibră de carbon.

În Fig. 5.76 este ilustrată harta termică a zonei în care s-a produs delaminarea. Se poate observa, că datorită ruperii fibrelor, apare un gol între straturi și implicit o valoare mai redusă a temperaturii (16.6 °C). De asemenea, în zona rolelor de apăsare se pot observa mici arii care au temperatură mai ridicată, acestea fiind date de particulele de material după ce s-a produs delaminarea.

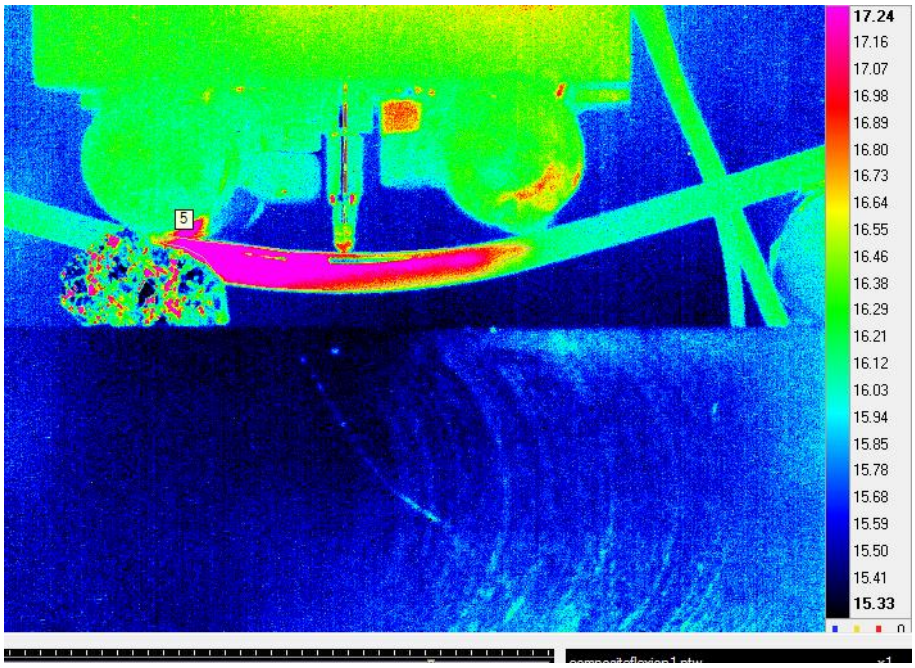


Fig. 5.76. Harta termică a epruvetei la producerea delaminării în material.

Curba variațiilor temperaturii medii din zona selectată este ilustrată în figura 5.77. Analizând graficul se poate observa un maxim al temperaturii medii de aproape 20 °C.

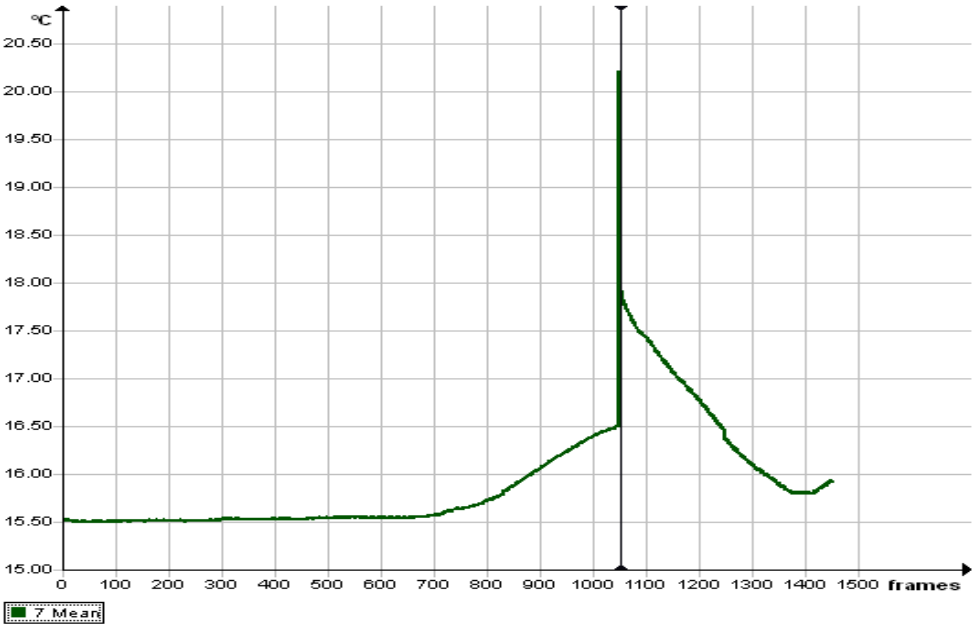
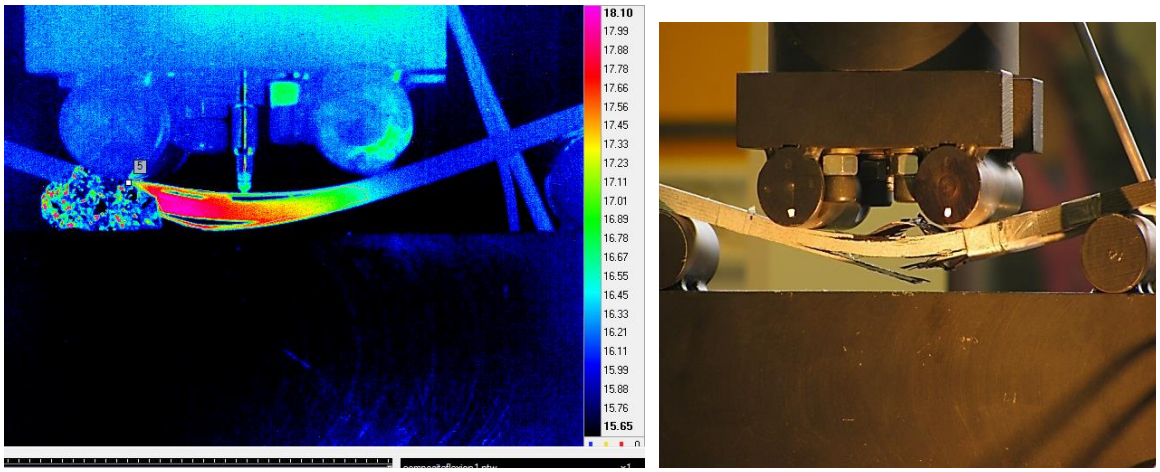


Fig. 5.77. Variația temperaturii medii în zona cu delaminare.

Momentul ruperii finale a epruvetei este ilustrat în figura 5.78. Se pot vedea, de asemenea, pe harta emisiei de temperatură zone în care temperatura este foarte scăzută. Acestea apar datorită ruperii straturilor de la suprafața materialului (delaminării totale).



a) b)

Fig. 5.78. Starea finală a epruvetei după efectuarea experimentului: harta variației de temperatură (a), imagine a epruvetei dupa finalizarea experimentului (b).

5.5.4.2. Rezultate obținute în urma încercarii la tracțiune

Cu ajutorul programului ALTAIR s-a realizat o analiză a variațiilor de temperatură înainte și după producerea defectului. Astfel în figurile 5.79 și 5.80 sunt ilustrate hărțile termice înainte și după realizarea încercării la tracțiune. Analizând hărțile termice se poate observa că temperatura maximă a epruvetei în stare inițială (înainte de experiment) a fost 17.18 °C iar după efectuarea experimentului a ajuns la 18.47 °C.

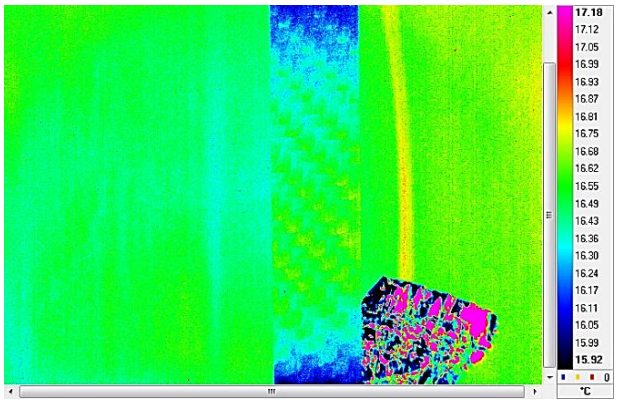


Fig. 5.79. Harta termică epruvetei inainte de încercarea la tracțiune – faza inițială.

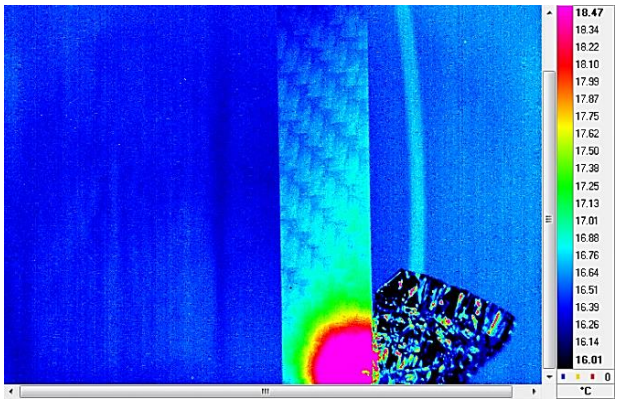


Fig. 5.80. Harta termică epruvetei după încercarea la tracțiune – faza finală.

În figurile 5.81 și 5.82 sunt ilustrate hărțile termice ale zonelor de apariție și propagare a delaminării. Urmărind hărțile termice ale zonelor de interes se poate observa că odată cu apariția delaminării există și o reducere a temperaturii maxime (de la 17.18 °C pentru starea inițială la 16.81 °C pentru epruveta cu delaminare).

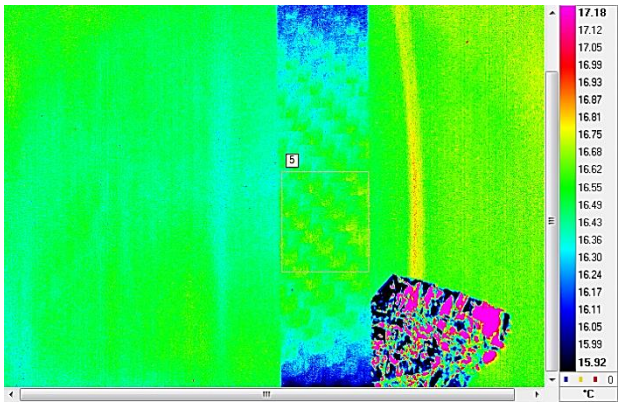


Fig. 5.81. Harta termică a epruvetei in zona de delaminare – momentul inițial.

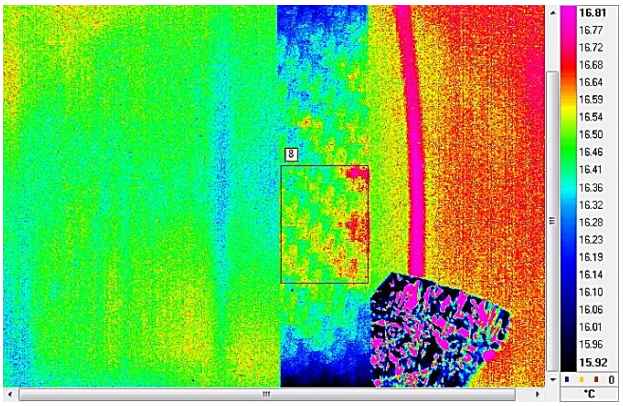


Fig. 5.82 Harta termică a epruvetei in zona de delaminare – faza finală.

Cu ajutorul uneltelor programului ALTAIR s-au trasat graficele de variație a temperaturii medii în timp (Fig. 5.83 și Fig. 5.84) înainte și după producerea delaminării.

Pentru realizarea acestui lucru s-a selectat o zonă de pe suprafața epruvetei (considerată critică) și s-au trasat curbele de variație a temperaturii pentru cele două cazuri.

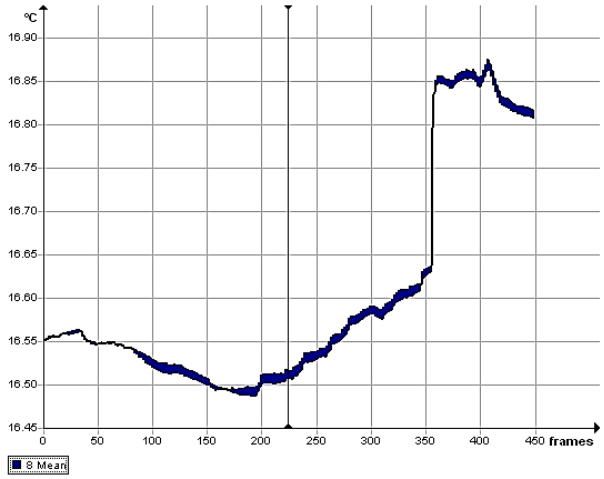


Fig. 5.83. Variația temperaturilor medii in zona de delaminare – momentul inițial.

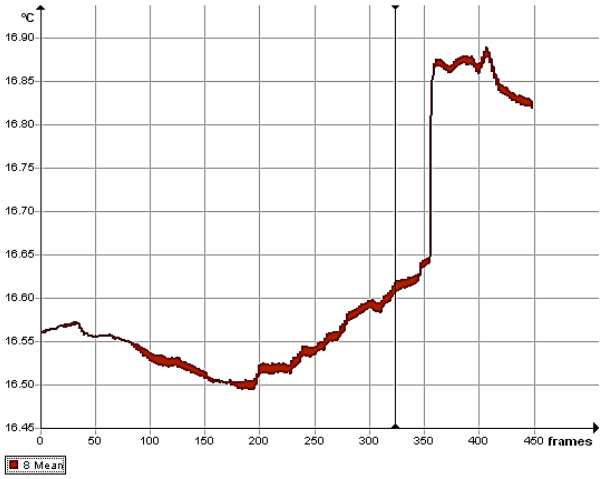


Fig. 5.84. Variația temperaturilor medii in zona de delaminare – etapa finală.

Urmând același procedeu s-au trasat curbele de variație a temperaturilor maxime la suprafața epruvetei în zona delimitată înainte de producerea delaminării (Fig. 5.85) și după delaminare (Fig. 5.86).

Se poate observa că înainte de producerea delaminării temperatura din zona selectată scade după care crește până la ruperea finală.

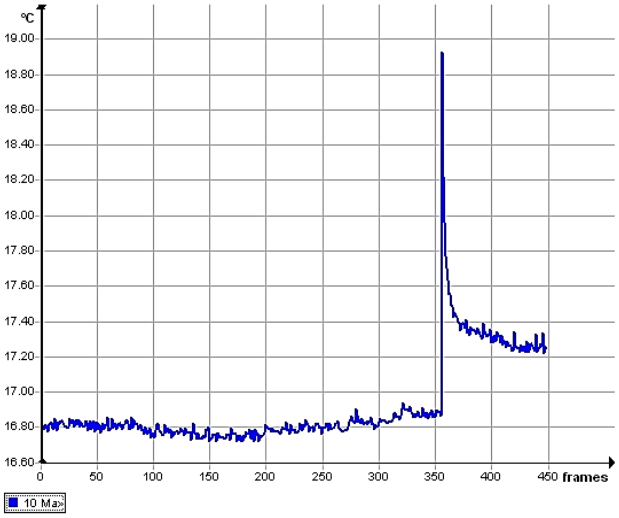


Fig. 5.85. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – momnetul inițial.

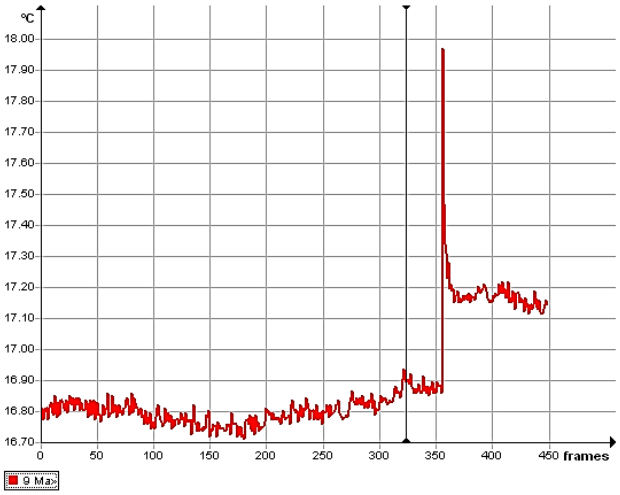


Fig. 5.86. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – etapa finală.

Acest fenomen se poate observa foarte clar și figura 5.87 care reprezintă variația temperaturilor maxime înainte (marcat cu albastru) și după (marcat cu roșu) apariția delaminării epruvetei de material compozit. Conform graficului se poate observa că temperatura maximă variază cu o frecvență foarte ridicată.

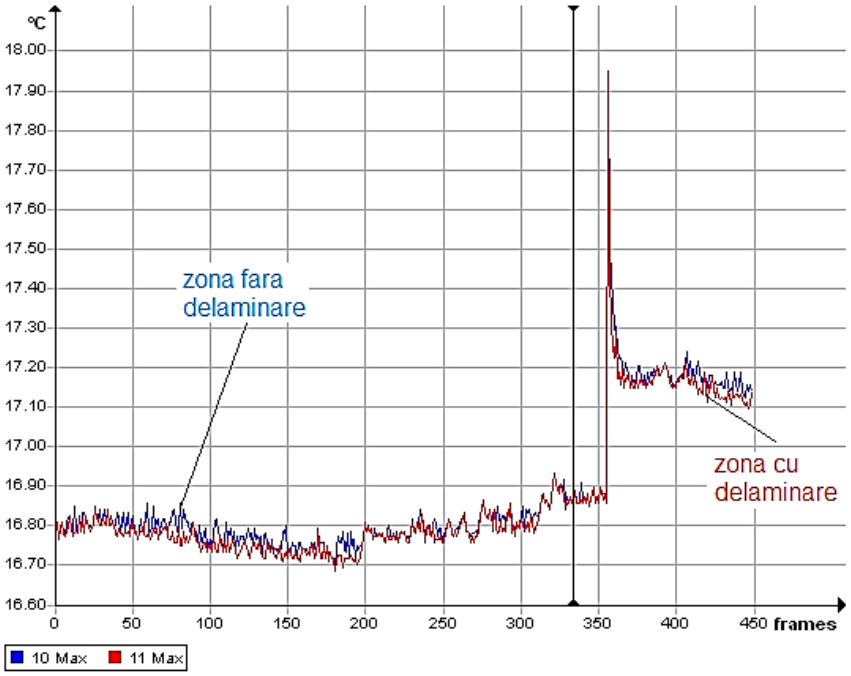


Fig. 5.87. Variația temperaturilor maxime înainte și după producerea delaminării.

S-a analizat și cazul producerii fisurii epruvetei. În acest caz, conform hărților termice obținute înainte de producerea experimentului (Fig. 5.88) și după finalizare acestuia (Fig. 5.89)

se poate observa o creștere a temperaturilor pe zona selectată. Astfel înainte de efectuarea tracțiunii temperatura maxima la suprafața epruvetei a avut valoarea de 17,18°C iar după producerea fisurii temperatura a atins valoarea de 18,47°C.

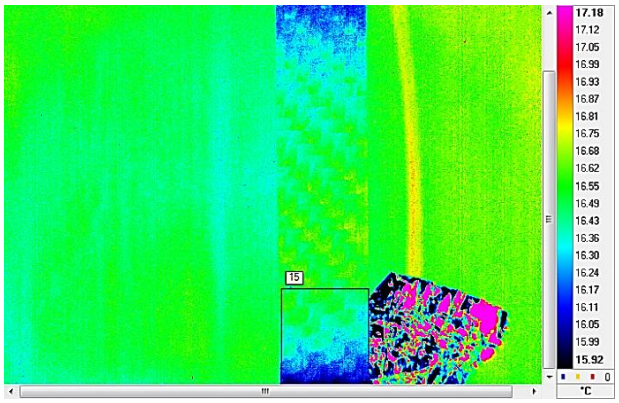


Fig. 5.88. Harta termică a epruvetei in zona de rupere (aria critică) – momentul inițial.

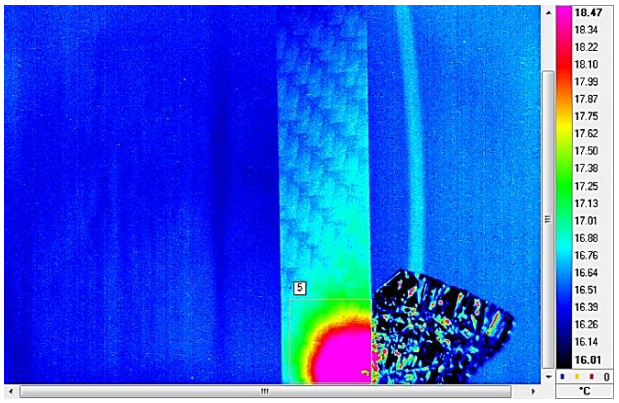


Fig. 5.89. Harta termică a epruvetei in zona de rupere – faza finală.

S-au calculat temperaturile medii pe zona selectată și astfel s-au obținut graficele de variație a temperaturilor medii înainte (Fig. 5.90) și după producerea defectului (Fig. 5.91).

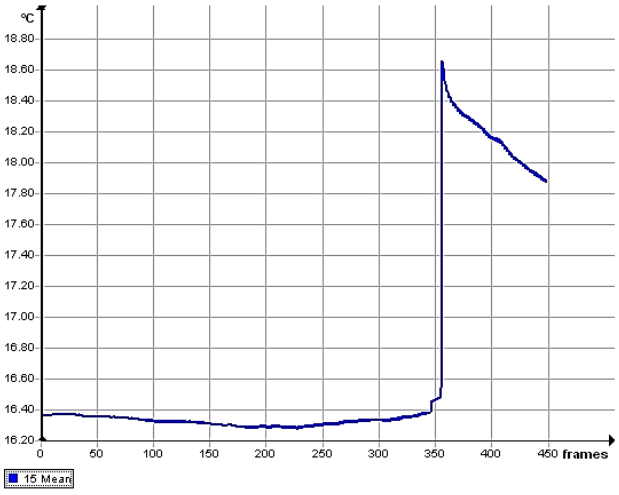


Fig. 5.90. Variația temperaturilor medii in zona de rupere (aria critică) – inițial.

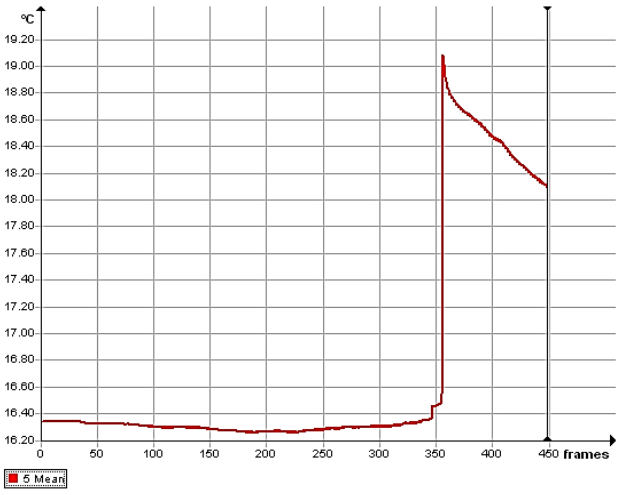


Fig. 5.91. Variația temperaturilor medii in zona de rupere – etapa finală.

În acest caz se observă o scădere a temperaturii medii pe zona delimitată până la producerea defectului după care temperatura crește brusc până la ruperea totală.

Figurile 5.92 și 5.93 reprezintă variația temperaturii maxime la suprafața epruvetei în zona critică, în stare inițială (fără defect) și după producerea fisurii. Comparativ cu cazul delaminării unde temperatura variază frecvent, în cazul producerii fisurii, temperatura suferă variații foarte

mici și descrește lent până la producerea delaminării după care crește brusc până atinge valoarea critică. Acest fenomen este ilustrat foarte concis în figura 5.94.

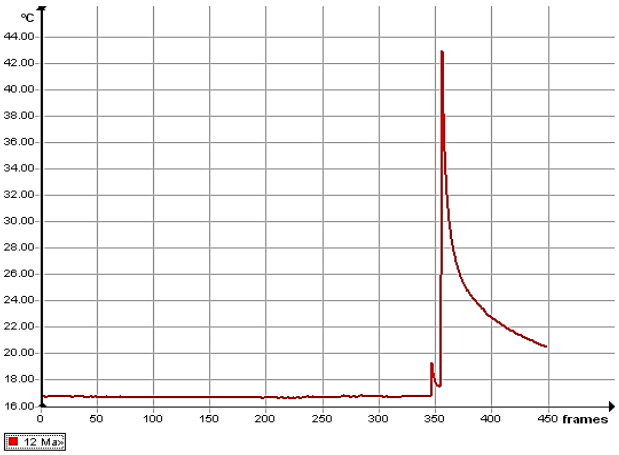


Fig. 5.92. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – inițial.

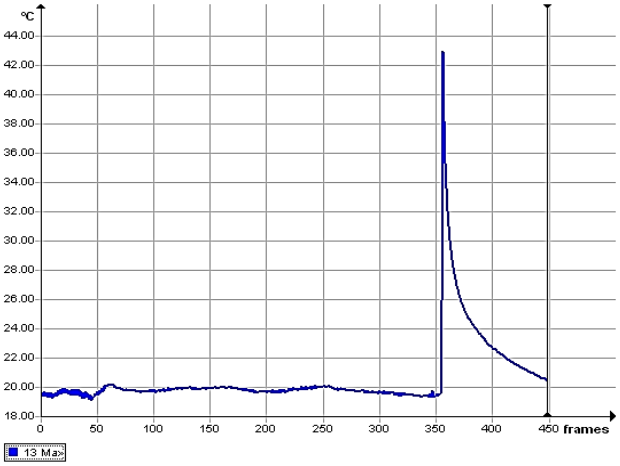


Fig. 5.93. Variația temperaturilor maxime in zona de delaminare – etapa finală.

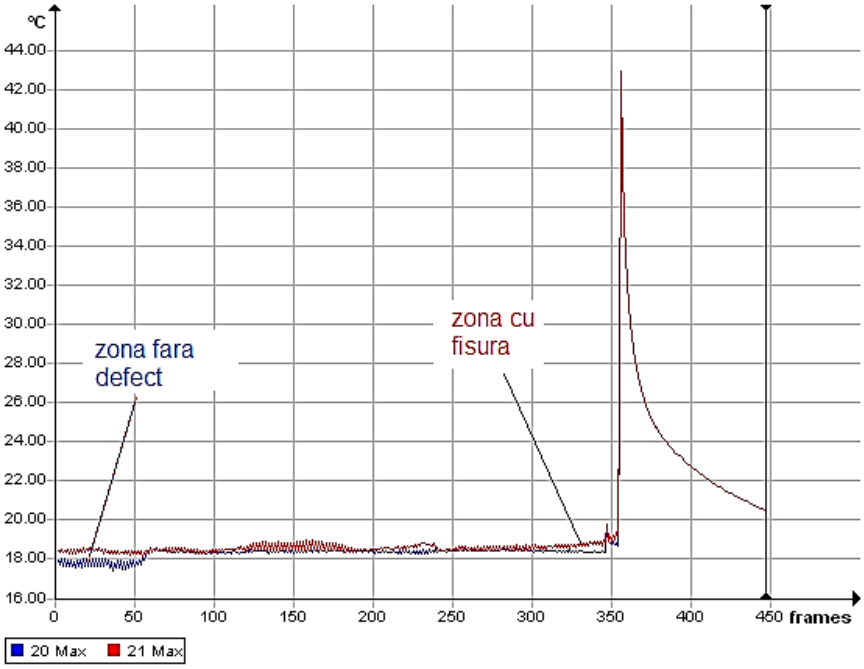


Fig. 5.94. Variația temperaturilor maxime înainte și după producerea fisurii.

5.5. ANALIZA MULTICRITERIALĂ PE BAZA SOLUŢIILOR SELECTATE PENTRU COMPARAREA CELOR 3 SISTEME DE DETECTARE A DEFECTELOR UTILIZATE

Tehnicile multicriteriale de analiză au următoarele caracteristici generale [Dodgson e.al, 2009]:

- fac explicite variantele și contribuția acestora la satisfacerea diverselor criterii de decizie;
- utilizează un sistem de ponderi explicite pentru criteria;
- se bazează pe capacitatea de judecată a celui care ia deciziile.

Analiza multicriterială stabilește o ierarhizare a variantelor prin referirea la o mulțime explicită de obiective care au fost identificate și pentru care s-au stabilit anumite criterii măsurabile de evaluare a gradului de îndeplinire a acestora, oferint totodată mai multe modalități de agregare a datelor referitoare la criterii pentru obținerea indicatorilor globali de performanță pentru fiecare variantă în parte.

Caracteristica de bază a analizei multicriteriale este accentul pus pe puterea de judecată a decidentului la stabilirea obiectivelor și criteriilor, estimarea ponderilor relative pentru evaluarea contribuției fiecărei variante la îndeplinirea fiecărui criteriu.

Analiza criterială a constat în parcurgerea a 5 etape, respectiv:

- stabilirea criteriilor;
- determinarea ponderii fiecărui criteriu;
- identificarea tuturor variantelor;
- acordarea unei note;
- calcularea produselor dintre notele N şi coeficientul de pondere.

5.5.1. Stabilirea criteriilor:

În prima etapă a acestei analize s-au stabilit care sunt criteriile pentru o metodă avansată de detectare a defectelor din structuri. Aceste criterii sunt:

- Preţul sistemului de detectare a defectelor (criteriul P);
- Precizia de detectare (criteriul R);
- Facilitatea de aplicare a sistemului de detectare a defectelor (criteriul F);
- Siguranţa în funcţionare (criteriul S);
- Nivelul de detectare a defectelor (criteriul N);
- Marja de eroare (criteriul E);
- Gradul de integrabilitate în interiorul materialelor (criteriul G).

5.5.2. Determinarea ponderii fiecărui criteriu

Această etapă se finalizează prin calculul unor coeficienţi de pondere. Astfel, se alcătuieşte un tabel pătratic, în care se trec atât pe linii cât şi pe coloane denumirea criteriilor selectate în prima etapă. În acest tabel se compară fiecare criteriu, unul cu celălalt, trecându-se în căsuţele corespunzătoare o serie de valori care reprezintă importanţa criteriului ales în comparaţie cu celelalte.

Coeficienţii de pondere se calculează cu formula FRISCO, astfel [Bobancu, 2012]:

$$\gamma_i = \frac{p + \Delta p + m + 0{,}5}{-\Delta p' + \frac{N_{crt}}{2}}, \tag{5.8}$$

unde: p este suma punctelor obţinute pe linie de elementul luat în calcul; Δp este diferenţa dintre punctajul elementului luat în calcul şi punctajul elementului de la ultimul nivel; m este numărul criteriilor depăşite de către criteriul luat în calcul; N_{crt} este numărul de criterii considerat şi $\Delta p'$ este diferenţa dintre punctajul elementului luat în calcul şi punctajul primului element.

Pentru efectuarea calculelor coeficientului de pondere s-a creat o aplicație DC_5 utilizând mediul de programare grafic – LabVIEW (Fig. 5.95). Astfel, s-au efectuat calculele pentru cazul considerat iar valorile au fost introduse în tabelul 5.10.

Tabel 5.10. Calculele asociate coeficienților de pondere.

	P	**R**	**F**	**S**	**N**	**E**	**G**	**Puncte**	**Nivel**	**Pondere**
P	1	0	0	0	0	0	1	**2**	**5**	**1.42**
R	1	1/2	0	1/2	0	1	0	**3**	**4.5**	**2**
F	1	1	1/2	0	0	0	1/2	**3**	**4.5**	**2**
S	0	1/2	1	1/2	1	1	1/2	**4.5**	**1**	**5**
N	1	1	1	0	1/2	0	1/2	**4**	**2.5**	**3.33**
E	1	0	1	0	1	1/2	0	**3.5**	**3**	**2.5**
G	0	1	1/2	1/2	1/2	1	1/2	**4**	**2.5**	**3.33**

5.5.3. Identificarea tuturor variantelor

Având în vedere că în acest caz se compară cele trei metode de detectare a defectelor aplicate în cadrul testărilor mecanice, variantele vor fi:

- Varianta (a): metoda de detectare a defectelor prin utilizarea mărcilor tensometrice;
- Varianta (b): metoda de detectare a defectelor prin utilizarea senzorilor acustici;

- Varianta (c): metoda de detectare a defectelor prin utilizarea termografiei IR.

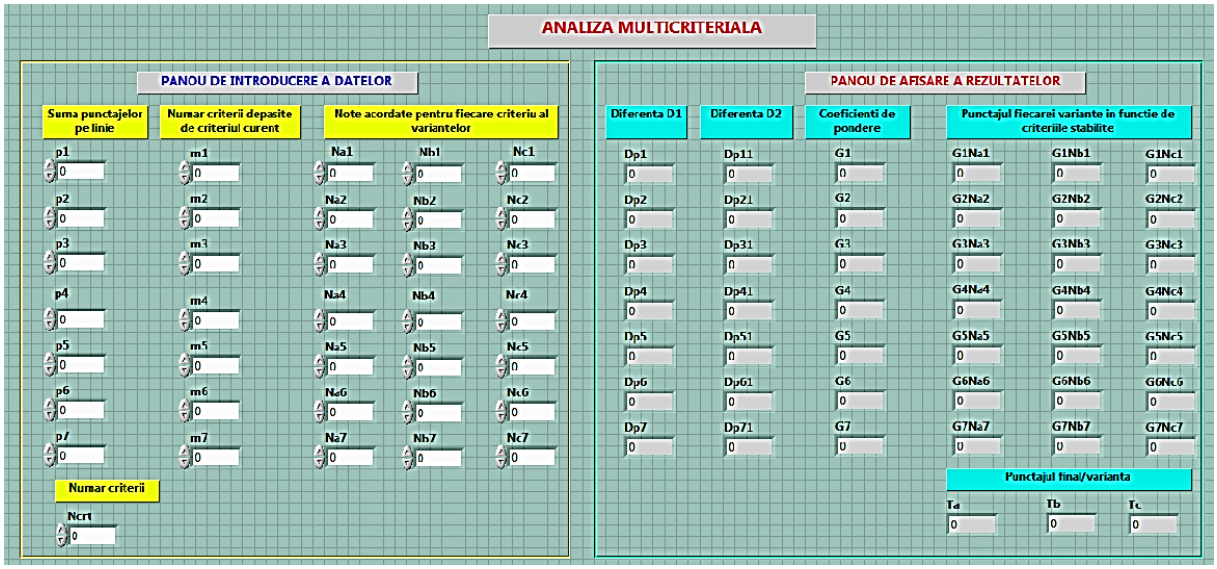


Fig. 5.95. Panoul aplicației de realizare a analizei multicriteriale – program DC_5.

Aplicația, prezentată detaliat în figurile 5.96. 5.97, 5.98 permite calculul tuturor indicatorilor necesari unei analize multicriteriale. Introducerea datelor în program se face utilizând panoul de introducere a datelor (situat în partea stângă a interfeței grafice) iar afișarea rezultatelor se face în panoul din partea dreaptă. Deoarece datele de intrare sunt foarte multe s-a preferat să se utilizeze o structură de programare secvențială tip Stacked.

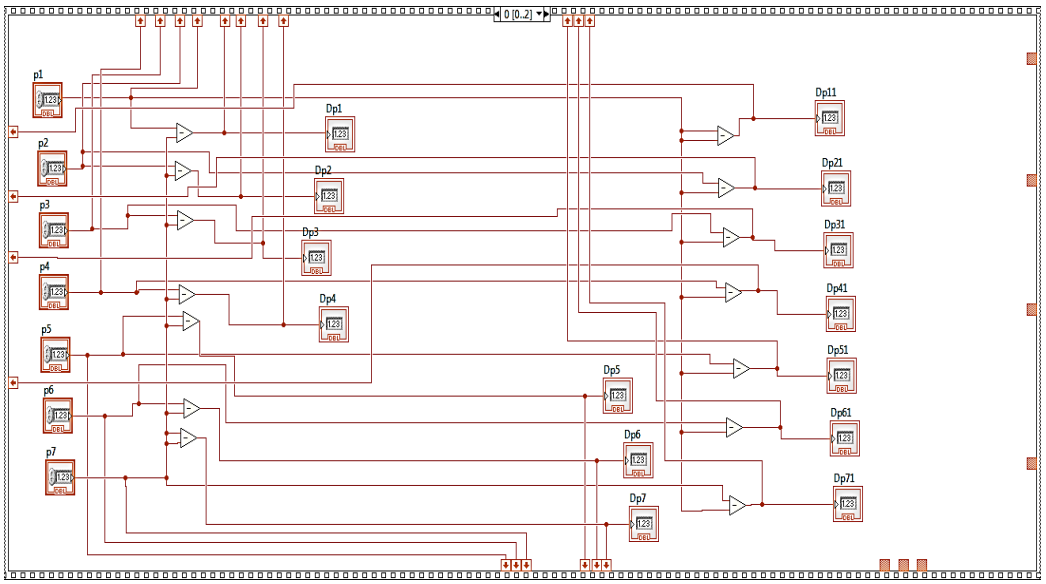


Fig. 5.96. Codul grafic (diagrama) al aplicației de realizare a analizei multicriteriale – secvența 1 (program DC_5).

Codul sursă conține atât controale și indicatoare de tip numric cât și o serie de operatori matematici de tip scădere. Secvențele 2 și 3 ale programului conțin o serie de structuri de

programare tip Formula Node unde relațiile de calcul sunt inserate în limbaj C. Cea de-a treia secvență conține trei structuri de programare - Formula Node – dar și 3 operatori matematici elementari pentru calcule compuse (adunare multiplă).

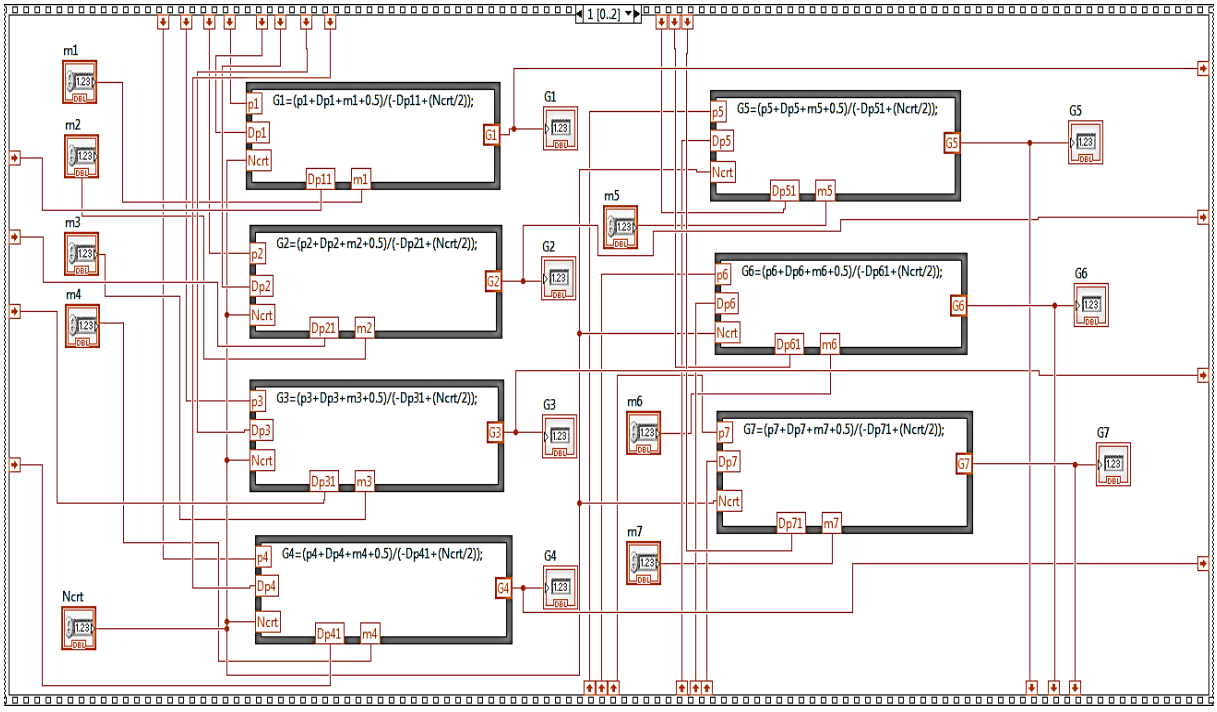


Fig. 5.97. Codul grafic (diagrama) al aplicației de realizare a analizei multicriteriale – secvența 2 (program DC_5).

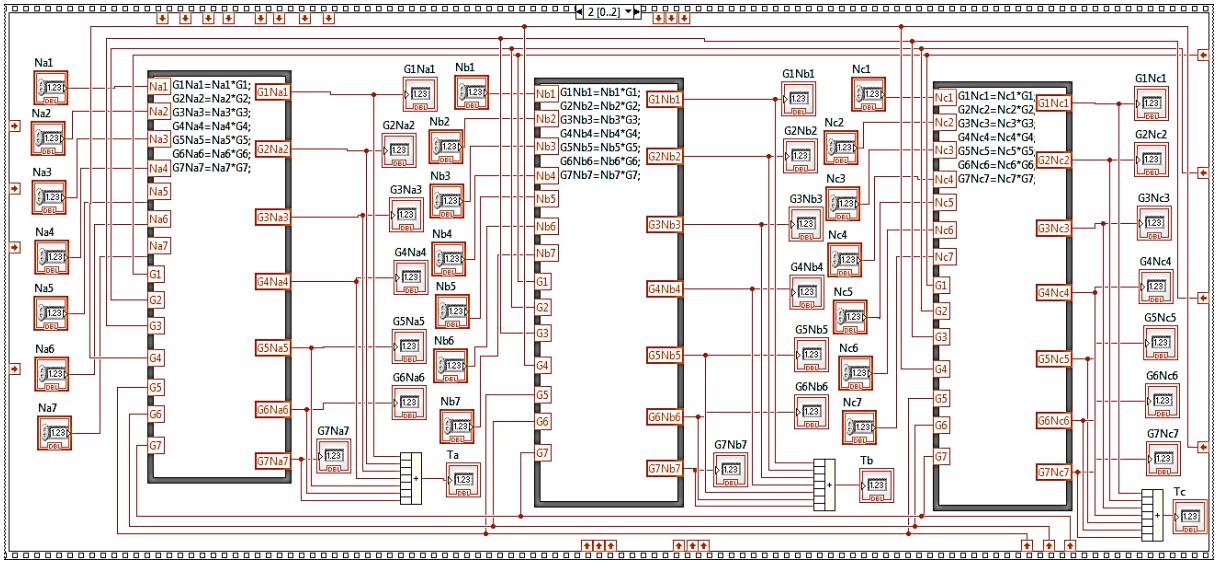


Fig. 5.98. Codul grafic (diagrama) al aplicației de realizare a analizei multicriteriale – secvența 3 (program DC_5).

5.5.4. Acordarea unei note

Nota se alege între 1 şi 10 (de altfel aceasta trebuie să fie un număr întreg) şi se acordă fiecărei variante, conform fiecărui criteriu. Notele vor fi trecute în tabelul 5.11.

Tabel 5.11. Notele acordate variantelor.

Criteriul	**Varianta** (a)	**Varianta** (b)	**Varianta** (c)
P	10	9	9
R	8	10	8
F	9	9	10
S	9	10	10
N	8	10	7
E	9	9	9
G	10	10	1

5.5.5. Calcularea produselor dintre notele N şi coeficientul de pondere

Acest calcul se realizează într-un tabel denumit matricea consecinţelor (Tabelul 5.12). Se vor realiza produsele dintre notele N şi coeficienţii de pondere calculaţi în tabelul 5.10. Toate calculele au fost efectuate utilizând programul DC_4.

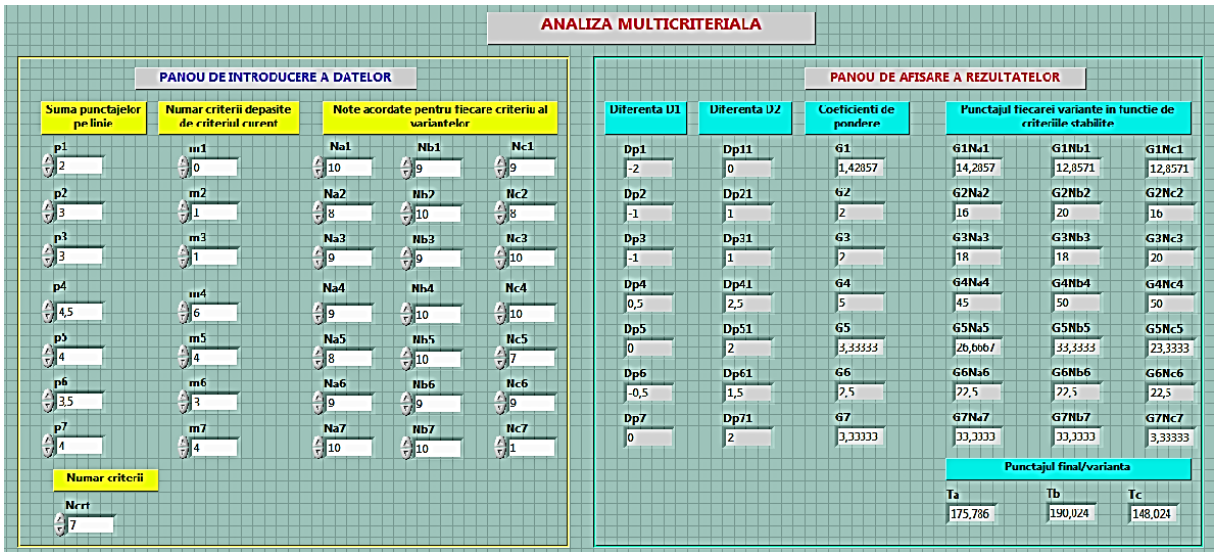


Fig. 5.99. Panoul programului DC_4 cu afişarea rezultatelor finale.

În urma rezultatelor numerice obţinute după efectuarea calculelor se poate afirma că metoda de detectare a defectelor prin utilizarea senzorilor acustici este de preferat a se aplica atunci când structura este în funcţionare, oferind totodată rezultate de precizie bună datorită

senzorilor care pot detecta apariția unei fisuri în profunzime. La ora actuală există o mare varietate de senzori acustici foarte performanți, o mare parte putând fi integrați direct în structura compozitului și au capacitatea de comunicație wireless. Deși precizia de detectare a defectului nu este atât de bună, și mărcile tensometrice sunt acceptate a se utiliza în cadrul unor sisteme de monitorizare a integrității structurale.

Tabel 5.12. Coeficienţii de pondere calculaţi.

Criteriul	γ_i	**Varianta** (a)		**Varianta** (b)		**Varianta** (c)	
		N_i	$N_i\,\gamma_i$	N_i	$N_i\,\gamma_i$	N_i	$N_i\,\gamma_i$
P	1,428	10	14,28	9	12,85	9	12,85
R	2	8	16	10	20	8	16
F	2	9	18	9	18	10	20
S	5	9	45	10	50	10	50
D	3,33	8	26,66	10	33,33	7	23,33
E	2,5	9	22,5	9	22,5	9	22,5
G	3,33	10	33,33	7	33,33	1	3,33
Total			175,78		190,02		148,04

Termografia IR este mai mult o metodă de control a calității structurii, neputând fi utilizată atunci când structura este în funcționare. Această tehnică nu are nicidecum precizia sistemelor care folosesc senzori acustici dar în oarecare măsură poate detecta unele defecte de suprafață.

5.5.6. Discuții

După cum s-a arătat pe parcursul acestui capitol, materialul epruvetei a avut un comportament diferit în zonele unde au fost plasați cei trei senzori acustici. Astfel, în figura 5.100 se poate observa că prima zonă critică apare în capătul din stânga al epruvetei, în zona senzorului S3. Se poate observa pe osciloscop că prima creștere în amplitudine o are semnalul provenit de la senzorul 3 (marcat cu albastru).

Harta termică a epruvetei din timpul experimentului dovedește acest lucru. Odată apărut în structura materialului, defectul se propagă spre centrul epruvetei după cum se poate vedea în imaginea termografică din partea dreaptă. De asemenea semnalul provenit de la senzorul 1 (situat în centrul epruvetei) , marcat cu culoare roz, crește în amplitudine depășind nivelul celorlalte două semnale.

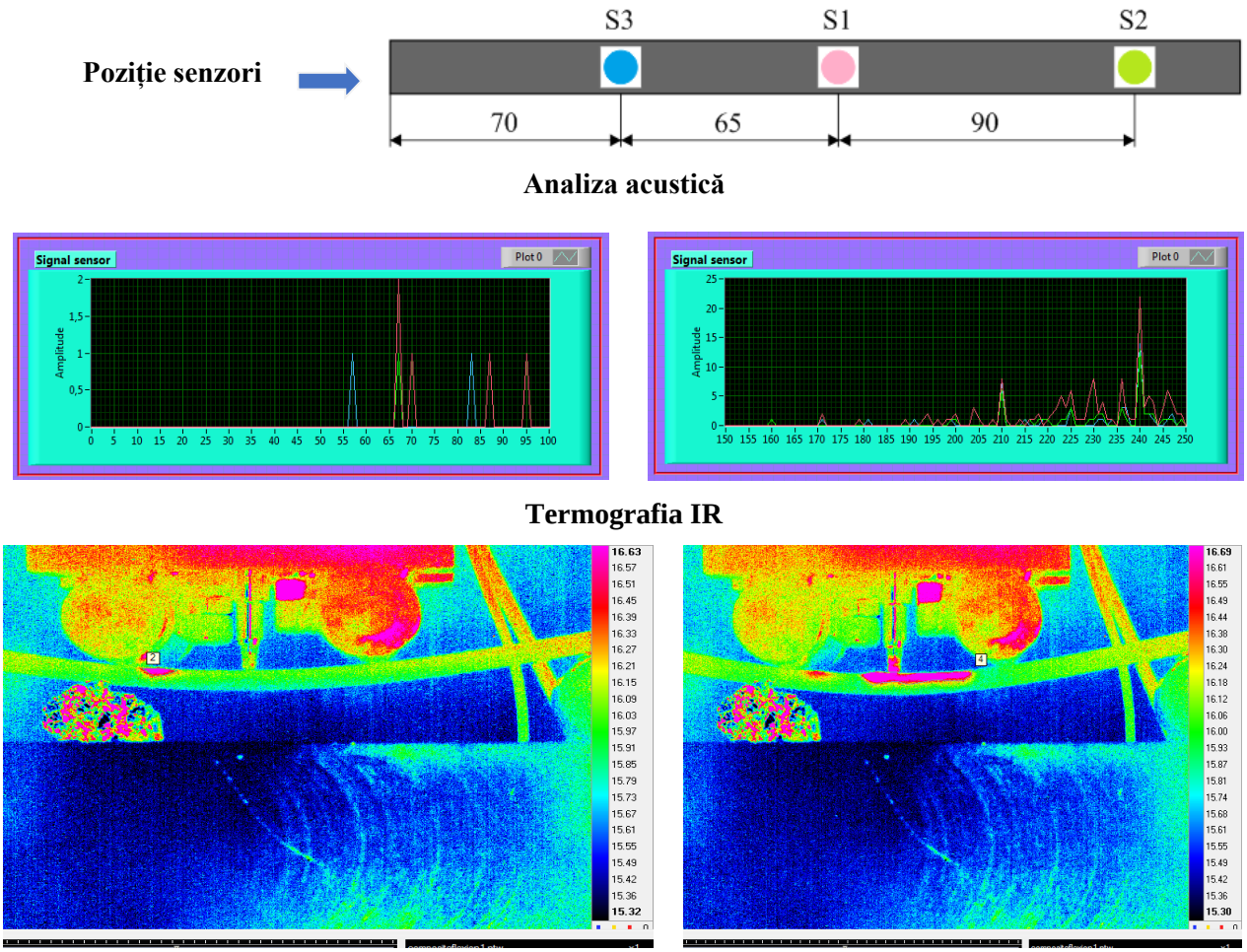


Fig. 5.100. Rezultate comparative obținute de la sistemul acustic și camera de termografie.

De asemenea, utilizând rezultatele numerice furnizate de programul DC_4, s-a construit graficul de reprezentare a evoluției magnitudinii medii pentru semnalele provenite de la cei trei senzori (fig. 5.101).

Consultând graficul se poate observa că magnitudinea medie a semnalului acustic obținut de la senzorul S1 depășește cu mult valorile magnitudinii semnalelor provenite de la senzorii S2 și S3.

Utilizând aceleași date numerice obținute în urma analizei spectrale, s-a trasat graficul de variație a magnitudinii semnalelor acustice furnizate de senzorii S1, S2 și S3. Pe grafic s-a marcat cu cu roșu evoluția amplitudinii semnalului provenit de la senzorul S1, cu verde este ilustrată variația amplitudinii semnalului de la S2 iar cu albastru este reprezentată variația amplitudinii semnalului furnizat de senzorul S3. Și acest grafic demonstrează că primul defect apărut în timpul experimentului este situat în zona S3 după care se propagă spre zona S1.

În zona senzorului S1 valorile devin critice și se produce ruperea epruvetei.

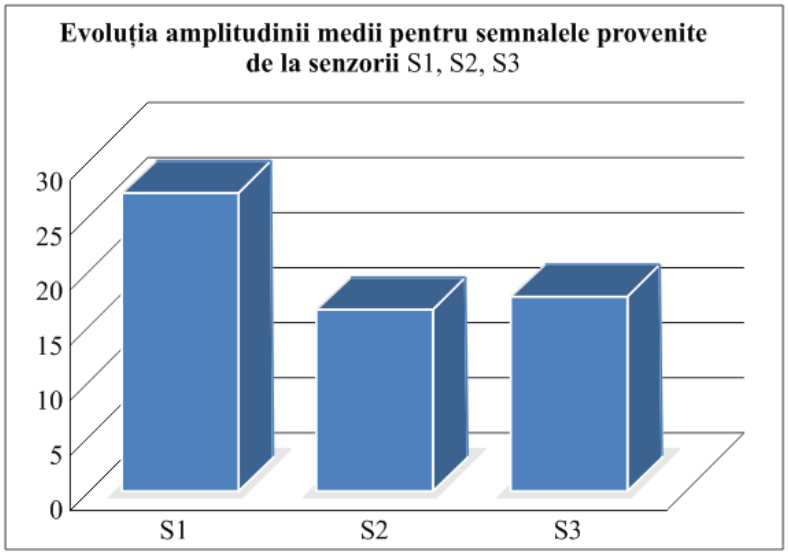


Fig. 101. Evoluția magnitudinii medii pentru cele trei semnale.

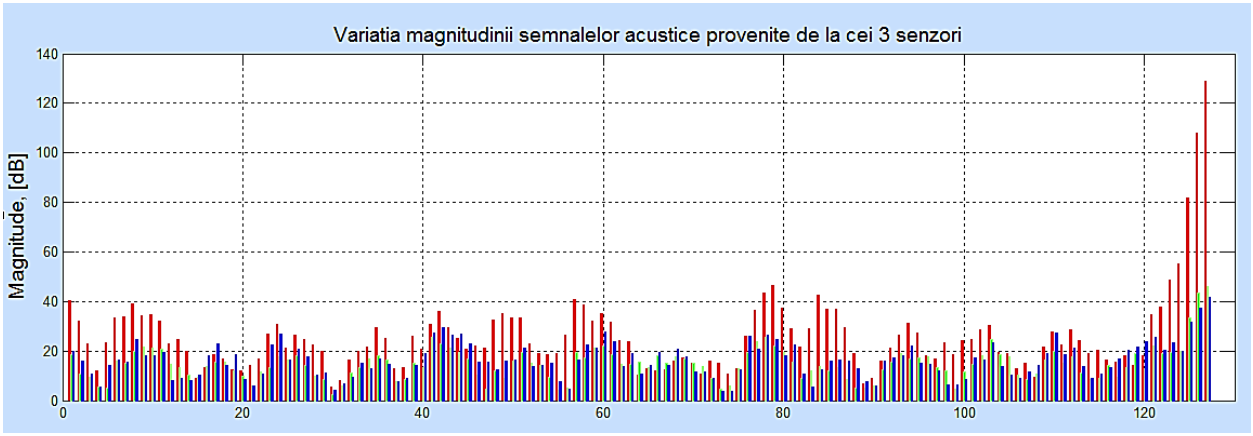


Fig. 5.102. Variația amplitudinii semnalelor acustice provenite de la cei 3 senzori.

Aplicarea metodei termografia IR a demonstrat că temperatura de la suprafața epruvetei variază în timpul experimentului în funcție de forța aplicată asupra epruvetei. Astfel, se poate observa în figura 5.103 că temperatura de la suprafața epruvetei crește odată cu apariția primului defect al materialului.

De asemenea, s-a realizat o comparație între datele obținute pe cale experimentală, în urma încercării la încovoiere în 4 puncte și rezultatele numerice obținute în urma simulării comportamentului unei epruvete din material compozit stratificat la încovoiere în 4 puncte.

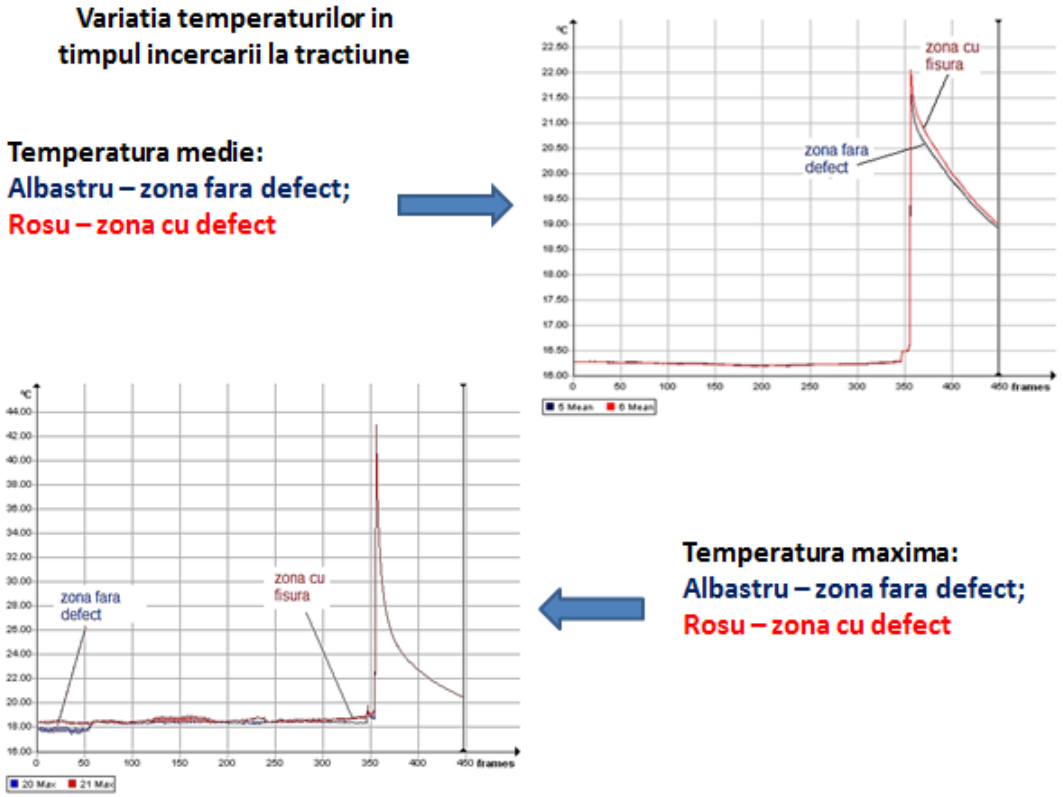


Fig. 5.103. Variația temperaturilor medii și maxime la suprafața epruvetei în timpul încercării la tracțiune.

În figura 5.104 sunt prezentate comparativ harta deformațiilor obținută în urma simulării, harta temperaturilor de la suprafața epruvetei furnizată de camera de termografie și imaginea epruvetei în faza finală de rupere. Astfel, se demonstrează încă o dată creșterea temperaturii în zona în care se produce un defect.

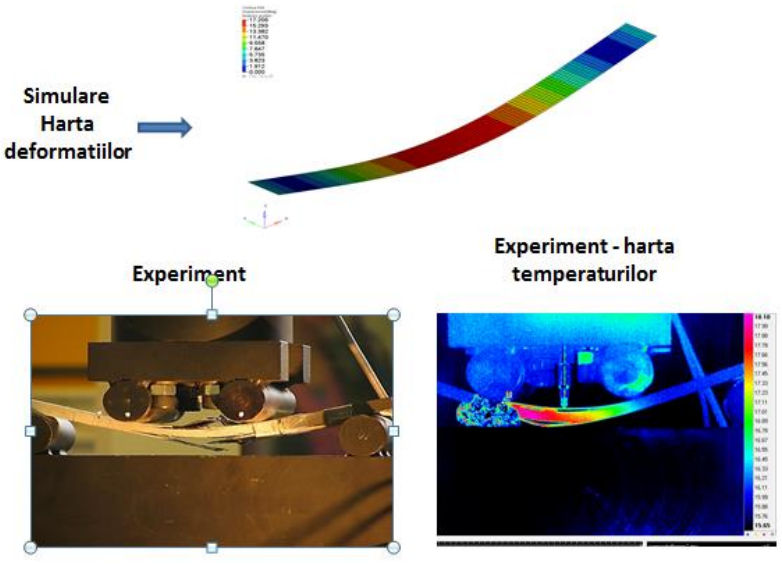


Fig. 5.104. Simulare vs. Experiment – validarea rezultatelor.

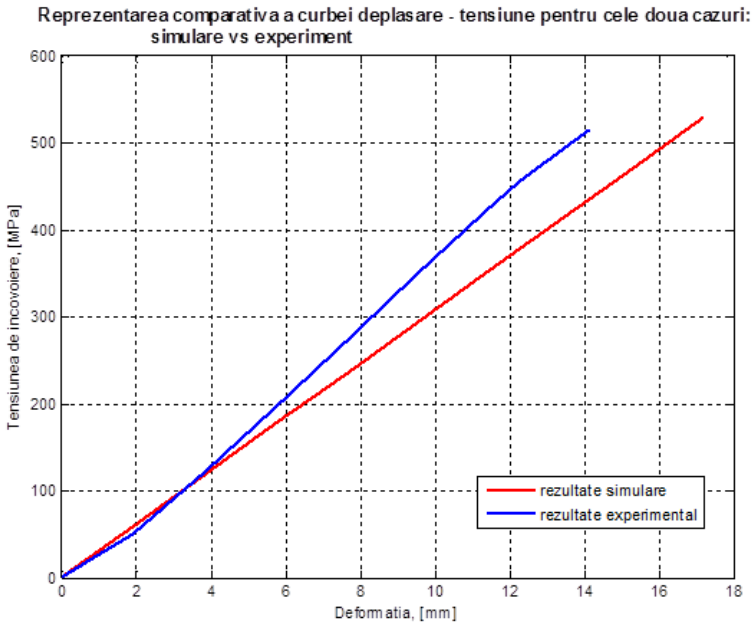


Fig. 5.105. Curba caracteristică deformație – tensiune la încovoiere – simulare vs. experiment.

Figura 5.105 ilustrează curba caracteristică deformație – tensiune pentru cele două cazuri: simulare și experiment.

În cadrul acestui grafic cu culoare roșie s-a trasat curba caracteristică deformație – tensiune pentru cazul simulării iar cu albastru este trasată curba caracteristică deformație – tensiune pentru rezultatele obținute în urma testelor experimentale.

Utilizându-se funcțiile statistice predefinite din programul Microsoft Excel, s-a calculat coeficientul de corelație atât pentru rezultatele obținute în urma simulării dar și pentru datele furnizate de testele experimentale. Pentru partea de simulare s-a obținut un coeficient de corelație cu valoarea 1 iar pentru rezultatele experimentale coeficientul de corelație a avut valoarea de 0,999167. În concluzie, se poate observa un grad de corelare bun al rezultatelor obținute din testul experimental și modelul virtual.

5.6. CONCLUZII

Analizând rezultatele obținute în urma experimentelor efectuate asupra epruvetelor din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon, în diferite condiții de solicitare, se pot identifica următoarele concluzii:

- În cazul solicitării la încovoiere în 4 puncte, sistemul de emisie acustică utilizat pentru detectarea defectelor produse în materialul epruvetei a furnizat creșterea inițială a

amplitudinii pentru semnalul provenit de la senzorul S3 (senzorul situate în capătul stâng al epruvetei). Acest lucru înseamnă că defectul inițial se produce în partea stângă a epruvetei și apoi se propagă către centrul acesteia unde se va obține o amplitudine maximă (aceasta fiind zona critică);

- De asemenea, camera de termografie IR detectează temperaturi mai mari la suprafața epruvetei în capătul stâng al acesteia (zona senzorului S3) decât în zona senzorului S2 (capătul drept al epruvetei. Temperatura din zona senzorului S1 (marcată cu roșu pe grafic) este inițial redusă dar crește treptat odată cu producerea primei fisuri detectată de senzorul S3 (marcat cu albastru). Conform figurii 5.100 în zona senzorului S2 nu se semnalează temperaturi critice, lucru care este confirmat și de semnalele captate de senzorii acustici.
- Utilizarea camerei de termografie IR, la solicitarea la tracțiune a epruvetei, s-a constatat că întâi se produce o ușoară descreștere a temperaturii de la suprafața epruvetei (în timpul delaminării) și apoi temperatura crește treptat până în momentul producerii rupturii acesteia după care scade liniar;
- Aplicațiile de calcul elaborate (DC_1, DC_2, DC_3, DC_4, DC_5) prezintă o interfață prietenoasă și sunt extrem de utile în calculele inginerești de complexitate mică (atunci când testele experimentale se efectuază doar pe epruvete). Introducerea structurilor avansate de programare scrise în limbaj C în programul grafic are un mare avantaj atunci când datele sunt multiple iar calculul este mai complex. Utilizarea acestor aplicații pentru calcule a condus la rezultate numerice care pot foarte bine să valideze modelul virtual prezentat în capitolul anterior;
- Pentru a se alege un sistem de detectare optim s-a elaborat analiza multicriterială unde au fost comparate cele trei metode utilizate luând în calcul avantajele și dezavantajele fiecărui criteriu în parte. Și în acest caz, aplicația de calcul proiectată DC_5 este extrem de utilă mai ales atunci când criteriile de selecție sunt multiple. Aplicația a fost programată să să efectueze calculele pentru 7 criterii în același timp dar poate fi utilizată și daca numărul de criterii este diferit;
- Utilizând programul DC_5 pentru analiza multicriterială s-a concluzionat că dintre metodele studiate, metoda emisiei acustice a obținut cel mai mare punctaj. Tehnica este mai costisitoare dar senzorii acustici pot fi aplicați pe orice tip de structură (atât la suprafață cât și integrați) și au capacitatea de a detecta un defect chiar dacă este în profunzime. Metoda acustică poate fi utilizată și atunci când structura este în funcționare;

- Metoda electrorezistivă deși este mai ieftină (de aceea a fost aplicată de mulți cetcetători), poate detecta numai deplasările din interiorul materialului dar nu are abilitatea de a detecta fisurile din material;
- Termografia cu infraroșu, este utilă ca și metodă de control, oferă informații în ceea ce privește temperaturile de la suprafața unui material dar nu poate pătrunde în material mai adânc și nici nu este o tehnică integrabilă.

CAPITOLUL6

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Teza de doctorat intitulată ”***Studii şi cercetări privind detectarea defectelor în structuri”*** şi-a propus realizarea unor cercetări teoretice şi practice în domeniul controlului nedistructiv aplicat pe materiale compozite stratificate ranforsate cu fibră de carbon utilizate de regulă în industria aerospațiala dar nu numai.

De regulă, îmbunătăţirea performanţelor metodelor de analiză nedistructivă a materialelor, presupune pe lângă conceperea de noi materiale şi sisteme cu caracteristici superioare și utilizarea unor sisteme senzoriale integrate în structura materialului compozit.

În acest capitol sunt evidențiate concluziile finale ale cercetărilor efectuate, contribuţiile autorului precum și valorificarea rezultatelor cercetărilor.

6.1 CONCUZII FINALE

Teza de doctorat şi-a propus efectuarea unor cercetări în domeniul metodelor de analiză nedistructivă a sistemelor prin prin detectarea defectului încă din faza incipientă, indiferent de metoda de detectare utilizată..

Obiectivele ştiinţifice alte tezei stabilite într-o etapă iniţială, au fost integral îndeplinite şi au fost materializate sub forma unor produse inovative, cu caracter de originalitate.

În *Capitolul* ***2, Stadiul actual al cercetării în domeniu***, s-a realizat o sinteză a metodelor de evaluare nedistructivă a sistemelor, din punct de vedere al performanţei acestora, al fenomenelor fizice ce stau la baza lor, al modului de utilizare şi aparatura necesară. De asemenea s-a prezentat conceptul de monitorizare a sănătății structurilor și s-au descris câteva metode de analiză a calității funcționării.

În ceea ce priveşte analiza defectelor structurale, de-a lungul timpului, s-au dezvoltat și implementat o serie de metode non-distructive bazate pe diferite principii fizice, ca: tensometria electrorezistivă (TER), emisia acustică, fotoelasticimetria, franjele Moire, termografia IR, ultrasonografia, radiografia cu raxe X, corelarea imaginii vizuale. Toate aceste metode

experimentale au avut la bază diferite tipuri de măsurători directe. Astfel, s-au monitorizat încărcările pentru a se achiziţiona informaţii despre starea structurii (nivelul de integritate al acesteia).

Pentru a simplifica procesul de identificare a defectelor structurale, au fost create cu câteva decenii în urmă, o serie de standarde internaţionale referitoare la clasificarea acestor defecte pentru tipuri diferite de materiale. În acest studiu au fost extrase standardele pentru materiale metalice şi aliaje dar şi anumite informaţii legate de defectele materialelor compozite.

Metodele experimentale de identificare a defectelor prezentate pot fi aplicate unei plaje largi de materiale, atât metalice cât şi compozite.

Tensometria electrorezistivă şi emisia acustică au fost frecvent utilizate de ingineri şi cercetători din industria aeronautică, cu precizarea că metoda TER prezintă câteva erori de măsurare care pot conduce la obţinerea unor rezultate eronate.

Principiul emisiei acustice este cu preponderenţă utilizat în aplicaţiile din industria aerospaţială. Această metodă necesită echipamente senzoriale cu sensibilitate ridicată, programe inteligente de procesare şi analiză a semnalelor dar se poate aplica pentru monitorizare în timp real. Utilizarea acestei metode permite elaborarea unei analize rapide şi precise a structurii studiate cu posibilitatea prelucrării datelor pe computer.

Fotoelasticimetria se utilizează destul de rar în practică, doar la unele structuri industriale, deoarece prezintă o serie de dificultăţi în cazul structurilor compozite.

Metodele Moire nu necesită echipamente de analiză costisitoare dar sunt utilizate doar în condiţii de laborator.

Termografia IR este o metodă experimentală de detectare şi analiză a defectelor structurale care se bazează pe principiul emisivităţii materialelor. Se poate aplica cu succes în cazul structurilor din materiale compozite, prezintă avantajul unor măsurări în timp real, fără contact direct cu structura şi permite achiziţionarea de informaţii referitoare la o zona relativ mare.

Radiografia cu raze X este utilizată numai în practică, dar nu se poate aplică în cazul monitorizării în timp real. Această metodă nu este capabilă să detecteze ruperea fibrelor din epruvetele realizate din materiale compozite cu fibră de grafit sau aramid.

Ultrasonografia a fost utilizată din ce în ce mai frecvent în ultimii ani pentru identificarea şi analiza defectelor structurale. Metoda permite efectuarea unor măsurători în timp real chiar şi în condiţii de funcţionare, de exemplu, atunci când o aeronavă este în zbor. Singurul dezavantaj ar fi acela că echiăamentele sunt extrem de costisitoare.

Metoda corelării imaginii vizuale permite măsurarea în condiţii normale de lucru prin eliminarea mişcărilor corpului din câmpul deplasărilor.

În *Capitolul **4*** intitulat ***Contribuții la modelarea și simularea de structuri*** s-au tratat noțiuni legate de modelarea geometrică a structurilor din industria aerospațială, s-au enumerat câteva caracteristici ale materialelor utilizate dar și o serie de relații matematice ce stau la baza fenomenelor aerodinamice. De asemenea, s-a efectuat o simulare a comportamentului unei pale de elicopter în condiții de zbor staționar, zbor cu înaintare (cazul pală avansantă și pală reculantă) și pentru cazul încărcării proprii. S-a mai realizat și o simulare a comportamentului unei epruvete din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon în condiții de solicitare la încovoiere în 4 puncte.

Modelele geometrice au fost realizate prin intermediul unor programe dedicate, cum ar fi, CATIA și Hypermesh în care au fost create atât pala de elicopter cât și proba de material compozit.

Concluzii privind analiza FEM pentru regimul de zbor la punct fix

În urma analizei cu elemente finite a palei proiectate s-au putut identifica o serie de concluzii referitoare atât la partea de modelare, cât şi a comportării structurii în condiţiile de solicitare impuse:

- modelul geometric 3D proiectat prezintă avantajul că o astfel de pală are greutate ultrauşoară datorită introducerii spumei în locul nervurilor de susţinere existente în cazul palelor de la alte elicoptere cunoscute;
- în cazul regimului de zbor la punct fix se observă că, în zona bucşilor, pe lonjeron, apar deformaţii critice ce au valoarea maximă de 0,006 %;
- valoarea deplasarii maxime a palei (226 mm) se poate considera ca fiind acceptabilă în condiţiile de solicitare (zbor staţionar) şi ţinând cont de dimensiunile geometrice ale palei;
- tensiunea maximă obţinută pe lonjeron (78 N/mm^2) relevă faptul că acesta prezintă o rigiditate mare;

De regulă, la palele elicopterelor învelişul preia în mare parte eforturile exercitate asupra structurii acestora. Şi în acest caz de solicitare apar tensiuni echivalente critice pe suprafaţa lateral interioară a învelişului în zona lonjeronului.

S-a efectuat o analiză statică structurală privind variaţia tensiunilor echivalente pe învelişul palei atunci când rotorul este oprit, singura încărcare a palei fiind propria greutate.

În urma analizei comparative pentru cele două cazuri de încărcare (regim de zbor la punct fix şi încărcarea greutăţii proprii) s-au identificat valori mai mari ale tensiunilor echivalente, pe înveliş pentru cazul primului regim de zbor. Tensiunile critice se dezvoltă de regulă în zona bucşilor.

Pentru lonjeron, tensiunile echivalente mai mari apar pentru cazl încărcării proprii şi sunt localizate în zona de încastrare.

Concluzii privind analiza FEM în regimul de zbor cu înaintare

Aplicarea unui regim de zbor cu înaintare în cadrul analizei structurale cu FEM poate conduce la obţinerea unor rezultate deosebit de relevante pentru inginerii proiectanţi din domeniul aerospaţial.

După cum s-a observat în capitolul anterior, regimul de zbor cu înaintare implică două cazuri distincte de analiză:

- cazul palei avansante;
- cazul palei reculante.

Considerând datele de intrare identice cu cele ale unui caz real de zbor, s-au putut determina valori ale unghiurilor de incidenţă α diferite pentru cele două cazuri de încărcare. Acest lucru a condus la rezultate diferite ale tensiunilor von Mises pentru cazurile de solicitare studiate.

Studiind hărţile de tensiuni atât pe lonjeron cât şi la nivelul învelişului se pot identifica valori semnificativ mai mari ale tensiunilor echivalente dezvoltate pe pala avansantă. Acest lucru este absolut normal pentru regimul de zbor studiat.

S-a efectuat o analiză comparativă a valorilor tensiunilor la tracţiune şi compresiune pentru regimul de zbor cu înaintare, considerând cele două cazuri de solicitare care se produc în timpul încărcării. Atât pentru lonjeron cât şi în cazul învelişului s-au evidenţiat tensiuni relativ mai ridicate pentru cazul palei avansante, acestea apărând în apropierea zonei de încastrare.

Ca o concluzie finală se poate sublinia că rezultatele unei analize structurale sunt deosebit de valoroase, putând servi în cazul integrării unui sistem de monitorizare a sănătăţii structurii palei. Hărţile de tensiuni şi deformaţii obţinute pot ajuta la determinarea locaţiilor de plasare a senzorilor în cadrul structurii.

Concluzii privind analiza FEM a epruvetei din material compozit stratificat

Cercetarea teoretică s-a orientat pe lângă analiza structurală a palei de elicopter și pe analiza structurale ale unei epruvete din material compozit stratificat. În acest scop s-a utilizat metoda elementului finit, metodă extrem de des utilizată în ultima vreme pentru estimăriale nivelului de tensiune și deformație.

Analiza structurală cu metoda elementelor finite (MEF) s-a efectuat ţinând cont de proprietăţile mecanice ale materialelor determinate din încercările mecanice. Apropierea cantitativă şi calitativă de realitate a soluţiei oferite de metoda elementelor finite depinde în mare măsură de tipul elementului finit utilizat în analize, de tipul de material utilizat în analiză, de metodologia de modelare pentru atingerea unei convergenţe legate de soluţia finală, de modalitatea de aplicare a condiţiilor de fixare, etc.

Compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale au scos în evidență un grad bun de corelare a acestora, acest lucru putându-se observa din graficul comparativ 4.49, prezentat spre finalul capitolului 4.

Studiul MEF s-a bazat pe metodologia modernă de simulare a materialelor compozite ținând cont de proprietățile structurale ale fiecărui strat. Pe baza acestui tip de modelare, există posibilitatea să se poată obține informații de tip deplasare, tensiune, deformație în orice strat al compozitului stratificat, precum și la interfața dintre straturi.

Valoarea maximă a tensiunii von Mises (528,733 MPa) se observă în zona de centru a epruvetei (acolo unde este aplicată sarcina de solicitare) și unde apare o zonă de concentratori de tensiune.

Capitolul ***5*** intitulat ***Contribuții experimentale*** s-a concentrat asupra determinărilor experimentale privind detectarea defectelor în epruvete realizate din material compozit stratificat ranforsat cu fibră de carbon utilizând trei metode diferite: tensometria electrorezistivă, metoda acustică și termografia în infraroșu activă. Încercările experimentale au fost realizate în laboratoare dotate cu echipament performat de încercări mecanice și analiză a eșantioanelor.

S-au efectuat teste mecanice de încovoiere în 4 puncte și tracțiune asupra unor epruvete din material compozit. Pentru calculul parametrilor mecanici implicați în cadrul experimentelor s-au elaborat o serie de aplicații LabView (DC_1, DC_2, Dc_3, DC_4 și DC_5), rezultatele numerice obținute fiind utilizate la trasarea diagramelor și a curbelor caracteristice. Pentru a se alege un sistem de detectare optim s-a realizat o analiză multicriterială unde au fost comparate cele trei metode utilizate luând în calcul avantajele și dezavantajele fiecărui criteriu în parte. Și în acest caz, aplicația de calcul proiectată DC_5 a fost extrem de utilă mai ales atunci când criteriile de

selecție sunt multiple. Aplicația a fost programată să să efectueze calculele pentru 7 criterii în același timp dar poate fi utilizată și daca numărul de criterii este diferit.

Analizând rezultatele obținute în urma experimentelor efectuate asupra epruvetelor din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon, în diferite condiții de solicitare, se pot identifica următoarele concluzii:

- în cazul solicitării la încovoiere în 4 puncte, sistemul de emisie acustică utilizat pentru detectarea defectelor produse în materialul epruvetei a furnizat creșterea inițială a amplitudinii pentru semnalul provenit de la senzorul S3 (senzorul situate în capătul stâng al epruvetei). Acest lucru înseamnă că defectul inițial se produce în partea stângă a epruvetei și apoi se propagă către centrul acesteia unde se va obține o amplitudine maximă (aceasta fiind zona critică);
- de asemenea, camera de termografie IR detectează temperaturi mai mari la suprafața epruvetei în capătul stâng al acesteia (zona senzorului S3) decât în zona senzorului S2 (capătul drept al epruvetei. Temperatura din zona senzorului S1 (marcată cu roșu pe grafic) este inițial redusă dar crește treptat odată cu producerea primei fisuri detectată de senzorul S3 (marcat cu albastru). În zona senzorului S2 nu se semnalează temperaturi critice, lucru care este confirmat și de semnalele captate de senzorii acustici.
- utilizarea camerei de termografie IR, la solicitarea la tracțiune a epruvetei, s-a constatat că întâi se produce o ușoară descreștere a temperaturii de la suprafața epruvetei și apoi temperatura crește treptat până în momentul producerii rupturii acesteia după care scade liniar;
- aplicațiile de calcul elaborate (DC_1, DC_2, DC_3, DC_4, DC_5) prezintă o interfață prietenoasă și sunt extrem de utile în calculele inginerești de complexitate mică (atunci când testele experimentale se efectuază doar pe epruvete). Introducerea structurilor avansate de programare scrise în limbaj C în programul grafic are un mare avantaj atunci când datele sunt multiple iar calculul este mai complex. Utilizarea acestor aplicații pentru calcule a condus la rezultate numerice care pot foarte bine să valideze modelul virtual prezentat în capitolul anterior;
- utilizând programul DC_5 pentru analiza multicriterială s-a concluzionat că dintre metodele studiate, metoda emisiei acustice a obținut cel mai mare punctaj. Tehnica este mai costisitoare dar senzorii acustici pot fi aplicați pe orice tip de structură (atât la

suprafață cât și integrați) și au capacitatea de a detecta un defect chiar dacă este în profunzime. Metoda acustică poate fi utilizată și atunci când structura este în funcționare;

- metoda electrorezistivă deși este mai ieftină (de aceea a fost aplicată de mulți cetcetători), poate detecta numai deplasările din interiorul materialului dar nu are abilitatea de a detecta fisurile din material;
- termografia cu infraroșu, este utilă ca și metodă de control, oferă informații în ceea ce privește temperaturile de la suprafața unui material dar nu poate pătrunde în material mai adânc și nici nu este o tehnică integrabilă.

6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI ORIGINALE

Prezenta teză de doctorat şi-a propus un studiu amplu al metodelor nedistructive (NDT – non destructive techniques) utilizate, bazat pe referinţe de specialitate şi găsirea soluției optime de analiză care să permită detectarea unor defecte structurale încă din faza incipientă pentru materialeler compozite stratificate.

În urma determinării metodei optime și a obiectivelor, pe parcursul cercetării şi elaborării tezei au fost conturate numeroase contribuţii personale ale autorului dintre care se pot menţiona:

6.2.1. Contribuții originale teoretice

Privind studiile teoretice efectuate în această teză de doctorat se pot enumera următoarele contribuții originale aduse de autor:

- proiectarea conceptuală a structurii de masă minimă a unei pale de elicopter ușor păstrând în totalitate funcțiile acesteia;
- proiectarea conceptuală a unui model 3D de lonjeron care să ofere suficientă rezistență și rigiditate palei de elicopter fără a se utiliza nervurile de susținere care se găsesc în componența altor tipuri de pale;
- realizarea unei metodologii de calcul cu metoda elementelor finite pentru calculul palei de elicopter în diferite condiții de solicitare: zbor la punct fix, zbor cu înaintare cu cele două cazuri (pală avansantă și pală reculantă) și cazul greutății proprii;
- obținerea hărților de tensiuni și deformații atât în structura lonjeronului cât și de-a lungul învelișului în scopul poziționării senzorilor unui sistem de monitorizare a integrității structurilor;

- realizarea unei analize comparative statistice a comportării mecanice a lonjeronului și învelișului pentru cele patru cazuri de solicitare studiate;
- elaborarea unei rutine de programare în MATLAB pentru realizarea graficelor de analiză statistică.

6.2.2. Contribuții originale experimentale

- Realizarea unor eșantioane de probă din material compozit stratificat armat cu fibră de carbon;
- Proiectarea unor standuri experimentale pentru încercările mecanice efectuate asupra eșantioanelor: încercare la încovoiere în 4 puncte și încercare la tracțiune;
- Elaborarea unor programe de calcul utilizând mediul de programare grafică, LabVIEW (DC_1, DC_2 și DC_3), pentru obținerea caracteristicilor mecanice ale materialului testat;
- Elaborarea unul program LabVIEW (DC_4) pentru realizarea analizei spectrale a semnalelor acustice furnizate de cei 3 senzori aplicați pe suprafața epruvetei;
- Elaborarea unui program LabVIEW pentru calculul indicatorilor și coeficienților implicați în analiza multicriterială;
- Depistarea unor defecte structurale de suprafață survenite în timpul efectuării încercărilor mecanice, prin analiza hărților termografice;
- Identificarea unor defecte de structură de profunzime prin analiza magnitudinii semnalelor acustice, a formei și delay-ului acestora;
- Conturarea şi sintetizarea, pe baza rezultatelor obţinute şi a metodelor studiate, a concluziilor privind experimentele efectuate.

6.3 VALORIFICAREA CERCETĂRII

Cercetările ştiinţifice realizate pe parcursul programului doctoral au condus la publicarea de lucrări în volumele unor conferinţe naţionale şi internaţionale şi volumele unor reviste de specialitate. Lista lucrărilor publicate de autoarea tezei este:

[1] **CAZANGIU, Diana**, ROȘCA Ileana, *The current trends in Structural Health Monitoring in Aerospace Applications*. In Proceeding of The 5th Conference on ”Computational

Mechanics and Virtual Engineering", COMEC 2013, 24 – 25 oct. 2013, Brașov, Romania, ISBN 978 – 606 – 19 – 025 - 5.

[2] **CAZANGIU, Diana**, ROȘCA Ileana, LEMMENS, Y., *The Applying of an Automatic Configuration Tool for the Investigation of the UAV electrical Network*. In Proceeding of The 5th Conference on "Computational Mechanics and Virtual Engineering", COMEC 2013, 24 – 25 oct. 2013, Brașov, Romania, ISBN 978 – 606 – 19 – 025 - 5.

[3] **CAZANGIU, Diana**, ROȘCA Ileana, *G Code Programming applied in Human Voice Frequency Analysis.* In: Proceedings of The 4th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering – EHB 2013, Iasi, 21 – 23 November, 2013, ISBN 978 – 1 – 4799 – 2372 – 4, published in digital database: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6707245&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6707245.

[4] **CAZANGIU, Diana**, ROȘCA Ileana, *Use of Feature Extraction Algorithm in real Time Echo Detection Application Development*. In: Proceedings of The 4th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering – EHB 2013, Iasi, 21 – 23 November, 2013, ISBN 978 – 1 – 4799 – 2372 – 4, published in digital database: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6707246.

[5] **CAZANGIU, Diana**, DIMA, Gabriel, LEMMENS, Yves, ROȘCA, Ileana, *Utilizarea MBSE în investigarea retelei electrice a unui avion pilotat de la sol*. In Buletinul AGIR, Nr. 1, Ianuarie – Martie 2014, ISSN (online) 2247-3548. http://www.buletinulagir.agir.ro/articol.php?id=1956

[6] **CAZANGIU, Diana**, DIMA, Gabriel, LEMMENS, Yves, ROȘCA, Ileana, *Investigarea retelei electrice a unui avion pilotat de la sol, prin trei scenarii de simulare a zborului*. În Buletinul AGIR, Nr. 1, Ianuarie - Martie 2014, ISSN (online) 2247-3548. http://www.buletinulagir.agir.ro/articol.php?id=1957

[7] **CAZANGIU Diana**, BULMAGA Marina, *Aspects regarding to the Design of the Feature Extraction Algorithms used at Structural Health Monitoring Systems*. Research and Science Today, Nr. 1(7), Targu Jiu, martie, 2014, ISSN –e: 2285 – 9632, pag. 95 – 102.

[8] **CAZANGIU Diana**, DIMA, Gabriel, DRAGAN, Razvan, ROȘCA, Ileana, *The Structural Analysis of the main Rotor Blade for a light Helicopter - Case of Hovering Flight Mode*. In Proceedings of Annual Session of Scientific Papers „IMT Oradea 2014", Vol. XIII (XXIII), Ed. Universitatii din Oradea, mai 2014, pag. 91 – 94, ISBN 978 – 606 – 10 – 1276 – 3.

[9] **CAZANGIU Diana**, DIMA, Gabriel, DRAGAN, Razvan, ROȘCA, Ileana, *The Structural Analysis of the main Rotor Blade for a light Helicopter - Case of Hovering Flight Mode*. In "ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering", vol. XIII, Nr. 1, Ed. Universitatii din Oradea, mai 2014, CD ROM Edition, pag. 63 – 66, ISSN 1583 – 0691, http://imtuoradea.ro/auo.fmte/files-2014-v1/Cazangiu%20Diana-STRUCTURAL%20ANALYSIS%20OF%20THE%20MAIN%20ROTOR%20BLADE%20FOR%20A%20LIGHT%20HELICOPTER%20-%20CASE%20OF%20HOVERING%20FLIGHT%20MODE.pdf .

[10] **CAZANGIU Diana**, *Simulation Software Development for Analysis of the Mechanical Behaviour of the Composite Materials*. In Research and Science Today, Nr. 2(8), Targu Jiu, decembrie, 2014, ISSN –e: 2285 – 9632, pag. 126 – 135.

[11] UNGUREANU Loredana, CRISTEA Luciana, BARITZ Mihaela Ioana, **CAZANGIU Diana**, BUZEA Daniel, *Evaluate the Electromagnetic Radiation Effects on the Facial Tissue***.** In Periodical **"** Applied Mechanics and Materials" (Volume 332), July, 2013, p. 485-490, ISBN 978-3-03785-733-5.

[12] UNGUREANU Loredana, CRISTEA Luciana, BULMAGA Marina, **CAZANGIU Diana**, *The Analysis of the Influence of EMR Effects Provided from the Mobile Phones with different SAR Index*. In Applied Mechanics and Materials, vol. 555 - „Modeling and Optimization of the Aerospace, Robotics, Mechatronics, Machines-Tools, Mechanical Engineering and Human Motricity Fields, Trans Tech Publications, 2014, ISBN-13: 978 – 3 – 03835 – 111 – 5, pag. 446 – 451, http://www.scientific.net

[13] BULMAGA Marina, CRISTEA Luciana, UNGUREANU Loredana, **CAZANGIU Diana**, *Analysis of Visual Acuity According to the Intensity of Artificial Light*. In Applied Mechanics and Materials, vol. 555 - „Modeling and Optimization of the Aerospace, Robotics, Mechatronics, Machines-Tools, Mechanical Engineering and Human Motricity Fields, Trans Tech Publications, 2014, ISBN-13: 978 – 3 – 03835 – 111 – 5, pag. 731 – 736, http://www.scientific.net

[14] DRAGAN Razvan Gabriel, ROSCA Ileana – Constanta, **CAZANGIU Diana** and LEONTE Alexantru Stefan, *Thermal Response for a Reinforced Concrete Slab Analyzed with Active Infrared Thermography and Comsol Multiphysics*, Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1583-7904, International Conference of Advanced Manufacturing Technologies, 2014.

[15] EDU Vladimir Filip, **CAZANGIU Diana**, CSATLOS Carol, *Automated concept of potato sizing equipment*. Procedia Technology vol. 19 (2015), pag. 215 – 220, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017315000328.

Cele **15** lucrări științifice publicate de autoarea tezei pot fi sintetizate astfel:

- **7** lucrări în ISI proceedings,
- **3** lucrări în conferinţe internaţionale cu comitet de program,
- **5** lucrări publicate în reviste naționale,

la **9** dintre ele, fiind **prim autor** iar la **1** lucrare fiind **singur autor**.

6.4. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Ținând cont de rezultatele obținute din cadrul cercetării doctorale, atât pe partea teoretică cât și pe cale experimentală, domeniul detectării și evaluării defectelor prin metode nedistructive deschide noi perspective de aprofundare a acestuia și de abordare a unor direcții conexe ca:

- Studiul comportării materialelor avansate inteligente în diferite condiții de solicitare;
- Adaptarea metodelor de inspecție prin emisie acustică la structuri compozite existente în domeniul aerospațial și elaborarea unei metode rapide și eficiente de diagnostic prin utilizarea unor senzori integrabili cu transmisie wireless ;
- Dezvoltarea și îmbunătățirea proprietăților materialelor compozite, pe baza analizei acestora prin utilizarea metodei de detectare a defectelor prin emisie acustică;
- Dezvoltarea unor sisteme avansate de monitorizare a integrității structurilor din domeniul aerospațial, care să fie capabile să identifice și să localizeze defectul și apoi să izoleze și să stabilizeze zona avariată astfel încât aeronava să poată ateriza în siguranță.

BIBLIOGRAFIE

ALĂMOREANU, E., NEGRUŢ, C., GHEORGHIU, H., HADĂR, A., *Studiul caracteristicilor şi metodelor de calcul adecvate materialelor compozite* , Contract M. C. T., 1991-1992.

AWERBUCH, J., GORMAN, M. R., MADHUDAR, M., *Monitoring Acousting Emission During Quasy-Static Loading-Unloading Cycles of Filament-Wound Graphite-Epoxy Laminate Coupouns*, Materials Evaluation, Vol. 43, Number 6, 1985.

BAKER, A., DUTTON, S., KELLY, D., *Composite materials for Aircraft Structures*, Second edition. Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc (AIAA), 2004, ISBN 1 – 56347 – 540 – 5.

BAKER, A., DUTTON, S., KELLY, D., *Composite materials for Aircraft Structures*, Second edition. Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc (AIAA), 2004, ISBN 1 – 56347 – 540 – 5.

BALAGEAS, D., FRITZEN, C. P., GÜEMES, A., *Structural Health Monitoring. Introduction*, ISTE Ltd., 2010, ISBN 978-0470612071.

BEJINARU MIHOC, Gh., POP, A. P., MITU, G. L., GEAMĂN, H., BEJINARU MIHOC, A., CAZANGIU, D., *Characteristics of the composite materials cutting process*. In Proceedings of the 3rd International Conference Advanced Composite Materials Engineering - COMAT 2010, 27 – 29 October 2010, Braşov, Romania, ISSN 1844 – 9336.

BUZDUGAN, Gh., *Rezistenţa materialelor,* Editura Academiei, Bucureşti, 1987.

CAZANGIU Diana, DIMA, Gabriel, DRAGAN, Razvan, ROȘCA, Ileana, *The Structural Analysis of the main Rotor Blade for a light Helicopter - Case of Hovering Flight Mode*. In "ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering", vol. XIII, Nr. 1, Ed. Universitatii din Oradea, mai 2014, CD ROM Edition, pag. 63 – 66, ISSN 1583 - 0691.

CAZANGIU, D., ROȘCA., I. C., *The current trends in Structural Health Monitoring in Aerospace Applications.* In Proceedings of the 5th Conference on ”Computational Mechanics and Virtual Engineering”, COMEC 2013, 24 – 25 Octombrie, 2013; Braşov; Romania, ISBN 978 – 606 – 19 – 025 – 5.

CHAMBERS, T. J., *Durability Testing of an Aircraft Structural Health Monitoring System*, MIT, 2006.

CROCKER, David, *Dictionary of Aviation*, Second Edition, A & C Black Publishers Ltd., London, 2007, eISBN – 13: 978 – 1 – 4081 – 0226 – 8.

DAWSON, B., *Vibration condition monitoring techniques for rotating machinery*. In The Shock and Vibration Digest (London, Springerlink), 1976.

DOEBLING, S. W., FARRAR, C. R., PRIME, M. B., SHEVITZ D. W., *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review*. Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS, 1996.

DRĂGAN, R., *Studii și cercetări privind analiza sistemelor prin termografie*. Teză de doctorat. Universitatea Transilvania din Brașov, 2014.

FARRAR, C. R, WORDEN K., *An Introduction to Structural Health Monitoring*, Phil. Trans. R. Soc. A., 2007.

FARRAR, C. R., DOEBLING, S. W., NIX, D. A., *Vibration based Structural Damage Identification*. In Philosophical Transactions of the Royal Society A 359 (1778), 2001.

GHEORGHIU, H., HADĂR, A., CONSTANTIN, N., *Analiza structurilor din materiale izotrope şi anizotrope*, Editura Printech, Bucureşti, 1998.

HADĂR, A. *Structuri din compozite stratificate*, Ed. Academiei şi Editura AGIR, Bucureşti, 2002.

HOBBS, C. P., TEMPLE, A., *The Inspection of Aerospace Structures Using Transient Thermography*, Brit J NDT 35, 1993.

http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/37849/137294987.pdf

http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470092866.ch5/pdf

http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1851/303.long

http://www.iste.co.uk/data/doc_xqjujdlhnfls.pdf

http://www.wiley-vch.de/publish/en/books/newTitles201306/1-118-42298-8/?sID=hrh2x5owa09sm9ur8yp0xzh1pu

IDDINGS, F. A., *Large Area Aircraft Scanner, Rewiew of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 11, Ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti , Plenum Press, New York, 1992.

JIGA, G., CONSTANTIN, N., HADĂR, A., N. Goga, *Numerical Calculus of Biaxial Loaded*

JURAN, M. J., *Juran on Planning for Quality*, The Free Press, New York, New York, 1988, ISBN 0029166810 9780029166819, OCLC 16468905.

KAW, A. K., *Mechanics of Composite materials* (2nd ed.), Boca Raton CRC Press, 2005, ISBN 0 – 8493 – 1343 – 0.

Laminates, Ediţia I-a a Conferinţei Naţionale "Optimizarea proiectării şi tehnologiilor de prelucrare în construcţia de maşini", Academia Română Filiala Iaşi, Bacău, 1995, pag. 26-30.

LIU, Y., *Lecture notes: Introduction to Finite Element Method*, University of Cincinnati, 1998.

MATTHEWS, F. L., RAWLINGS, R. D., *Composite materials: Engineering and Science*, Boca Raton CRC Press, ISBN 0 – 8493 – 0621 - 3

MAZUMDAR, K. S., *Composites manufacturing materials, product, and process engineering.* ISBN 798-0-8493-0585, CRC Press, 2002.

NIU, Y. C. M., *Airframe Structural Design. Practical Design Information and Data on Aircraft Structures*, Canmilit Press Ltd., California, 1988, ISBN 962 – 7128 – 04 – X.

PANA, T., PASTRAMA, S.D., *Integritatea structurilor metalice*, Ed. Printech, Bucuresti, 2004.

POSTELNICU, A., DELIU, Gh., UDROIU, R. – *Teoria, performanţele şi construcţia elicopterelor*, Editura ALBASTRĂ, Cluj Napoca, 2001, ISBN 973 – 650 – 008 – X.

PULLAN, W., *Structure*. Cambridge University Press, 2000, ISBN 0 – 521 – 78258 – 9.

RADES, M., *Finite Element Analysis*, Ed. Printech, 2006.

RANDALL B.R, *State of the art in monitoring rotating machinery*, part 1 and 2. Sound Vibrat. 38, 2004.

REIFSNEIDER, K. L., *Fatigue of composite materials*, Series 4, Elsevier Science Publishers, 1991. ISBN: 0 – 444 – 42525 – X.

REIFSNEIDER, K. L., HENNEKE, E. G., STINCHCOMB, W. W., *The Mechanics of Vibrothermography, in Mechanics of Non-Destructive Testing*, New-York, 1980.

ROȘCA I. C., RADU., C., *Metode de asigurare a calității*. Ed. Universității Transilvania din Brașov, 2009. ISBN 978 – 973 – 598 – 527 – 1 (pag. 8).

RUMMEL, W. D., TEDROW, T., BRINKERHOFF, H. D., *Enhaced X-Ray Stereoscopic NDE of Composite Materials*, AFWAL - TR -80 - 3053, Airforce Wright Aeronautical Laboratories, 1980.

SOHN, H., Farrar, C. R., HEMEZ, F. M., CZARNECKI, J. J., SHUNK, D. D., STINEMATES, D. W., NADLER, B. R., *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003.

STASZEWSKI W., WORDEN K., *Signal processing for damage detection*. In Encyclopedia of Structural health Monitoring, John Wiley & Sons Ltd, pp. 415 – 421, 2009, ISBN: 9780470092866.

STEPINSKI Tadeusz, UHL Tadeusz, STASZEWSKI Vielsaw, *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Application*, John Wiley & Sons, 2013.

SZÁVA, I., CIOFOAIA, V., LUCA-MOTOC, Dana, CURTU, I., *Experimental Methods in Dynamic of Mechanical Structures, in Romanian*, Transilvania University Press, 2 vol., 2001, ISBN: 973- 974-40-3; 973-8124-60-3.

SZÁVA, I., ŠEJNOHA, M. KORMANÍKOVÁ et al., *Selected chapters of Mechanics of Composite Materials III*, Derc Publishing House, Tewksbury (Boston), Massachusetts, USA, 2013, ISBN 978 – 1 – 939757 – 01 – 2.

THANGJITHAM, S., CHOI, H. J., *Interlaminar crack problems of a laminated anisotropic medium*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 30, nr. 7, 1993.

TRIPA, P., *Rezistența materialelor*, Ed. Mirton, Timișoara, 2001, ISBN 973-585-342-6.

WARDENIER, J., PACKER, J.A., ZHAO, X.L., Van der VOGT, G.J., *Hollow sections in structural applications*. CIDECT, Geneva, Switzerland, 2010, ISBN 978–90–72830–86–9 (p. 8).

WELLS, M., *Engineers. A Hystory of Engineering and Structural Design*. Taylor & Francis Library, 2010, ISBN 0 – 203 – 35818 – X.

WORDEN K., STASZEWSKI W., HENSMAN J. J., *Natural computing for mechanical system research: A tutorial overview*. Mechanical systems and sygnal processing, 25(1), 4–111, 2011.

WORDEN, K., FARRAR, C. R., MANSON, G., PARK, G., *The fundamental axioms of Structural Health Monitoring*. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A 463 (2082), 2007.

WU, E. M., *Failure Criteria to Fracture Mode Analysis of Composite Materials*, Paper 2, AGARD-CP-163, Advisory Group for Aerospace Research and Development, Munich, West Germany, March 1975.

ZAMFIRA, S. C., *Prelucrarea semnalelor*, Editura Universităţii „Transilvania" Braşov, 2003, ISBN 973-635-256-0.

ZINKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L., *The Finite Element Method, vol. 1 – The Basis*, Fifth Edition, Ed. Butterworth – Heinemann, 2000, ISBN 0 – 7506 – 50494.

*** *AD-A033 21 Engineering Design Handbook. Helicopter Engineering. Part 2,* National Technical Information Service, 1976.

*** **Composite** Materials Handbook Series, **MIL-HDBK**-17, 2002.

*** *http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx69h098-il*

*** http://www.cmdingenieros.com/

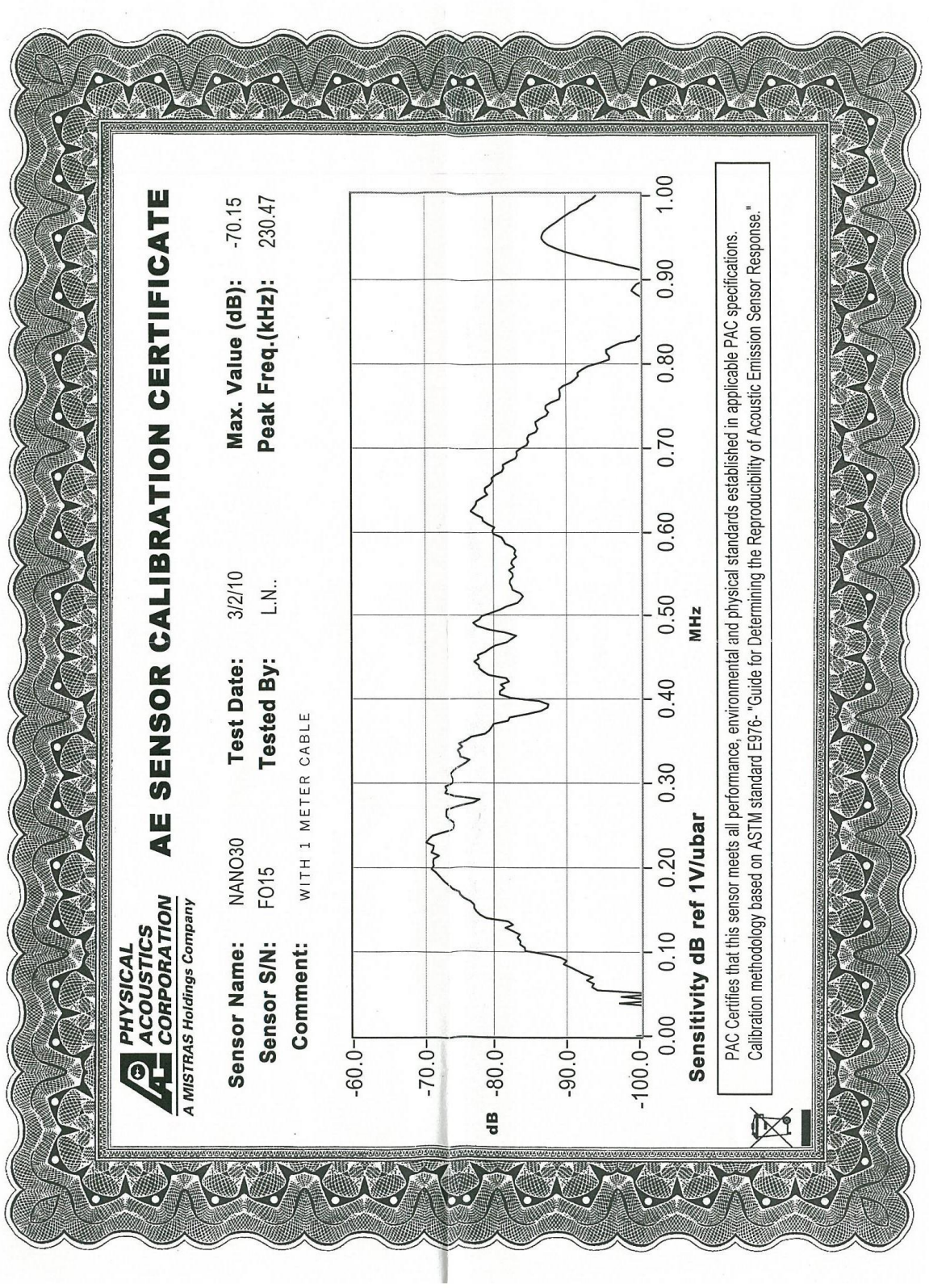
*** http://www.ro.wikipedia.org

*** SR ISO 9000-2000, "Sisteme de managementul calitatii. Principii si vocabular", 2000.

*** STAS 6656-80, Defectele pieselor laminate, 1980.

ANEXA 1

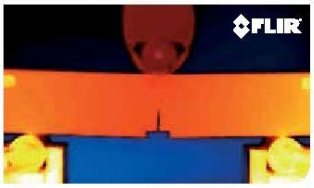
Certificat de calibrare a senzorilor acustici



ANEXA 2

Specificații tehnice camera de termografie cu infraroșu SC FLIR 7000

Signature and Range phenomenology applications



SC7000 systems offer a solution for every R&D measurement situation.

FLIR SC7000 Series

State-of-the-art infrared technology for R&D / Science

The FLIR SC7000 Series are very flexible cameras, with high sensitivity, accuracy, spatial resolution and speed. The SC7000 Series is specifically designed for academic and industrial R&D applications as well as integrators who need a very flexible camera at an affordable cost.

CHOICE OF DETECTOR

The FLIR SC7000 Series is available with a wide range of detectors to address any application in single and multispectral analysis. The researcher has a choice between mid-wave Indium Antimonide (InSb) and Mercury Cadmium Telluride (MCT) detectors. MCT detectors operating in the long-waveband are also available. The FLIR SC7000 series comes standard with a removable, motorized 4 position filter wheel. This allows imaging of events in a select part of the electromagnetic spectrum.

The SC7000 series is available in 640 x 512 or 325 x 256 pixel formats with high sensitivity and noise levels as low as 20 mK.

ULTRA HIGH FRAME RATE WITH WINDOWING

Windowing allows a subset of the total image to be selectively read out with user-adjustable window size at a much higher frame rate. The sub-sample window sizes and locations can be arbitrarily chosen and are easily defined using the camera control software. Depending on the model and detector, the FLIR SC7000 series can deliver thermal images up to a speed of 62,000 Hz.

ADJUSTABLE INTEGRATION TIME & TRIGGERING

Integration time is adjustable in nanosecond increments. The smart external triggering feature allows synchronisation of the image capture to the most fleeting events.

SOFTWARE

FLIR SC7000 Series works seamlessly together with FLIR ResearchIR Max software enabling intuitive viewing, recording and advanced processing of the thermal data provided by the camera.

KEY FEATURES

- MULTIPLE DETECTOR OPTIONS
- ULTRA HIGH FRAME RATES WITH WINDOWING
- REMOVABLE FILTER WHEEL
- MULTIPLE VIDEO OUTPUTS

www.flir.com

FLIR | The World's Sixth Sense™

Imaging Specifications

System Overview	SC7210-7500 / SC7300	SC7300L / SC7900VL	SC7600-7650 /SC7700	SC7750L / SC7790VL
Waveband	MW	LW	MW	LW
Sensor type	InSb / MCT	MCT	InSb / MCT	MCT
Pixel Resolution	320x256	320x256	640x512	640x512
Pixel Pitch	30µm	30µm	15µm	16µm
Spectral ranges	1.5 - 5.1 µm for InSb (BB) 3.7 - 4.8 µm for MCT	7.7 - 9.3 µm for SC7300L 7.7 - 11.5 µm for SC7900VL	1.5 - 5.1 µm	8.0 - 9.4 µm for the SC7750L 8.0-11.5 µm for the SC7790VL
Measurement				
NETD	<20mK for InSb / <25mK for MCT	<20mK / <25mK	<20mK / <25mK	<30mK / <37mK
Standard Camera Calibration Range	5°C to 300°C for InSb 5°C to 150°C for MCT	5°C to 150°C	5°C to 300°C for InSb 5°C to 150°C for MCT	5°C to 80°C
Optional Camera Calibration Range	-20°C to 300°C / -20°C to 150°C 5°C to 1500°C / 5°C to 500°C up to 2500°C / up to 1500°C up to 3000°C (for InSb only)	-20°C to 150°C 5°C to 150°C up to 1500°C	-20°C to 300°C / -20°C to 150°C 5°C to 1500°C / 5°C to 150°C up to 2500°C / up to 1500°C up to 3000°C for SC7700 -20°C to 250°C / 5°C to 150°C up to 1500°C	-20°C to 80°C 5°C to 80°C 80°C to 300°C 300°C to 1100°C
Digital Full Frame rate	InSb: 190 Hz - 380 Hz full frame up to 3 kHz - 39.8 kHz with windowing MCT: 230 Hz full frame up to 25 kHz with windowing	230 Hz full frame up to 23 kHz with windowing	InSb: 100 Hz full frame up to 3.425 kHz with windowing MCT: 115Hz Full Frame up 3.0 kHz with windowing	115 Hz full frame up to 62 kHz with windowing
Interfaces				
Digital Data Output	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link
Command & Control	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link
FPA Windowing	Arbitrary Size and Location (fixed for SC7210)	Arbitrary Size and Location	Arbitrary Size and Location	Arbitrary Size and Location
f/#	f/3.0 for InSb and f/2.0 for MCT	f/2.0	SC7600 f/3.0 SC7650 f/2.5 SC7700 f/3.0	f/2.0
Filter Options	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters. No Filter with the SC7650E (DACH only)	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters
Optics				
Available optics	12mm - 44°x 36° (not available in SWB) 25mm - 22°x 17° 27mm - 20°x 16° in SWB 50mm - 11°x 8.8° 100mm - 5.5°x 4.4° 200mm - 2.75°x 2.2° Close up x1 - 9.6x7.7mm (n.a. in SWB) Close up x3 - 3.2x2.6mm (n.a. in SWB) Close up x1 - 9.6x7.7mm WD 300mm (n.a. in SWB)	12mm - 44°x 36° 25mm - 22°x 17° 50mm - 11°x 8.8° 100mm - 5.5°x 4.4° 200mm - 2.75°x 2.2° Close up x1 - 9.6x7.7mm Close up x3 - 3.2x2.6mm	12mm - 44°x 36° (n.a. in SWB) 25mm - 22°x 17° 27mm - 20°x 16° in SWB 50mm - 11°x 8.8° 100mm - 5.5°x 4.4° 200mm - 2.75°x 2.2° Close up x1 - 9.6x7.7mm (n.a in SWB) Close up x3 - 3.2x2.6mm (n.a in SWB) Close up x1 - 9.6x7.7mm WD 300mm (n.a in SWB)	25mm - 23.6°x 18.1° 50mm - 11.7°x 9.4° 100mm - 5.9°x 4.7°

Imaging performance	
Dynamic Range	14 bit, 16 bit with TRE
Camera Temp Calibration	Yes
Ambient Drift Compensation	Yes
Temp. Measurement Accuracy	+/-1% or +/-1°C
HypercalTM / CNUC™ Functionality	Yes
Interfaces	
Analog Input	Yes
Analog Video	Composite or S-Video

PORTLAND
Corporate Headquarters
FLIR Systems, Inc.
27700 SW Parkway Ave.
Wilsonville, OR 97070
USA
PH: +1 866.477.3687

BELGIUM

FLIR Systems Trading
Belgium BVBA
Luxemburgstraat 2
2321 Meer
Belgium
PH: +32 (0) 3665 5100

www.flir.com
NASDAQ: FLIR

SWEDEN

FLIR Systems AB
Antennvägen 6,
PO Box 7376
SE-187 66 Täby
Sweden
PH: +46 (0)8 753 25 00

NASHUA
FLIR Systems, Inc.
9 Townsend West
Nashua, NH 06063
USA
PH: +1 603.324.7611

UK

FLIR Systems UK
2 Kings Hill Avenue
Kings Hill
West Malling - Kent
ME19 4AQ
United Kingdom
PH: +44 (0)1732 220 011

Specifications are subject to change without notice
©Copyright 2014, FLIR Systems, Inc. All other brand and product names are trademarks of their respective owners. The images displayed may not be representative of the actual resolution of the camera shown. Images for illustrative purposes only. (Created 10/14)

www.flir.com

FLIR | The World's Sixth Sense™

ANEXA 3

Rezultate obținute la încerc area de încovoiere în 4 puncte pentru epruveta D1 la mașina de încercări mecanice

Timp de incercare *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
0.03012	-0.2465480	0.0000329	23.51010	9.5241200	0.3819720	46.50010	75.2554000	0.7651580
0.51012	-0.3076860	0.0000329	24.11010	9.6387500	0.3919800	47.00010	77.3762000	0.7734870
1.00012	0.3036970	0.0068180	24.51010	9.8183500	0.3986580	47.50010	79.5045000	0.7818160
1.50012	0.8997960	0.0151712	25.00010	10.3609000	0.4068170	48.00010	81.5680000	0.7901520
2.00012	1.4500400	0.0234760	25.50010	11.5111000	0.4151670	48.50010	83.6925000	0.7985020
2.50012	1.8130500	0.0318327	26.00010	12.5887000	0.4234790	49.00010	85.5572000	0.8068100
3.01012	2.1989800	0.0403140	26.50010	13.7503000	0.4318250	49.51010	87.7429000	0.8153120
3.51012	2.8103700	0.0486533	27.01010	14.2853000	0.4403340	50.01010	89.7070000	0.8236690
4.01012	2.8791500	0.0569996	27.51010	14.4840000	0.4486460	50.51010	91.9959000	0.8319840
4.51012	3.1084200	0.0653183	28.01010	14.9272000	0.4569990	51.00010	93.8797000	0.8401640
5.00012	3.2230500	0.0734811	28.51010	15.4010000	0.4653180	51.50010	95.8323000	0.8484760
5.50012	3.2001200	0.0818205	29.00010	16.0965000	0.4734910	52.00010	97.8919000	0.8568360
6.00012	3.3262200	0.0901633	29.50010	17.3651000	0.4818270	52.50010	100.0740000	0.8651580
6.50012	3.4943500	0.0984750	30.00010	18.9891000	0.4901520	53.00010	102.2140000	0.8734770
7.01012	3.6472000	0.1069810	30.50010	20.7315000	0.4984740	53.51010	104.3040000	0.8819990
7.51012	3.7885800	0.1153270	31.01010	22.3135000	0.5069830	54.01010	106.3180000	0.8903150
8.01012	3.8650000	0.1236490	31.51010	23.7961000	0.5153370	54.51010	108.5340000	0.8986540
9.00012	4.1363000	0.1401410	32.01010	25.3475000	0.5236450	55.01010	110.6850000	0.9069930
9.50012	4.2815100	0.1484840	32.51010	26.9141000	0.5319840	55.50010	112.8860000	0.9151530
10.00010	4.3350000	0.1568330	33.00010	26.9600000	0.5401710	56.00010	114.8810000	0.9234890
10.50010	4.3617500	0.1651520	33.50010	28.1178000	0.5484830	56.50010	117.0510000	0.9318180
11.01010	4.5069600	0.1736710	34.00010	29.6806000	0.5568360	57.00010	119.2220000	0.9401710
11.51010	4.5680900	0.1819800	34.50010	31.1862000	0.5651440	57.51010	121.5100000	0.9486450
12.01010	4.8050000	0.1903260	35.01010	32.9515000	0.5736570	58.01010	123.7040000	0.9569810
12.51010	4.8699600	0.1986650	35.51010	34.3004000	0.5819960	58.51010	125.7590000	0.9653340
13.00010	4.9693100	0.2068210	36.01010	35.9588000	0.5903110	59.01010	127.8340000	0.9736530
13.50010	5.1527300	0.2151400	36.51010	37.5522000	0.5986650	59.50010	130.0320000	0.9818260
14.00010	5.3323200	0.2234860	37.00010	39.3443000	0.6068210	60.00010	132.2020000	0.9901410
14.50010	5.5272000	0.2318290	37.50010	41.1479000	0.6151530	60.50010	134.2650000	0.9985010
15.01010	5.8099700	0.2403100	38.00010	43.0088000	0.6234920	61.00010	136.3290000	1.0068300
15.51010	5.8825700	0.2486460	38.50010	44.6634000	0.6318150	61.51010	138.7930000	1.0153000
16.01010	6.2341100	0.2569920	39.01010	46.4516000	0.6403100	62.01010	140.9980000	1.0236600
16.51010	6.3754900	0.2653180	39.51010	48.1826000	0.6486490	62.51010	142.9810000	1.0319900
17.00010	6.7499700	0.2735020	40.01010	50.2155000	0.6569990	63.01010	145.0940000	1.0403200
17.50010	6.9524900	0.2818100	40.51010	52.0611000	0.6653070	63.50010	147.2380000	1.0484900
18.00010	7.2199700	0.2884940	41.00010	53.9143000	0.6734800	64.00010	149.5040000	1.0568300
18.50010	7.5906200	0.2984990	41.50010	55.6453000	0.6818340	64.50010	151.6970000	1.0651600
19.01010	7.8886700	0.3069800	42.00010	57.4451000	0.6901520	65.00010	153.8140000	1.0734900
19.51010	8.0376900	0.3153330	42.50010	59.4206000	0.6984980	65.51010	156.0190000	1.0820100
20.01010	8.4389100	0.3236450	43.01010	61.4458000	0.7069800	66.01010	158.2350000	1.0903100
20.51010	8.6146800	0.3319950	43.51010	63.5207000	0.7153260	66.51010	160.7040000	1.0986500
21.00010	8.6949300	0.3401610	44.01010	65.3052000	0.7236650	67.01010	162.6760000	1.1070000
21.50010	9.0464700	0.3484900	44.51010	67.2348000	0.7319770	67.50010	164.7960000	1.1151600
22.00010	9.0999700	0.3568090	45.00010	69.0843000	0.7401570	68.00010	166.9440000	1.1234900
22.50010	9.3674500	0.3651550	45.50010	71.3196000	0.7484860	68.50010	169.2400000	1.1318100
23.01010	9.3598100	0.3736640	46.00010	73.3601000	0.7568150	69.00010	171.5640000	1.1401700

Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
69.51010	173.5770000	1.1486600	96.00010	292.4260000	1.5901500	122.50000	413.1740000	2.0318400
70.01010	175.8930000	1.1569700	96.50010	294.8340000	1.5984900	123.00000	415.4860000	2.0401400
70.51010	178.1440000	1.1653300	97.00010	297.2640000	1.6068300	123.51000	417.6070000	2.0486500
71.01010	180.2720000	1.1736500	97.50010	299.2550000	1.6151500	124.01000	419.6820000	2.0570000
71.50010	182.4350000	1.1818200	98.00010	301.4560000	1.6234900	124.51000	422.2460000	2.0653100
72.00010	184.5290000	1.1901500	98.50010	303.6450000	1.6318300	125.01000	424.5960000	2.0736600
72.50010	186.9090000	1.1984800	99.00010	306.2740000	1.6401500	125.50000	426.8160000	2.0818100
73.00010	189.1220000	1.2068300	99.51010	308.5170000	1.6486700	126.00000	429.1050000	2.0901600
73.51010	191.5060000	1.2153200	100.01000	310.7100000	1.6569800	126.50000	431.4050000	2.0984900
74.01010	193.5660000	1.2236800	100.51000	313.1290000	1.6653200	127.00000	433.8280000	2.1068200
74.51010	195.7320000	1.2319800	101.01000	315.4100000	1.6736700	127.51000	436.0250000	2.1153100
75.01010	198.2240000	1.2403300	101.50000	317.7490000	1.6818200	128.01000	438.1380000	2.1236500
75.50010	200.2450000	1.2485100	102.00000	319.6750000	1.6901500	128.51000	440.4420000	2.1320000
76.00010	202.4120000	1.2568200	102.50000	321.7340000	1.6984800	129.01000	442.9260000	2.1403100
76.50010	204.4670000	1.2651600	103.00000	324.3140000	1.7068300	129.50000	445.2220000	2.1484900
77.00010	206.8900000	1.2734800	103.51000	326.6330000	1.7153200	130.00000	447.2630000	2.1568300
77.51010	209.2210000	1.2820100	104.01000	328.8420000	1.7236400	130.50000	449.7730000	2.1651500
78.01010	211.3260000	1.2903200	104.51000	331.0850000	1.7319900	131.00000	452.0160000	2.1735100
78.51010	213.5880000	1.2986400	105.01000	333.3890000	1.7403200	131.51000	454.4080000	2.1819800
79.01010	215.7400000	1.3069900	105.50000	335.7810000	1.7484900	132.01000	456.3950000	2.1903200
79.50010	218.0480000	1.3151600	106.00000	337.9510000	1.7568100	132.51000	458.5120000	2.1986700
80.00010	220.2260000	1.3234900	106.50000	339.9580000	1.7651500	133.01000	460.9850000	2.2069800
80.50010	222.3960000	1.3318100	107.00000	342.0820000	1.7735000	133.50000	463.4720000	2.2151600
81.00010	224.7000000	1.3401600	107.51000	344.7340000	1.7819800	134.01000	467.0910000	2.2286400
81.51010	226.8210000	1.3486600	108.01000	347.0920000	1.7903400	134.50000	468.0500000	2.2318200
82.01010	229.2670000	1.3569800	108.51000	349.1930000	1.7986500	135.00000	470.2740000	2.2401600
82.51010	231.4220000	1.3653400	109.01000	351.6350000	1.8069900	135.51000	472.6810000	2.2486500
83.01010	233.8750000	1.3736500	109.50000	353.7670000	1.8151700	136.01000	474.8590000	2.2569800
83.50010	236.3090000	1.3818100	110.00000	356.2090000	1.8234800	136.51000	477.0560000	2.2653200
84.00010	238.6510000	1.3901600	110.50000	358.2990000	1.8318200	137.01000	479.0510000	2.2736600
84.50010	240.7070000	1.3984800	111.00000	360.4240000	1.8401500	137.50000	481.7530000	2.2818100
85.00010	242.7320000	1.4068200	111.51000	362.7390000	1.8486600	138.00000	484.1330000	2.2901500
85.51010	245.0900000	1.4153100	112.01000	365.4600000	1.8569800	138.50000	486.1160000	2.2985000
86.01010	247.6270000	1.4236700	112.51000	367.5350000	1.8653100	139.00000	488.4130000	2.3068100
86.51010	249.8320000	1.4320000	113.01000	369.6550000	1.8736600	139.51000	490.9540000	2.3153400
87.01010	252.1170000	1.4403100	113.50000	371.9860000	1.8818100	140.01000	493.2460000	2.3236500
87.50010	254.3290000	1.4484900	114.00000	374.3590000	1.8901600	140.51000	495.3560000	2.3319900
88.00010	256.5230000	1.4568200	114.50000	376.5640000	1.8984700	141.01000	497.4460000	2.3403300
88.50010	258.9150000	1.4651600	115.00000	378.6850000	1.9068200	141.50000	499.8570000	2.3484800
89.00010	260.7990000	1.4734800	115.51000	380.7630000	1.9153300	142.00000	502.2570000	2.3568300
89.51010	263.0190000	1.4819900	116.01000	383.4000000	1.9236400	142.50000	504.4920000	2.3651600
90.01010	265.3960000	1.4903200	116.51000	385.7620000	1.9320000	143.00000	506.7810000	2.3734900
90.51010	268.0820000	1.4986500	117.01000	387.8400000	1.9403100	143.51000	509.1730000	2.3819900
91.01010	270.0000000	1.5070000	117.50000	390.2780000	1.9484900	144.01000	511.4580000	2.3879900
91.50010	272.2090000	1.5151400	118.00000	392.6170000	1.9568300	144.51000	513.7320000	2.3986400
92.00010	274.6770000	1.5234800	118.50000	395.1230000	1.9651500	145.01000	515.9060000	2.4069800
92.50010	276.9930000	1.5318300	119.00000	397.2250000	1.9734900	145.50000	518.0110000	2.4151700
93.00010	279.1820000	1.5401500	119.51000	399.3270000	1.9819900	146.00000	520.4490000	2.4234700
93.51010	281.0050000	1.5486500	120.01000	401.5660000	1.9903300	146.50000	523.0360000	2.4318100
94.01010	283.2630000	1.5569700	120.51000	404.0080000	1.9986500	147.00000	524.9770000	2.4401700
94.51010	285.8580000	1.5653300	121.01000	406.3270000	2.0069800	147.50000	527.3430000	2.4484800
95.01010	288.2040000	1.5736600	121.50000	408.4210000	2.0151600	148.00000	529.6730000	2.4568400
95.50010	290.2140000	1.5818100	122.00000	410.8550000	2.0234800	148.50000	531.8100000	2.4651400

Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
149.00000	534.2240000	2.4735000	175.51000	653.7350000	2.9153100	202.00000	780.9440000	3.3568300
149.50000	536.0010000	2.4818300	176.00000	655.8090000	2.9234900	202.50000	783.4890000	3.3651600
150.01000	538.5840000	2.4903200	176.50000	658.2470000	2.9318200	203.00000	786.0340000	3.3734800
150.51000	541.0220000	2.4986700	177.00000	660.5290000	2.9334800	203.50000	788.5440000	3.3818200
151.01000	543.2770000	2.5069900	177.50000	662.5810000	2.9353300	204.01000	790.8410000	3.3903200
151.50000	545.5040000	2.5151500	178.01000	664.9530000	2.9569900	204.51000	793.4810000	3.3986500
152.00000	547.8740000	2.5234900	178.51000	667.1850000	2.9653200	205.01000	796.0800000	3.4070100
152.50000	550.3150000	2.5318200	179.01000	669.6920000	2.9736500	205.51000	798.3720000	3.4153200
153.00000	552.5660000	2.5401500	179.51000	671.7280000	2.9820000	206.00000	800.7990000	3.4234900
153.50000	554.7290000	2.5484900	180.00000	673.7650000	2.9901500	206.50000	803.2060000	3.4318300
154.01000	556.9640000	2.5570000	180.50000	676.2220000	2.9984800	207.00000	805.8890000	3.4401500
154.51000	559.1800000	2.5653100	181.00000	678.4500000	3.0068300	207.50000	808.2390000	3.4484900
155.01000	561.7140000	2.5736500	181.50000	680.9220000	3.0151500	208.01000	810.5960000	3.4569700
155.51000	563.6850000	2.5820000	182.01000	683.0730000	3.0236600	208.51000	813.2710000	3.4653300
156.00000	565.9740000	2.5901500	182.51000	685.4270000	3.0319700	209.01000	815.6900000	3.4736600
156.50000	568.2440000	2.5985000	183.01000	687.9760000	3.0403400	209.51000	818.2390000	3.4819800
157.00000	570.6550000	2.6068100	183.51000	690.1230000	3.0486700	210.00000	820.5730000	3.4901600
157.50000	572.8330000	2.6151700	184.00000	692.4890000	3.0568100	210.50000	823.1870000	3.4984900
158.01000	574.8930000	2.6236600	184.50000	694.8080000	3.0651600	211.00000	825.6740000	3.5068300
158.51000	577.2890000	2.6319800	185.00000	697.3450000	3.0734800	211.50000	828.1010000	3.5151400
159.01000	579.7530000	2.6403300	185.50000	699.7600000	3.0818200	212.01000	830.5470000	3.5236600
159.51000	581.8860000	2.6486500	186.01000	702.1710000	3.0903200	212.51000	832.9880000	3.5320000
160.00000	584.2620000	2.6568200	186.51000	704.8120000	3.0986500	213.01000	835.5790000	3.5403100
160.50000	586.4400000	2.6651600	187.01000	707.2530000	3.1069900	213.51000	838.0360000	3.5486700
161.00000	588.7140000	2.6734800	187.51000	709.6070000	3.1153200	214.00000	840.2870000	3.5568100
161.50000	590.8230000	2.6818200	188.00000	711.8580000	3.1235100	214.50000	842.8510000	3.5651500
162.01000	593.1120000	2.6903200	188.50000	714.4260000	3.1318000	215.00000	845.3270000	3.5734900
162.51000	595.2710000	2.6986700	189.00000	716.9550000	3.1401600	215.50000	847.7720000	3.5818200
163.01000	597.4610000	2.7069800	189.50000	719.2820000	3.1485000	216.01000	850.2830000	3.5903200
163.51000	599.9600000	2.7153200	190.01000	721.8310000	3.1569900	216.51000	852.8810000	3.5986500
164.00000	601.9810000	2.7235000	190.51000	724.2230000	3.1653200	217.01000	855.4790000	3.6070000
164.50000	604.3040000	2.7318200	191.01000	726.8220000	3.1736400	217.51000	857.8710000	3.6153200
165.00000	606.4590000	2.7401600	191.51000	729.2790000	3.1819900	218.00000	860.6490000	3.6234800
165.50000	608.6950000	2.7484800	192.00000	731.4790000	3.1901600	218.50000	863.3090000	3.6318200
166.01000	611.2200000	2.7570000	192.50000	734.0050000	3.1984800	219.00000	865.7580000	3.6401500
166.51000	613.2460000	2.7653200	193.00000	736.4660000	3.2068200	219.50000	868.0050000	3.6485000
167.01000	615.4350000	2.7736400	193.50000	739.0800000	3.2151500	220.01000	870.2750000	3.6569800
167.51000	617.6780000	2.7820000	194.01000	741.5830000	3.2236600	220.51000	873.3010000	3.6653200
168.00000	620.0780000	2.7901600	194.51000	744.0890000	3.2319900	221.01000	875.7740000	3.6736700
168.50000	622.2520000	2.7984800	195.01000	746.5840000	3.2403200	221.51000	878.1080000	3.6819800
169.00000	624.3650000	2.8068200	195.51000	748.9730000	3.2486600	222.00000	880.4810000	3.6901700
169.50000	626.8990000	2.8151500	196.00000	751.1810000	3.2568200	222.50000	883.0870000	3.6984800
170.01000	629.0000000	2.8236500	196.50000	753.7910000	3.2651700	223.00000	885.6210000	3.7068200
170.51000	631.3770000	2.8319900	197.00000	756.2790000	3.2734800	223.50000	887.6950000	3.7151700
171.01000	633.4370000	2.8403400	197.50000	758.8540000	3.2818200	224.01000	890.1720000	3.7236500
171.51000	635.6300000	2.8486400	198.00000	761.1050000	3.2901700	224.51000	892.9880000	3.7319900
172.00000	638.0070000	2.8568200	198.50000	763.6570000	3.2984900	225.01000	895.5400000	3.7403200
172.50000	640.2690000	2.8651700	199.00000	766.1140000	3.3068200	225.51000	897.9480000	3.7486600
173.00000	642.4700000	2.8734900	199.50000	768.6630000	3.3151500	226.00000	900.3130000	3.7568100
173.50000	644.6710000	2.8818300	200.01000	771.0250000	3.3236700	226.50000	903.2480000	3.7651500
174.01000	647.0020000	2.8903100	200.51000	773.4780000	3.3319900	227.00000	905.2880000	3.7734900
174.51000	649.3360000	2.8986700	201.01000	776.2210000	3.3403000	227.50000	907.5880000	3.7818200
175.01000	651.3850000	2.9069900	201.51000	778.4950000	3.3486500	228.01000	910.2210000	3.7903300

Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
229.01000	915.4450000	3.8069900	256.01000	1050.1400000	4.2570000	283.01000	1185.4200000	4.7069800
229.51000	917.7600000	3.8153300	256.50000	1052.5500000	4.2651500	283.51000	1188.0200000	4.7153200
230.00000	920.2400000	3.8234800	257.00000	1055.0300000	4.2734900	284.01000	1190.4300000	4.7236500
230.50000	922.9070000	3.8318300	257.50000	1057.5200000	4.2818300	284.50000	1193.0400000	4.7318200
231.00000	925.2650000	3.8401500	258.00000	1060.2600000	4.2901500	285.00000	1195.6200000	4.7401700
231.50000	927.4770000	3.8484900	258.51000	1062.5100000	4.2986400	285.50000	1198.0000000	4.7484800
232.01000	930.0030000	3.8570000	259.01000	1064.9200000	4.3069900	286.00000	1200.6500000	4.7568200
232.51000	932.9110000	3.8653200	259.51000	1067.4700000	4.3153300	286.51000	1203.0200000	4.7653400
233.01000	935.2230000	3.8736500	260.01000	1070.2100000	4.3236400	287.01000	1205.7700000	4.7736500
233.51000	937.8940000	3.8819800	260.50000	1072.4700000	4.3318200	287.51000	1208.1700000	4.7819900
234.00000	940.2590000	3.8901600	261.00000	1074.9500000	4.3401700	288.01000	1210.6600000	4.7903100
234.50000	942.8230000	3.8984800	261.50000	1077.4800000	4.3484800	288.50000	1213.2700000	4.7985000
235.00000	945.2230000	3.9068200	262.00000	1080.0600000	4.3568400	289.00000	1215.7100000	4.8068300
235.50000	947.2860000	3.9151600	262.51000	1082.4500000	4.3653100	289.50000	1218.4200000	4.8151400
236.01000	950.2090000	3.9236500	263.01000	1084.7000000	4.3736600	290.00000	1220.5900000	4.8234900
236.51000	952.9340000	3.9320000	263.51000	1087.5000000	4.3820000	290.51000	1223.2000000	4.8319900
237.01000	955.1540000	3.9403100	264.01000	1090.2500000	4.3903200	291.01000	1225.9300000	4.8403200
237.51000	957.5840000	3.9486500	264.50000	1092.4000000	4.3984900	291.51000	1228.3000000	4.8486600
238.00000	959.9950000	3.9568400	265.00000	1095.1900000	4.4068200	292.01000	1230.8700000	4.8569900
238.50000	962.8840000	3.9651500	265.50000	1097.6900000	4.4151500	292.50000	1233.2400000	4.8651600
239.00000	964.9860000	3.9735000	266.00000	1100.2000000	4.4234900	293.00000	1235.9300000	4.8734800
239.50000	967.1750000	3.9818200	266.51000	1102.4700000	4.4319900	293.50000	1238.3300000	4.8818400
240.01000	970.0110000	3.9903300	267.01000	1104.8600000	4.4403100	294.00000	1240.7200000	4.8901500
240.51000	972.7040000	3.9986600	267.51000	1107.5300000	4.4486500	294.51000	1243.4900000	4.8986500
241.01000	975.1500000	4.0069900	268.01000	1110.2200000	4.4570000	295.01000	1246.0100000	4.9070000
241.51000	977.6030000	4.0153100	268.52000	1112.4600000	4.4654600	295.51000	1248.4800000	4.9153200
242.00000	980.1210000	4.0234800	269.00000	1115.1200000	4.4734800	296.01000	1250.9400000	4.9236600
242.50000	982.6390000	4.0318300	269.50000	1117.5500000	4.4818300	296.50000	1253.4400000	4.9318000
243.00000	984.8060000	4.0401400	270.00000	1120.1000000	4.4901600	297.00000	1256.1200000	4.9401700
243.50000	987.3090000	4.0484800	270.51000	1122.3900000	4.4986700	297.50000	1258.4700000	4.9484900
244.01000	990.0680000	4.0569900	271.01000	1124.8900000	4.5069800	298.00000	1261.0100000	4.9568000
244.51000	992.6970000	4.0653200	271.51000	1127.6200000	4.5153300	298.50000	1263.4000000	4.9651500
245.01000	994.8900000	4.0736700	272.01000	1130.1400000	4.5236600	299.00000	1266.1200000	4.9734900
245.51000	997.4770000	4.0819700	272.50000	1132.5700000	4.5318100	299.50000	1268.6100000	4.9818200
246.00000	1000.0100000	4.0901500	273.00000	1135.1400000	4.5401600	300.00000	1271.0400000	4.9901500
246.50000	1002.5000000	4.0984900	273.50000	1137.6600000	4.5484800	300.51000	1273.7900000	4.9986600
247.00000	1004.8100000	4.1068100	274.00000	1140.1500000	4.5568200	301.01000	1276.2400000	5.0069900
247.50000	1007.0100000	4.1151600	274.51000	1142.3700000	4.5653200	301.51000	1278.8400000	5.0153200
248.00000	1009.9500000	4.1234800	275.01000	1145.0200000	4.5736500	302.01000	1281.1700000	5.0236800
248.50000	1012.5600000	4.1318200	275.51000	1147.8500000	4.5819800	302.50000	1283.6500000	5.0318200
249.00000	1014.9000000	4.1401600	276.01000	1150.1900000	4.5903200	303.00000	1286.3600000	5.0401500
249.50000	1017.6400000	4.1484900	276.50000	1152.6300000	4.5985000	303.50000	1288.7200000	5.0485000
250.00000	1020.1400000	4.1568100	277.00000	1154.9900000	4.6068100	304.00000	1291.3700000	5.0568200
250.51000	1022.7000000	4.1653200	277.50000	1157.8800000	4.6151500	304.51000	1293.9100000	5.0653300
251.01000	1024.9600000	4.1736600	278.00000	1160.0600000	4.6235000	305.01000	1296.3900000	5.0736400
251.51000	1027.3800000	4.1819800	278.51000	1162.4700000	4.6319900	305.51000	1298.8600000	5.0820000
252.00000	1030.2400000	4.1901500	279.01000	1164.9200000	4.6403300	306.01000	1301.2200000	5.0903300
252.50000	1032.6100000	4.1985000	279.51000	1167.7300000	4.6486400	306.50000	1303.9800000	5.0984700
253.00000	1034.9100000	4.2068200	280.01000	1170.1700000	4.6570000	307.00000	1306.3300000	5.1068200
253.50000	1037.5500000	4.2151600	280.50000	1172.5700000	4.6651600	307.50000	1308.8200000	5.1151600
254.00000	1040.1400000	4.2234800	281.00000	1175.3500000	4.6734700	308.00000	1311.3100000	5.1234900
254.51000	1042.6500000	4.2319900	281.50000	1177.9500000	4.6818300	308.51000	1313.9600000	5.1319800
255.01000	1044.7900000	4.2403300	282.00000	1180.4000000	4.6901500	309.01000	1316.5600000	5.1403200
255.51000	1047.5000000	4.2486500	282.51000	1182.8100000	4.6986500	309.51000	1318.9700000	5.1486600

Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
310.01000	1321.5400000	5.1569900	336.51000	1456.3300000	5.5986500	363.01000	1593.9800000	6.0403300
310.50000	1324.1400000	5.1651700	337.01000	1458.9000000	5.6069900	363.51000	1597.2400000	6.0486600
311.00000	1326.5100000	5.1734800	337.51000	1461.5400000	5.6153300	364.01000	1599.7300000	6.0569700
311.57000	1329.6700000	5.1829800	338.01000	1464.1300000	5.6236600	364.51000	1602.3400000	6.0653200
312.00000	1331.7200000	5.1901600	338.50000	1466.4900000	5.6318100	365.00000	1604.9200000	6.0735000
312.51000	1334.5500000	5.1986600	339.00000	1469.1600000	5.6401500	365.50000	1607.6200000	6.0818100
313.01000	1336.7800000	5.2069900	339.50000	1471.9100000	5.6485000	365.52000	1607.7100000	6.0821300
313.51000	1339.3400000	5.2153200	340.00000	1474.1900000	5.6568100	365.54000	1607.8500000	6.0824800
314.01000	1341.9800000	5.2236700	340.51000	1476.8200000	5.6653100	366.00000	1610.1300000	6.0901400
314.50000	1344.3300000	5.2318300	341.01000	1479.4100000	5.6736600	366.50000	1612.3000000	6.0984900
315.00000	1346.8800000	5.2401500	341.51000	1482.1200000	5.6819900	367.03000	1615.3700000	6.1073200
315.50000	1349.4500000	5.2484900	342.01000	1485.0200000	5.6903300	367.51000	1618.1500000	6.1153400
316.00000	1352.0100000	5.2568200	342.50000	1487.4400000	5.6984800	368.01000	1620.5100000	6.1236500
316.51000	1354.6000000	5.2653200	343.00000	1490.3300000	5.7068200	368.51000	1623.1800000	6.1319900
317.01000	1357.0600000	5.2736500	343.50000	1492.6900000	5.7151700	369.00000	1625.4900000	6.1401600
317.51000	1359.5700000	5.2819900	344.00000	1495.0600000	5.7234800	369.50000	1628.4700000	6.1484800
318.01000	1362.2600000	5.2903300	344.51000	1497.8700000	5.7320000	370.00000	1630.6100000	6.1568300
318.50000	1364.7300000	5.2984800	345.01000	1500.7700000	5.7403200	370.50000	1633.0500000	6.1651500
319.00000	1367.3100000	5.3068300	345.51000	1503.1700000	5.7486600	371.01000	1636.2100000	6.1736600
319.50000	1369.8300000	5.3151400	346.01000	1505.7500000	5.7570000	371.51000	1638.7500000	6.1820000
320.00000	1372.5300000	5.3234900	346.50000	1508.2900000	5.7651600	372.01000	1641.3900000	6.1903200
320.51000	1374.8700000	5.3320000	347.00000	1510.9500000	5.7734800	372.51000	1644.0500000	6.1986500
321.01000	1377.5400000	5.3403200	347.50000	1513.2500000	5.7818200	373.00000	1646.8700000	6.2068200
321.51000	1380.0100000	5.3486600	348.00000	1515.7500000	5.7901700	373.50000	1649.2300000	6.2151700
322.01000	1382.6600000	5.3569800	348.50000	1518.6400000	5.7984800	374.00000	1651.4400000	6.2234700
322.50000	1385.0500000	5.3651700	349.00000	1521.3100000	5.8068200	374.50000	1654.3500000	6.2318200
323.00000	1387.4900000	5.3734900	349.50000	1523.7900000	5.8151600	375.01000	1657.2700000	6.2403400
323.50000	1390.1700000	5.3818200	350.00000	1526.5700000	5.8234800	375.51000	1659.7200000	6.2486500
324.00000	1392.7000000	5.3901600	350.50000	1529.1900000	5.8318300	376.01000	1662.1200000	6.2570000
324.51000	1395.1900000	5.3986600	351.01000	1531.7500000	5.8403100	376.51000	1664.6600000	6.2653100
325.01000	1397.5900000	5.4070000	351.51000	1534.0300000	5.8486500	377.00000	1667.4800000	6.2734900
325.51000	1400.1300000	5.4153200	352.01000	1536.7100000	5.8570000	377.50000	1669.7000000	6.2818300
326.01000	1402.9400000	5.4236600	352.50000	1539.5900000	5.8651500	378.00000	1672.2500000	6.2901400
326.50000	1405.2100000	5.4318300	353.00000	1542.0000000	5.8734900	378.50000	1675.1700000	6.2985000
327.00000	1407.8800000	5.4401500	353.50000	1544.7100000	5.8818200	379.01000	1677.8500000	6.3069900
327.50000	1410.4200000	5.4485000	354.00000	1547.2900000	5.8901600	379.51000	1680.4500000	6.3153200
328.00000	1413.0600000	5.4568200	354.50000	1549.9700000	5.8985000	380.01000	1683.1000000	6.3236600
328.51000	1415.6800000	5.4653100	355.01000	1552.3800000	5.9069800	380.51000	1685.7800000	6.3319900
329.01000	1418.0200000	5.4736700	355.51000	1554.7400000	5.9153100	381.00000	1688.0500000	6.3401500
329.51000	1420.7300000	5.4819900	356.01000	1557.8600000	5.9236600	381.50000	1690.4700000	6.3484900
330.01000	1423.2600000	5.4903100	356.51000	1560.3700000	5.9320000	382.00000	1693.1000000	6.3568400
330.50000	1425.6300000	5.4984800	357.00000	1562.9100000	5.9401400	382.50000	1695.9500000	6.3651400
331.00000	1428.2500000	5.5068300	357.50000	1565.5300000	5.9484900	383.03000	1698.4700000	6.3739800
331.50000	1430.7600000	5.5151400	358.00000	1568.3300000	5.9568300	383.51000	1700.8400000	6.3820100
332.00000	1433.3700000	5.5234800	358.50000	1570.8300000	5.9651500	384.01000	1703.6500000	6.3903200
332.51000	1435.7300000	5.5319900	359.01000	1573.1200000	5.9736700	384.51000	1706.4500000	6.3986700
333.01000	1438.5500000	5.5403200	359.51000	1575.7700000	5.9819800	385.00000	1708.5000000	6.4068100
333.51000	1441.1000000	5.5486700	360.01000	1578.9000000	5.9903200	385.50000	1711.0600000	6.4151700
334.01000	1443.5000000	5.5569800	360.51000	1581.1800000	5.9986700	386.00000	1713.8200000	6.4235000
334.50000	1446.1600000	5.5651600	361.00000	1583.9100000	6.0068100	386.29000	1715.5000000	6.4283200
335.00000	1448.6100000	5.5735000	361.50000	1586.4600000	6.0151600	386.50000	1716.6100000	6.4318100
335.50000	1451.5200000	5.5818200	362.00000	1589.2600000	6.0234900	387.01000	1718.9100000	6.4403300
336.00000	1453.7900000	5.5901700	362.50000	1591.5400000	6.0318200	387.51000	1721.6600000	6.4486500

Timp de incercare *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
388.01000	1724.5600000	6.4569800	414.01000	1858.6700000	6.8903200	441.01000	1998.5100000	7.3403100
388.51000	1726.8400000	6.4653300	414.51000	1861.2500000	6.8986500	441.51000	2001.0400000	7.3486600
388.53000	1726.9200000	6.4656700	415.00000	1863.7300000	6.9068300	442.01000	2003.3700000	7.3569700
388.55000	1727.0200000	6.4660000	415.50000	1866.3800000	6.9151400	442.51000	2005.9200000	7.3653300
389.00000	1729.1700000	6.4734900	416.00000	1868.9100000	6.9235000	443.00000	2008.6200000	7.3735100
389.50000	1731.6800000	6.4818200	416.50000	1871.5300000	6.9318100	443.50000	2011.0800000	7.3818200
390.00000	1734.8000000	6.4901500	417.01000	1874.2000000	6.9403200	444.00000	2013.5000000	7.3901500
390.50000	1737.1200000	6.4985100	417.51000	1876.7200000	6.9486700	444.50000	2016.3600000	7.3984900
391.01000	1739.5800000	6.5069800	418.01000	1879.3300000	6.9569900	445.01000	2018.9600000	7.4070000
391.51000	1742.4400000	6.5153100	418.51000	1882.0400000	6.9653200	445.51000	2021.2900000	7.4153200
392.01000	1745.0100000	6.5236700	419.00000	1884.3700000	6.9734800	446.01000	2023.9000000	7.4236500
392.51000	1747.4000000	6.5319900	419.50000	1887.0000000	6.9818300	446.51000	2026.6400000	7.4319900
393.00000	1749.7400000	6.5401600	420.00000	1889.4400000	6.9901600	447.00000	2029.1800000	7.4401500
393.50000	1752.3800000	6.5484700	420.50000	1892.2800000	6.9984800	448.50000	2037.1900000	7.4651500
394.00000	1755.2100000	6.5568400	421.01000	1894.5300000	7.0070000	449.00000	2039.6600000	7.4735000
394.50000	1757.5500000	6.5651600	421.51000	1897.2500000	7.0153200	449.50000	2042.2500000	7.4818100
395.01000	1760.3000000	6.5736400	422.01000	1899.8600000	7.0236600	450.00000	2044.6400000	7.4901600
395.51000	1762.9700000	6.5820000	422.51000	1902.4700000	7.0319900	450.50000	2047.4400000	7.4984800
396.01000	1765.5500000	6.5903200	423.00000	1905.0800000	7.0401500	451.00000	2050.0900000	7.5068200
396.51000	1767.9100000	6.5986500	423.50000	1907.3900000	7.0484900	451.51000	2052.4500000	7.5153300
397.00000	1770.2700000	6.6068200	424.00000	1910.3800000	7.0568100	452.01000	2055.2300000	7.5236500
397.50000	1773.2500000	6.6151600	424.50000	1912.8100000	7.0651700	452.51000	2057.7300000	7.5319800
398.00000	1775.7000000	6.6234900	425.01000	1915.2600000	7.0736500	453.00000	2060.2800000	7.5401500
398.50000	1778.1900000	6.6318200	425.51000	1918.1000000	7.0819800	453.50000	2062.8000000	7.5485000
399.00000	1780.7600000	6.6401700	426.01000	1920.4800000	7.0903300	454.00000	2065.1000000	7.5568200
399.50000	1783.5400000	6.6484800	426.51000	1923.1900000	7.0986600	454.50000	2067.8200000	7.5651500
400.00000	1785.9400000	6.6568200	427.00000	1925.5800000	7.1068200	455.00000	2070.3900000	7.5734900
400.50000	1788.2400000	6.6651700	427.50000	1928.1600000	7.1151500	455.51000	2073.0300000	7.5819800
401.01000	1791.0400000	6.6736600	428.00000	1930.9900000	7.1235000	456.01000	2075.7600000	7.5903400
401.51000	1793.8400000	6.6819900	428.50000	1933.4100000	7.1318200	456.51000	2078.2200000	7.5986400
402.01000	1796.3300000	6.6903100	429.01000	1936.0100000	7.1403000	457.01000	2080.9600000	7.6069900
402.51000	1799.1700000	6.6986700	429.51000	1938.5900000	7.1486600	457.50000	2083.2700000	7.6151700
403.00000	1801.5400000	6.7068300	430.01000	1941.2400000	7.1569900	458.00000	2086.0200000	7.6234800
403.50000	1804.3100000	6.7151400	430.51000	1943.8100000	7.1653300	458.50000	2088.3900000	7.6318300
404.00000	1806.7000000	6.7234900	431.00000	1946.2800000	7.1734800	459.00000	2091.0000000	7.6401500
404.50000	1809.3200000	6.7318200	431.50000	1948.9800000	7.1818200	459.51000	2093.7000000	7.6486600
405.01000	1812.1000000	6.7403100	432.00000	1951.4400000	7.1901700	460.01000	2096.1000000	7.6570000
405.51000	1814.7200000	6.7486500	432.50000	1954.0900000	7.1984800	460.51000	2099.0300000	7.6653200
406.01000	1817.2500000	6.7569900	433.03000	1957.0300000	7.2073400	461.01000	2101.3800000	7.6736500
406.51000	1819.7500000	6.7653300	433.51000	1959.5100000	7.2153100	461.50000	2103.9700000	7.6818200
407.00000	1822.4200000	6.7734900	434.01000	1962.1100000	7.2236600	462.00000	2106.6900000	7.6901600
407.50000	1825.0000000	6.7818400	434.51000	1964.4700000	7.2320000	462.50000	2109.1400000	7.6984700
408.02000	1827.4600000	6.7904800	435.00000	1967.2200000	7.2401600	463.00000	2112.2500000	7.7068100
408.50000	1830.2500000	6.7984900	435.50000	1969.7700000	7.2484900	463.51000	2114.9200000	7.7153200
409.01000	1832.8200000	6.8070000	436.00000	1972.2400000	7.2568200	464.01000	2117.3000000	7.7236500
409.51000	1835.3500000	6.8153200	436.50000	1974.8700000	7.2651700	464.51000	2119.7900000	7.7320000
410.01000	1837.9400000	6.8236600	437.01000	1977.6200000	7.2736500	465.01000	2122.0300000	7.7403100
410.51000	1840.5300000	6.8319800	437.51000	1980.3700000	7.2819800	465.50000	2125.1300000	7.7484900
411.00000	1843.2500000	6.8401700	438.01000	1982.5700000	7.2903300	466.00000	2127.5700000	7.7568300
411.50000	1845.5000000	6.8485000	438.51000	1985.2600000	7.2986600	466.50000	2130.1300000	7.7651400
412.00000	1848.1300000	6.8568100	439.00000	1988.0000000	7.3068300	467.00000	2132.6700000	7.7734900
412.50000	1850.7700000	6.8651600	439.50000	1990.5000000	7.3151400	468.01000	2138.1200000	7.7903300
413.01000	1853.6000000	6.8736500	440.00000	1993.0600000	7.3234900	468.51000	2140.1600000	7.7986700
413.51000	1856.0500000	6.8819800	440.50000	1995.6100000	7.3318300	469.01000	2143.0400000	7.8069900

Timp de incercare *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
469.50000	2145.9000000	7.8151400	496.51000	2285.1900000	8.2653100	524.00000	2426.2300000	8.7234900
470.00000	2148.4100000	7.8234900	497.01000	2287.9500000	8.2736500	524.50000	2428.9600000	8.7318100
470.50000	2151.0800000	7.8318300	497.50000	2290.2100000	8.2818400	525.00000	2431.5600000	8.7401700
471.00000	2153.5600000	7.8401400	498.00000	2293.1600000	8.2901600	525.02000	2431.6800000	8.7405000
471.51000	2156.6400000	7.8486500	498.50000	2295.3500000	8.2985000	525.57000	2434.3100000	8.7496700
472.01000	2158.5800000	7.8569900	499.00000	2297.6700000	8.3068100	526.01000	2436.7900000	8.7569700
473.01000	2163.9300000	7.8736700	499.50000	2300.7300000	8.3151700	526.51000	2439.4500000	8.7653200
473.50000	2166.6000000	7.8818100	500.00000	2303.4100000	8.3234900	527.01000	2441.9300000	8.7736500
474.00000	2169.0500000	7.8901600	500.50000	2305.9200000	8.3318100	527.50000	2444.2800000	8.7818200
474.50000	2171.5800000	7.8985000	501.00000	2308.4200000	8.3401700	528.00000	2447.0700000	8.7901500
475.00000	2174.3400000	7.9068200	501.51000	2311.1300000	8.3486500	528.50000	2449.6900000	8.7984900
475.51000	2176.7900000	7.9153400	502.31000	2315.0100000	8.3619900	529.00000	2452.1300000	8.8068300
476.01000	2179.1700000	7.9236500	502.51000	2315.8400000	8.3653200	530.51000	2459.9700000	8.8319800
476.51000	2181.8600000	7.9319900	503.01000	2318.4800000	8.3736500	531.01000	2462.5800000	8.8403300
477.01000	2184.5600000	7.9403300	504.50000	2326.3800000	8.3985100	531.50000	2464.9400000	8.8485000
477.50000	2187.1000000	7.9484800	505.00000	2328.9200000	8.4068100	532.00000	2467.6800000	8.8568200
478.00000	2189.6400000	7.9568100	505.51000	2331.8000000	8.4153200	532.50000	2470.2400000	8.8651600
478.50000	2192.4100000	7.9651500	506.01000	2334.0700000	8.4236700	533.00000	2472.6200000	8.8734800
479.00000	2195.0700000	7.9735000	506.51000	2336.3800000	8.4319900	533.51000	2475.4800000	8.8820000
479.51000	2197.4100000	7.9819700	507.01000	2339.1800000	8.4403300	534.01000	2477.7400000	8.8903300
480.01000	2199.9600000	7.9903100	507.50000	2341.9500000	8.4484800	534.51000	2480.5000000	8.8986400
480.51000	2202.5000000	7.9986600	508.00000	2344.4200000	8.4568400	535.01000	2482.8200000	8.9069900
481.01000	2205.3600000	8.0069800	508.50000	2347.0100000	8.4651600	535.50000	2485.4100000	8.9151600
481.50000	2207.6600000	8.0151700	509.00000	2349.7900000	8.4734800	536.00000	2488.0400000	8.9235000
482.00000	2210.2800000	8.0234800	509.51000	2352.4700000	8.4820000	536.50000	2490.2400000	8.9318100
482.50000	2213.1200000	8.0318300	510.01000	2354.8000000	8.4903200	537.00000	2492.9300000	8.9401600
483.00000	2215.5600000	8.0401600	510.51000	2357.2300000	8.4986400	537.51000	2495.4600000	8.9486700
483.51000	2217.9000000	8.0486500	511.01000	2360.0200000	8.5069900	538.01000	2498.3400000	8.9569900
484.01000	2220.5200000	8.0570000	511.50000	2362.7500000	8.5151500	538.51000	2500.7200000	8.9653400
484.51000	2223.3800000	8.0653200	512.00000	2365.0200000	8.5234900	539.01000	2503.4400000	8.9736400
485.01000	2226.0000000	8.0736600	512.50000	2367.6800000	8.5318200	539.50000	2506.1100000	8.9818200
485.50000	2228.4100000	8.0818200	513.00000	2370.5800000	8.5401700	540.00000	2508.4800000	8.9901700
486.00000	2231.0000000	8.0901600	513.51000	2372.6100000	8.5486500	540.50000	2511.0800000	8.9984900
486.50000	2233.5600000	8.0984800	514.01000	2375.0500000	8.5569800	541.00000	2513.5200000	9.0068200
487.00000	2236.0500000	8.1068200	514.51000	2377.4900000	8.5653300	541.51000	2516.2800000	9.0153100
487.51000	2238.3500000	8.1153400	515.01000	2380.7300000	8.5736500	542.01000	2518.8700000	9.0236700
488.01000	2240.8100000	8.1236400	515.50000	2383.0700000	8.5818300	542.51000	2521.1600000	9.0319900
488.51000	2243.9500000	8.1319800	516.00000	2385.2500000	8.5901400	543.01000	2523.8800000	9.0403100
489.01000	2246.1500000	8.1403300	516.50000	2387.7900000	8.5985000	543.50000	2526.3400000	9.0484900
489.50000	2248.9500000	8.1484900	517.00000	2390.4100000	8.6068200	544.00000	2529.0300000	9.0568200
490.00000	2251.4800000	8.1568400	517.51000	2393.0300000	8.6153100	544.50000	2531.3200000	9.0651600
490.50000	2254.0600000	8.1651400	518.01000	2395.1400000	8.6236600	545.00000	2533.8100000	9.0734800
491.00000	2256.4700000	8.1735000	518.51000	2397.9600000	8.6319900	545.51000	2536.7500000	9.0819900
491.51000	2258.8000000	8.1819900	519.01000	2400.7500000	8.6403200	546.05000	2539.4200000	9.0909900
492.01000	2261.9200000	8.1903100	519.50000	2402.9500000	8.6484900	546.51000	2541.8100000	9.0986500
492.51000	2264.5500000	8.1986600	520.00000	2405.7500000	8.6568300	547.01000	2544.3700000	9.1070000
493.01000	2267.0400000	8.2069800	520.50000	2408.1300000	8.6651600	547.50000	2546.9300000	9.1151500
493.50000	2269.8500000	8.2151500	521.00000	2410.9100000	8.6734800	548.00000	2549.4200000	9.1234900
494.00000	2272.4400000	8.2234900	521.51000	2413.2900000	8.6820100	548.50000	2551.6800000	9.1318300
494.50000	2275.0400000	8.2318200	522.01000	2415.7400000	8.6903100	549.00000	2554.3300000	9.1401500
495.00000	2277.1200000	8.2401500	522.51000	2418.7200000	8.6986500	549.51000	2557.0300000	9.1486500
495.51000	2280.0600000	8.2486500	523.01000	2421.2400000	8.7070000	550.00000	2559.4900000	9.1568100
496.01000	2282.8900000	8.2570100	523.50000	2423.7100000	8.7151600	550.50000	2562.0800000	9.1651700

Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
551.00000	2564.5900000	9.1734800	578.00000	2701.4500000	9.6234800	605.00000	2839.1100000	10.0735000
551.51000	2567.3900000	9.1819800	578.50000	2704.1000000	9.6318400	605.50000	2841.4300000	10.0818000
552.01000	2569.7400000	9.1903200	579.00000	2706.3800000	9.6401500	606.01000	2843.9500000	10.0903000
552.51000	2572.2400000	9.1986600	579.50000	2709.0600000	9.6484900	606.51000	2846.2900000	10.0987000
553.01000	2574.9200000	9.2070000	580.01000	2711.4200000	9.6570000	607.01000	2849.1800000	10.1070000
553.50000	2577.4500000	9.2151400	580.51000	2714.1500000	9.6653100	607.51000	2851.8500000	10.1153000
554.00000	2579.9800000	9.2234800	581.01000	2716.5900000	9.6736700	608.00000	2853.9900000	10.1235000
554.50000	2582.3600000	9.2318400	581.51000	2719.0900000	9.6819800	608.50000	2856.8600000	10.1318000
555.00000	2584.7500000	9.2401500	582.00000	2721.7500000	9.6901600	609.00000	2859.2500000	10.1402000
555.50000	2587.3300000	9.2485000	582.50000	2724.1900000	9.6985000	609.50000	2861.8800000	10.1485000
556.01000	2589.7600000	9.2569800	583.00000	2726.7900000	9.7068300	610.01000	2864.1700000	10.1570000
556.51000	2592.3300000	9.2653200	583.50000	2729.0500000	9.7151500	610.51000	2866.5100000	10.1653000
557.01000	2594.8600000	9.2736600	584.01000	2732.0400000	9.7236600	611.01000	2869.6200000	10.1736000
557.51000	2597.5000000	9.2819900	584.51000	2734.6200000	9.7320100	611.51000	2871.8100000	10.1820000
558.00000	2599.8100000	9.2901500	585.01000	2737.2600000	9.7403100	612.00000	2874.3100000	10.1902000
558.50000	2602.2700000	9.2984800	585.51000	2740.0800000	9.7486500	612.50000	2876.8400000	10.1985000
559.00000	2605.1300000	9.3068300	586.00000	2742.7100000	9.7568400	613.00000	2879.5100000	10.2068000
559.50000	2607.4300000	9.3151400	586.50000	2745.0800000	9.7651500	613.50000	2881.9400000	10.2152000
560.01000	2610.1400000	9.3236400	587.00000	2747.2400000	9.7735100	614.01000	2884.0500000	10.2237000
560.51000	2612.6600000	9.3319800	587.50000	2749.9400000	9.7818100	614.51000	2886.7600000	10.2320000
561.01000	2615.3700000	9.3403200	588.01000	2753.0200000	9.7903200	615.01000	2889.6100000	10.2403000
561.51000	2617.6400000	9.3486600	588.51000	2755.0200000	9.7986700	615.51000	2892.0900000	10.2487000
562.00000	2620.0800000	9.3568100	589.01000	2757.8500000	9.8069800	616.00000	2894.8800000	10.2568000
562.50000	2622.7400000	9.3651600	589.51000	2760.3700000	9.8153300	616.50000	2897.2500000	10.2652000
563.00000	2625.2200000	9.3735100	590.00000	2762.9800000	9.8234800	617.00000	2900.0700000	10.2735000
563.50000	2627.8400000	9.3818100	590.50000	2765.3400000	9.8318200	617.50000	2902.0800000	10.2818000
564.01000	2630.2200000	9.3903300	591.00000	2767.4500000	9.8401600	618.01000	2904.3100000	10.2903000
564.51000	2632.8200000	9.3986500	591.50000	2770.5900000	9.8484800	618.51000	2907.2300000	10.2987000
565.01000	2635.5400000	9.4069900	592.01000	2773.1900000	9.8569800	619.01000	2909.7300000	10.3070000
565.51000	2637.8300000	9.4153300	592.51000	2775.6400000	9.8653200	619.51000	2912.1500000	10.3153000
566.00000	2640.3300000	9.4234900	593.01000	2778.1400000	9.8736600	620.00000	2914.5400000	10.3235000
566.50000	2642.7500000	9.4318100	593.51000	2780.5800000	9.8819700	620.50000	2917.2200000	10.3318000
567.00000	2645.3500000	9.4401500	594.00000	2783.4000000	9.8901500	621.00000	2919.5100000	10.3402000
567.50000	2647.8500000	9.4484900	594.50000	2785.2900000	9.8985100	621.50000	2921.7200000	10.3485000
568.01000	2650.3600000	9.4569800	595.00000	2787.8800000	9.9068200	622.01000	2924.1400000	10.3570000
568.51000	2653.0400000	9.4653100	595.50000	2790.8300000	9.9151700	622.51000	2926.8000000	10.3653000
569.01000	2655.7000000	9.4736500	596.01000	2793.2200000	9.9236500	623.01000	2929.6300000	10.3736000
569.51000	2658.0800000	9.4819800	596.51000	2795.8000000	9.9319900	623.51000	2931.8600000	10.3820000
570.00000	2660.7400000	9.4901600	597.01000	2798.2200000	9.9403400	624.00000	2934.5400000	10.3902000
570.50000	2663.1900000	9.4984700	597.51000	2801.0600000	9.9486500	624.50000	2937.2200000	10.3985000
571.00000	2665.9200000	9.5068200	598.00000	2803.3300000	9.9568300	625.00000	2939.6000000	10.4068000
571.50000	2668.2200000	9.5151700	598.50000	2805.7000000	9.9651600	625.50000	2942.0300000	10.4152000
572.01000	2670.7100000	9.5236500	599.00000	2808.5000000	9.9734800	626.01000	2944.4100000	10.4237000
572.51000	2673.3700000	9.5320000	599.50000	2811.1400000	9.9818300	626.51000	2947.3900000	10.4320000
573.01000	2676.0000000	9.5403200	600.00000	2813.6500000	9.9901500	627.01000	2949.7300000	10.4403000
573.51000	2678.4200000	9.5486600	600.50000	2816.1000000	9.9984800	627.51000	2951.9900000	10.4486000
574.00000	2680.7100000	9.5568300	601.00000	2818.7900000	10.0068000	628.00000	2954.7400000	10.4568000
574.50000	2683.6100000	9.5651600	601.50000	2821.5800000	10.0152000	628.50000	2957.1400000	10.4652000
575.00000	2685.8800000	9.5734700	602.01000	2823.6300000	10.0236000	629.02000	2959.9400000	10.4738000
575.50000	2688.5200000	9.5818100	602.51000	2826.0000000	10.0320000	629.50000	2961.9700000	10.4818000
576.01000	2691.2600000	9.5903300	603.01000	2828.6100000	10.0403000	630.01000	2964.3100000	10.4903000
576.51000	2693.8000000	9.5986500	603.51000	2831.6400000	10.0486000	630.51000	2967.4400000	10.4987000
577.01000	2696.4100000	9.6069800	604.00000	2833.8300000	10.0568000	631.01000	2969.5300000	10.5070000
577.51000	2698.6500000	9.6153300	604.50000	2836.2200000	10.0651000	631.51000	2972.2700000	10.5153000

Timp de incercare *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
632.00000	2974.7400000	10.5235000	658.01000	3105.6300000	10.9570000	684.51000	3237.8200000	11.3986000
632.50000	2977.5100000	10.5318000	658.50000	3108.0400000	10.9652000	685.01000	3240.6400000	11.4070000
633.00000	2979.8600000	10.5402000	659.00000	3110.2100000	10.9735000	685.51000	3242.9600000	11.4153000
633.50000	2981.9900000	10.5485000	659.50000	3112.9200000	10.9818000	686.01000	3245.6200000	11.4237000
634.01000	2984.9000000	10.5570000	660.00000	3115.3900000	10.9902000	686.50000	3248.0000000	11.4318000
634.51000	2987.5700000	10.5653000	660.51000	3117.8900000	10.9987000	687.00000	3250.5200000	11.4402000
635.01000	2989.8200000	10.5737000	661.01000	3120.3100000	11.0070000	687.50000	3253.1200000	11.4485000
635.51000	2992.4000000	10.5820000	661.51000	3122.5700000	11.0153000	688.00000	3255.1600000	11.4568000
636.00000	2994.8400000	10.5901000	662.01000	3125.4600000	11.0237000	688.51000	3257.8700000	11.4653000
636.50000	2997.8400000	10.5985000	662.50000	3127.6300000	11.0318000	689.01000	3260.4200000	11.4736000
637.00000	2999.7400000	10.6068000	663.00000	3130.3700000	11.0402000	689.51000	3262.8000000	11.4820000
637.50000	3002.4000000	10.6152000	663.50000	3132.7600000	11.0485000	690.01000	3265.2600000	11.4903000
638.01000	3005.1300000	10.6237000	664.00000	3135.3300000	11.0568000	690.50000	3267.3700000	11.4985000
638.51000	3007.7400000	10.6320000	664.51000	3137.9200000	11.0653000	691.00000	3270.2600000	11.5068000
639.01000	3010.2300000	10.6403000	665.01000	3140.1500000	11.0737000	691.50000	3272.5200000	11.5152000
639.51000	3012.5500000	10.6487000	665.51000	3143.0100000	11.0820000	692.00000	3275.0400000	11.5235000
640.00000	3015.2300000	10.6568000	666.01000	3145.3600000	11.0903000	692.51000	3277.6400000	11.5320000
640.50000	3017.6200000	10.6652000	666.50000	3147.6400000	11.0985000	693.01000	3279.9000000	11.5403000
641.00000	3019.8300000	10.6735000	667.00000	3150.2700000	11.1068000	693.51000	3282.7500000	11.5487000
641.50000	3022.4700000	10.6818000	667.50000	3152.7400000	11.1151000	694.01000	3284.9100000	11.5570000
642.01000	3025.0900000	10.6903000	668.00000	3155.5800000	11.1235000	694.50000	3287.6800000	11.5652000
642.51000	3027.9800000	10.6987000	668.51000	3157.6300000	11.1320000	695.00000	3290.1100000	11.5735000
643.01000	3030.0500000	10.7070000	669.01000	3160.3500000	11.1403000	695.50000	3292.2600000	11.5818000
643.51000	3032.5000000	10.7153000	669.51000	3162.9800000	11.1487000	696.00000	3294.8200000	11.5902000
644.00000	3035.0800000	10.7235000	670.01000	3165.2900000	11.1570000	696.51000	3297.1600000	11.5987000
644.50000	3037.4600000	10.7318000	670.50000	3167.9400000	11.1652000	697.01000	3300.1500000	11.6070000
645.00000	3039.7100000	10.7402000	671.00000	3170.3700000	11.1735000	697.51000	3302.4200000	11.6153000
645.02000	3039.7900000	10.7405000	671.50000	3173.0400000	11.1818000	698.01000	3304.8000000	11.6237000
645.50000	3041.9500000	10.7485000	672.00000	3175.4300000	11.1902000	698.50000	3307.3000000	11.6318000
646.01000	3045.0200000	10.7570000	672.51000	3177.8300000	11.1987000	699.00000	3309.6200000	11.6401000
646.51000	3047.4600000	10.7653000	673.01000	3180.5100000	11.2070000	699.50000	3312.2500000	11.6485000
647.01000	3049.8600000	10.7736000	673.51000	3182.6200000	11.2153000	700.00000	3314.4500000	11.6568000
647.51000	3052.7700000	10.7820000	674.01000	3185.3400000	11.2237000	700.50000	3316.9300000	11.6652000
648.00000	3055.0600000	10.7902000	674.50000	3187.5800000	11.2318000	701.00000	3319.5000000	11.6735000
648.50000	3057.8100000	10.7985000	675.00000	3190.1200000	11.2402000	701.50000	3321.5800000	11.6818000
649.00000	3059.9400000	10.8068000	675.50000	3192.8900000	11.2485000	702.00000	3324.4600000	11.6902000
649.50000	3062.5100000	10.8152000	676.00000	3195.1500000	11.2568000	702.51000	3326.5600000	11.6987000
650.01000	3065.4300000	10.8237000	676.51000	3197.9600000	11.2653000	703.01000	3329.1800000	11.7070000
650.50000	3067.5500000	10.8318000	677.01000	3200.1800000	11.2737000	703.51000	3331.4900000	11.7153000
651.00000	3070.2700000	10.8402000	677.51000	3202.9000000	11.2820000	704.01000	3333.6700000	11.7237000
651.50000	3072.6900000	10.8485000	678.01000	3205.4400000	11.2903000	704.50000	3336.4100000	11.7318000
652.01000	3075.4700000	10.8570000	678.50000	3207.7500000	11.2985000	704.98000	3338.5600000	11.7398000
652.51000	3077.8900000	10.8653000	679.00000	3210.7900000	11.3068000	705.50000	3341.2800000	11.7485000
653.01000	3080.2800000	10.8736000	679.50000	3213.0600000	11.3152000	706.00000	3343.5800000	11.7568000
653.51000	3083.0200000	10.8820000	680.00000	3215.6500000	11.3235000	706.51000	3346.2500000	11.7653000
654.00000	3085.3800000	10.8902000	680.51000	3218.0600000	11.3320000	707.01000	3348.9300000	11.7737000
654.50000	3087.9900000	10.8985000	681.01000	3220.7100000	11.3403000	707.51000	3351.0100000	11.7820000
655.00000	3090.5800000	10.9068000	681.51000	3223.3100000	11.3487000	708.01000	3353.8000000	11.7903000
655.50000	3093.0100000	10.9151000	682.01000	3225.5900000	11.3570000	708.50000	3356.1000000	11.7985000
656.00000	3095.6200000	10.9235000	682.50000	3228.1800000	11.3652000	709.00000	3358.7800000	11.8068000
656.51000	3097.8600000	10.9320000	683.00000	3230.5300000	11.3735000	709.50000	3361.2000000	11.8152000
657.01000	3100.6100000	10.9403000	683.50000	3233.1300000	11.3818000	710.00000	3363.8200000	11.8235000
657.51000	3102.9800000	10.9487000	684.00000	3235.4900000	11.3902000	710.51000	3366.6200000	11.8320000

Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*	Timp de incercare *s*	Forta standard *N*	Deplsarea *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
711.01000	3368.9100000	11.8403000	738.00000	3498.7700000	12.2902000	765.01000	3621.3600000	12.7403000
711.51000	3370.7200000	11.8487000	738.51000	3501.5700000	12.2987000	765.51000	3623.6500000	12.7487000
712.01000	3372.6100000	11.8570000	739.01000	3503.5900000	12.3070000	766.01000	3624.9000000	12.7570000
712.50000	3375.0500000	11.8652000	739.51000	3506.3100000	12.3153000	766.51000	3626.5900000	12.7653000
713.00000	3378.0400000	11.8735000	740.01000	3508.3200000	12.3237000	767.00000	3628.3300000	12.7735000
713.50000	3380.0200000	11.8818000	740.50000	3510.7300000	12.3318000	767.50000	3630.6100000	12.7818000
714.00000	3382.5200000	11.8902000	741.00000	3513.6700000	12.3402000	768.00000	3632.4600000	12.7902000
714.51000	3384.5200000	11.8986000	741.50000	3515.9700000	12.3485000	768.50000	3634.5500000	12.7985000
715.01000	3387.1100000	11.9070000	742.00000	3518.6000000	12.3568000	769.01000	3636.5500000	12.8070000
715.51000	3389.5600000	11.9153000	742.51000	3520.8500000	12.3653000	769.51000	3638.6000000	12.8153000
716.01000	3391.6000000	11.9236000	743.01000	3523.5500000	12.3737000	770.01000	3640.9500000	12.8237000
716.50000	3394.2300000	11.9318000	743.51000	3526.1800000	12.3820000	770.51000	3643.1100000	12.8320000
717.00000	3396.4900000	11.9402000	744.01000	3528.1400000	12.3903000	771.00000	3644.9200000	12.8401000
717.50000	3399.2900000	11.9485000	744.50000	3530.6200000	12.3985000	771.50000	3646.3800000	12.8485000
718.00000	3401.0800000	11.9568000	745.00000	3532.9400000	12.4068000	772.00000	3648.7300000	12.8568000
718.51000	3403.6100000	11.9653000	745.50000	3535.8800000	12.4151000	772.50000	3651.5000000	12.8652000
719.01000	3406.5200000	11.9737000	746.00000	3537.8600000	12.4235000	773.01000	3653.6200000	12.8737000
719.51000	3408.6300000	11.9820000	746.51000	3540.2900000	12.4320000	773.51000	3655.9300000	12.8820000
720.01000	3410.8900000	11.9903000	747.01000	3542.5300000	12.4403000	774.01000	3658.0500000	12.8903000
720.50000	3413.0100000	11.9985000	747.51000	3544.6600000	12.4487000	774.51000	3660.3800000	12.8987000
721.00000	3415.7000000	12.0068000	748.01000	3546.8900000	12.4570000	775.00000	3662.8900000	12.9068000
721.50000	3418.4400000	12.0152000	748.50000	3548.6300000	12.4652000	775.50000	3664.4000000	12.9151000
722.00000	3420.3800000	12.0235000	749.00000	3551.1100000	12.4735000	776.00000	3664.0700000	12.9235000
722.51000	3422.9100000	12.0320000	749.50000	3553.8000000	12.4818000	776.50000	3664.9500000	12.9318000
723.01000	3424.9200000	12.0403000	750.00000	3553.9600000	12.4901000	777.01000	3665.0500000	12.9403000
723.51000	3427.4900000	12.0487000	750.51000	3555.9400000	12.4987000	777.51000	3665.4700000	12.9487000
724.01000	3430.1200000	12.0570000	751.00000	3556.9800000	12.5068000	778.01000	3666.1900000	12.9570000
724.50000	3431.9400000	12.0651000	751.50000	3559.2900000	12.5152000	778.51000	3667.7900000	12.9653000
725.00000	3434.8400000	12.0735000	752.00000	3561.6100000	12.5235000	779.00000	3669.1800000	12.9735000
725.50000	3437.3100000	12.0818000	752.51000	3563.9300000	12.5320000	779.50000	3671.9400000	12.9818000
726.00000	3439.7300000	12.0902000	753.01000	3566.5000000	12.5403000	780.00000	3673.5600000	12.9902000
726.51000	3442.4000000	12.0987000	753.51000	3568.1600000	12.5487000	780.50000	3674.9100000	12.9985000
727.01000	3444.6600000	12.1070000	754.01000	3570.8300000	12.5570000	781.03000	3677.0900000	13.0073000
727.51000	3447.6400000	12.1153000	754.50000	3572.9600000	12.5652000	781.51000	3678.8500000	13.0153000
728.01000	3449.4700000	12.1237000	755.00000	3575.4200000	12.5735000	782.01000	3681.5100000	13.0237000
728.50000	3451.9000000	12.1318000	755.50000	3577.5600000	12.5818000	782.51000	3683.5300000	13.0320000
729.00000	3454.6300000	12.1402000	756.00000	3579.8400000	12.5901000	783.00000	3685.7200000	13.0401000
729.50000	3457.2300000	12.1485000	756.50000	3582.4500000	12.5985000	783.50000	3687.8900000	13.0485000
730.00000	3459.5700000	12.1568000	757.01000	3584.7600000	12.6070000	784.00000	3689.9200000	13.0568000
730.51000	3461.8800000	12.1653000	757.51000	3586.6200000	12.6153000	784.50000	3692.6900000	13.0652000
731.01000	3464.8100000	12.1737000	758.01000	3588.3600000	12.6237000	785.01000	3694.7200000	13.0737000
731.51000	3467.1000000	12.1820000	758.51000	3590.4200000	12.6320000	785.51000	3697.2300000	13.0820000
732.01000	3469.4300000	12.1903000	759.00000	3593.6400000	12.6402000	786.01000	3699.2500000	13.0903000
732.50000	3471.6300000	12.1985000	759.50000	3595.4000000	12.6485000	786.51000	3701.6600000	13.0987000
733.00000	3473.9900000	12.2068000	760.00000	3598.0000000	12.6568000	787.00000	3703.8700000	13.1068000
733.50000	3477.0900000	12.2151000	760.50000	3599.8300000	12.6652000	787.50000	3705.8800000	13.1151000
734.00000	3479.1800000	12.2235000	761.01000	3602.1200000	12.6736000	788.00000	3708.6000000	13.1235000
734.45000	3481.7200000	12.2310000	761.51000	3604.7200000	12.6820000	788.50000	3710.8600000	13.1318000
735.01000	3484.1400000	12.2403000	762.01000	3606.7500000	12.6903000	789.01000	3713.1700000	13.1403000
735.51000	3486.7500000	12.2486000	762.51000	3609.0800000	12.6986000	789.51000	3715.4700000	13.1487000
736.01000	3489.0900000	12.2570000	763.00000	3611.5400000	12.7068000	790.01000	3717.2700000	13.1570000
736.50000	3491.0100000	12.2652000	763.50000	3614.1200000	12.7152000	790.51000	3718.2300000	13.1653000
737.00000	3493.9700000	12.2735000	764.00000	3616.4500000	12.7235000	791.00000	3719.9700000	13.1735000
737.50000	3496.4900000	12.2818000	764.50000	3618.5600000	12.7318000	791.50000	3722.2000000	13.1818000

Timp de incercare *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*	**Timp de incercare** *s*	**Forta standard** *N*	**Deplsarea** *mm*
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
792.00000	3724.0400000	13.1902000	795.00000	3736.6100000	13.2402000	798.01000	3750.8700000	13.2903000
792.50000	3726.1500000	13.1985000	795.50000	3739.3600000	13.2485000	798.51000	3752.6900000	13.2986000
793.01000	3728.2900000	13.2070000	796.00000	3741.2800000	13.2568000	799.00000	3755.4800000	13.3068000
793.51000	3730.3000000	13.2153000	796.50000	3744.0000000	13.2652000	799.50000	3757.3900000	13.3152000
794.01000	3732.8200000	13.2237000	797.01000	3746.0700000	13.2737000	800.00000	3760.2100000	13.3235000
794.51000	3734.6800000	13.2320000	797.51000	3748.5400000	13.2820000			

ANEXA 4

Rezultate obținute la încerc area de încovoiere în 4 puncte pentru epruveta D1 de la sistemul de achiziție SPIDER8

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
0	0	-0.66359	0.91866	0	0
0.5	0	-0.66359	0.91866	0	0
1	0	-0.66359	0.91866	0	0
1.5	0	-0.4424	0.91866	0.45933	0
2	0	-0.4424	0.91866	0.45933	0
2.5	0	-0.4424	0.91866	0.45933	0
3	0	-0.4424	0.91866	0.45933	0
3.5	0	-0.4424	1.37799	0.45933	0
4	0	-0.4424	1.37799	0.45933	0
4.5	0	-0.4424	1.37799	0.45933	0
5	0	-0.4424	1.37799	0.45933	0
5.5	0	-0.4424	1.37799	0.45933	0
6	0	-0.4424	1.37799	0.45933	0
6.5	0	-0.4424	1.37799	0.91866	0
7	0	-0.4424	1.37799	0.91866	0
7.5	0	-0.4424	1.37799	0.91866	0
8	0	-0.2212	1.37799	0.91866	0
8.5	-0.66359	0.2212	0.91866	1.83732	0
9	-1.54839	1.10599	-0.45933	2.75598	0
9.5	-2.65438	2.21198	-1.83732	4.13397	0.002
10	-3.98157	3.53917	-3.67464	5.51196	0.002
10.5	-5.52995	4.86636	-5.51196	7.34928	0.002
11	-6.85714	6.19355	-7.34928	8.72727	0.002
11.5	-8.18433	7.29954	-9.1866	10.10526	0.002
12	-9.06912	8.40553	-10.56459	11.48325	0.004
12.5	-9.95392	9.29032	-11.94258	12.40191	0.004
13	-10.61751	9.95392	-12.86124	12.86124	0.004
13.5	-11.05991	10.39631	-13.32057	13.7799	0.004
14	-11.7235	11.05991	-14.23924	14.23924	0.004
14.5	-12.1659	11.5023	-15.1579	14.69857	0.004
15	-12.60829	11.9447	-15.61723	15.1579	0.004
15.5	-13.05069	12.3871	-16.07656	15.61723	0.004
16	-13.49309	12.82949	-16.99522	16.07656	0.004
16.5	-13.93548	13.05069	-17.45455	16.53589	0.004
17	-14.37788	13.49309	-17.91388	16.99522	0.006
17.5	-14.82028	13.71429	-18.37321	17.45455	0.006
18	-15.04147	14.15668	-18.83254	17.91388	0.006
18.5	-15.48387	14.59908	-19.7512	17.91388	0.006
19	-15.92627	14.82028	-20.21053	18.37321	0.006
19.5	-16.36866	15.26267	-20.66986	18.83254	0.006
20	-16.81106	15.70507	-21.58852	19.29187	0.006
20.5	-17.25346	16.14746	-22.04785	20.21053	0.006
21	-17.91705	16.58986	-22.96651	20.66986	0.006
21.5	-18.35945	17.25346	-23.42584	21.12919	0.006
22	-19.02304	17.91705	-24.3445	22.04785	0.006
22.5	-19.68664	18.35945	-25.26316	22.50718	0.006
23	-20.57143	19.02304	-26.64115	23.42584	0.006
23.5	-21.23502	19.90783	-27.55981	24.3445	0.006

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
24	-22.11981	20.57143	-28.9378	25.26316	0.006
24.5	-23.00461	21.45622	-29.85646	26.18182	0.006
25	-24.1106	22.34101	-31.23445	27.55981	0.008
25.5	-24.99539	23.447	-32.61244	28.47847	0.008
26	-26.10138	24.3318	-33.99043	29.85646	0.008
26.5	-27.20737	25.43779	-35.36842	31.23445	0.008
27	-28.09216	26.32258	-36.74641	32.15311	0.008
27.5	-29.19816	27.42857	-37.66507	33.5311	0.008
28	-30.08295	28.31336	-39.04306	34.90909	0.008
28.5	-30.96774	29.19816	-39.96172	35.82775	0.01
29	-31.85253	29.86175	-41.33971	36.74641	0.01
29.5	-32.51613	30.52534	-42.25837	37.66507	0.01
30	-33.17972	31.18894	-43.17704	38.58373	0.01
30.5	-33.84332	31.85253	-44.0957	39.04306	0.01
31	-34.50691	32.29493	-44.55503	39.50239	0.01
31.5	-34.94931	32.95852	-45.47369	40.42105	0.01
32	-35.6129	33.40092	-46.39235	40.88038	0.01
32.5	-36.71889	34.50691	-47.77034	42.25837	0.01
33	-38.26728	36.0553	-49.60766	44.0957	0.012
33.5	-40.47926	38.04608	-52.82297	46.85168	0.012
34	-43.13364	40.47926	-55.57895	50.06699	0.012
34.5	-45.56682	42.69124	-58.79426	52.82297	0.014
35	-47.5576	44.90322	-61.55024	55.57895	0.014
35.5	-49.54839	46.67281	-64.30622	57.8756	0.014
36	-51.53917	48.44239	-66.60287	60.17225	0.016
36.5	-53.75115	50.65438	-69.35885	62.92823	0.016
37	-56.62673	53.30875	-73.0335	66.60287	0.016
37.5	-60.1659	56.62673	-77.16747	71.19618	0.018
38	-64.14746	60.60829	-82.2201	76.24881	0.018
38.5	-68.57143	64.81106	-87.73206	82.2201	0.02
39	-73.43779	69.23502	-93.70335	88.19139	0.022
39.5	-78.30414	74.10138	-99.67465	94.62201	0.022
40	-83.1705	78.52534	-105.18661	100.59331	0.024
40.5	-87.37327	82.50691	-110.23924	106.10527	0.026
41	-91.35484	86.26728	-115.29187	111.1579	0.026
41.5	-95.3364	90.02765	-119.88517	116.66986	0.028
42	-99.53917	94.00921	-124.9378	122.18182	0.03
42.5	-103.96313	98.43318	-130.44977	127.69379	0.03
43	-108.82949	103.07834	-136.42106	134.12441	0.032
43.5	-113.91705	107.7235	-142.85168	140.55503	0.034
44	-119.0046	112.81106	-149.2823	146.98565	0.036
44.5	-124.53456	117.89861	-155.71293	153.8756	0.036
45	-130.06451	123.20737	-162.60288	161.22489	0.038
45.5	-135.59447	128.51612	-169.49283	168.11484	0.04
46	-141.34562	134.04608	-176.38278	175.46412	0.042
46.5	-147.31797	139.57603	-183.73206	183.27273	0.044
47	-153.29032	145.32718	-191.08135	190.62202	0.046
47.5	-159.26267	151.07834	-198.43063	198.43063	0.048
48	-165.45622	156.82949	-205.77991	206.23924	0.048
48.5	-171.64976	162.80184	-213.58853	214.04786	0.05
49	-177.84331	168.77419	-220.93781	221.85647	0.052
49.5	-184.03686	174.52534	-228.74642	230.12441	0.054
50	-190.23041	180.71889	-236.55503	237.93302	0.056

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
50.5	-196.64515	186.69124	-243.90432	246.20097	0.058
51	-203.0599	192.66359	-251.71293	254.46891	0.06
51.5	-209.47465	198.85714	-259.52154	262.73685	0.062
52	-215.88939	205.05068	-267.78948	271.0048	0.064
52.5	-222.52534	211.24423	-275.5981	279.73207	0.066
53	-228.94008	217.43778	-283.40671	288.00001	0.068
53.5	-235.57603	223.85253	-291.67465	296.72728	0.07
54	-242.21197	230.04607	-299.48327	304.99523	0.072
54.5	-248.84792	236.46082	-307.75121	313.7225	0.074
55	-255.48386	242.87557	-316.01915	322.44977	0.076
55.5	-262.341	249.06912	-323.82776	331.17705	0.078
56	-268.97695	255.48386	-332.09571	339.44499	0.08
56.5	-275.83409	261.89861	-340.36365	348.17226	0.082
57	-282.69123	268.53455	-348.63159	356.89954	0.084
57.5	-289.54838	274.9493	-356.89954	366.08614	0.086
58	-296.40552	281.36405	-365.62681	374.81341	0.088
58.5	-303.04146	287.77879	-373.89475	383.54069	0.09
59	-310.1198	294.41474	-382.1627	392.26796	0.092
59.5	-316.97695	300.82948	-390.43064	400.99523	0.094
60	-323.83409	307.46543	-399.15791	409.7225	0.096
60.5	-330.69123	314.10137	-407.42585	418.44978	0.098
61	-337.54838	320.51612	-415.6938	427.63638	0.1
61.5	-344.62672	327.15206	-424.42107	436.36365	0.102
62	-351.48386	333.78801	-432.68901	445.55026	0.104
62.5	-358.5622	340.42395	-441.41629	454.27753	0.106
63	-365.64054	347.28109	-450.14356	463.46413	0.108
63.5	-372.49768	353.91704	-458.4115	472.65074	0.112
64	-379.57602	360.55298	-467.13878	481.83734	0.114
64.5	-386.65436	367.41013	-475.40672	490.56461	0.116
65	-393.73271	374.04607	-484.13399	499.75122	0.118
65.5	-400.81105	380.90321	-492.86126	508.93782	0.12
66	-407.88939	387.53916	-501.58854	518.12442	0.122
66.5	-414.96773	394.3963	-509.85648	527.31103	0.124
67	-422.04607	401.03224	-518.58375	536.49763	0.126
67.5	-429.12441	407.88939	-527.31103	545.68423	0.128
68	-436.42395	414.52533	-536.0383	554.87084	0.13
68.5	-443.50229	421.38247	-544.30624	564.05744	0.132
69	-450.58063	428.23962	-553.03352	573.24404	0.134
69.5	-457.88017	434.87556	-561.76079	582.43065	0.136
70	-464.95851	441.7327	-570.48806	591.61725	0.14
70.5	-472.03685	448.58985	-579.21533	600.80385	0.142
71	-479.33639	455.44699	-587.94261	609.99046	0.144
71.5	-486.41473	462.30413	-596.66988	619.63639	0.146
72	-493.71427	468.94008	-605.39715	628.82299	0.148
72.5	-500.79261	475.79722	-614.12443	638.0096	0.15
73	-508.09215	482.65436	-622.8517	647.1962	0.152
73.5	-515.39169	489.5115	-631.57897	656.84213	0.154
74	-522.47003	496.36865	-640.30625	666.02874	0.156
74.5	-529.76957	503.22579	-649.03352	675.21534	0.158
75	-537.06911	510.08293	-658.22012	684.40194	0.16
75.5	-544.14745	516.94007	-666.9474	694.04788	0.164
76	-551.44699	523.79722	-675.67467	703.23448	0.166
76.5	-558.74652	530.65436	-684.40194	712.88041	0.168
77	-566.04606	537.5115	-693.12922	722.06702	0.17
77.5	-573.3456	544.58984	-701.85649	731.71295	0.172

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
78	-580.64514	551.44699	-711.04309	740.89955	0.174
78.5	-587.94468	558.30413	-719.77036	750.54549	0.176
79	-595.24422	565.16127	-728.49764	759.73209	0.178
79.5	-602.54376	572.01841	-737.22491	769.37802	0.18
80	-609.8433	578.87556	-745.95218	778.56463	0.182
80.5	-617.14284	585.9539	-755.13879	788.21056	0.186
81	-624.44237	592.81104	-763.86606	797.39716	0.188
81.5	-631.74191	599.66818	-772.59333	807.0431	0.19
82	-639.26265	606.74652	-781.77994	816.2297	0.192
82.5	-646.56219	613.60367	-790.50721	825.87563	0.194
83	-653.86173	620.46081	-799.23448	835.06224	0.196
83.5	-661.16127	627.53915	-807.96176	844.70817	0.198
84	-668.46081	634.39629	-817.14836	853.89477	0.2
84.5	-675.76034	641.25343	-825.87563	863.54071	0.202
85	-683.05988	648.33177	-834.60291	873.18664	0.206
85.5	-690.58062	655.18892	-843.78951	882.37324	0.208
86	-697.88016	662.26726	-852.51678	892.01918	0.21
86.5	-705.1797	669.1244	-861.24405	901.20578	0.212
87	-712.47924	675.98154	-870.43066	910.85171	0.214
87.5	-719.99997	683.05988	-879.15793	920.49765	0.216
88	-727.29951	689.91703	-887.8852	929.68425	0.218
88.5	-734.59905	696.99537	-897.07181	939.33018	0.22
89	-741.89859	703.85251	-905.79908	948.97612	0.222
89.5	-749.41933	710.93085	-914.98568	958.16272	0.226
90	-756.71887	717.78799	-923.71296	967.80865	0.228
90.5	-764.2396	724.86633	-932.44023	977.45459	0.23
91	-771.53914	731.72348	-941.62683	987.10052	0.232
91.5	-778.83868	738.80182	-950.35411	996.28712	0.234
92	-786.35942	745.88016	-959.08138	1005.93306	0.236
92.5	-793.65896	752.7373	-968.26798	1015.57899	0.238
93	-801.1797	759.81564	-976.99526	1025.22492	0.242
93.5	-808.47923	766.67278	-986.18186	1034.41153	0.244
94	-815.99997	773.75112	-994.90913	1044.05746	0.246
94.5	-823.52071	780.82947	-1004.09574	1053.70339	0.248
95	-830.82025	787.68661	-1012.82301	1063.34933	0.25
95.5	-838.34098	794.76495	-1022.00961	1072.99526	0.252
96	-845.64052	801.84329	-1030.73688	1082.18186	0.254
96.5	-853.16126	808.70043	-1039.92349	1091.8278	0.258
97	-860.4608	815.77877	-1048.65076	1101.47373	0.26
97.5	-867.98154	822.63592	-1057.83736	1111.11966	0.262
98	-875.50227	829.71426	-1066.56464	1120.7656	0.264
98.5	-882.80181	836.7926	-1075.75124	1130.41153	0.266
99	-890.32255	843.64974	-1084.47851	1139.59813	0.268
99.5	-897.62209	850.72808	-1093.66512	1149.24407	0.27
100	-905.14283	857.58522	-1102.39239	1158.89	0.272
100.5	-912.66356	864.66356	-1111.57899	1168.53593	0.276
101	-919.9631	871.7419	-1120.30627	1178.18187	0.278
101.5	-927.48384	878.59905	-1129.49287	1187.36847	0.28
102	-934.78338	885.67739	-1138.67947	1197.0144	0.282
102.5	-942.30411	892.53453	-1147.40675	1206.66034	0.284
103	-949.82485	899.61287	-1156.59335	1216.30627	0.286
103.5	-957.12439	906.69121	-1165.32062	1225.9522	0.288
104	-964.64513	913.54835	-1174.50723	1235.59814	0.29

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
104.5	-972.16586	920.6267	-1183.69383	1245.24407	0.294
105	-979.4654	927.48384	-1192.4211	1254.43067	0.296
105.5	-986.98614	934.56218	-1201.6077	1264.07661	0.298
106.0	-994.50688	941.64052	-1210.33498	1273.72254	0.3
106.5	-1002.02761	948.71886	-1219.52158	1283.36847	0.302
107.0	-1009.54835	955.576	-1228.70818	1293.01441	0.304
107.5	-1016.84789	962.65434	-1237.43546	1302.66034	0.306
108.0	-1024.36863	969.73268	-1246.62206	1312.30627	0.31
108.5	-1031.88936	976.81103	-1255.80866	1321.95221	0.312
109.0	-1039.4101	983.66817	-1264.53594	1331.59814	0.314
109.5	-1046.93084	990.74651	-1273.72254	1341.24407	0.316
110.0	-1054.45158	997.82485	-1282.44981	1350.89001	0.318
110.5	-1061.75111	1004.90319	-1291.63642	1360.53594	0.32
111.0	-1069.27185	1011.76033	-1300.82302	1370.18187	0.322
111.5	-1076.79259	1018.83867	-1309.55029	1379.82781	0.324
112.0	-1084.31333	1025.91701	-1318.7369	1389.47374	0.328
112.5	-1091.83406	1032.99536	-1327.9235	1399.11967	0.33
113.0	-1099.3548	1039.8525	-1336.65077	1408.76561	0.332
113.5	-1106.65434	1046.93084	-1345.83738	1418.41154	0.334
114.0	-1114.17508	1054.00918	-1354.56465	1428.05747	0.336
114.5	-1121.69581	1061.08752	-1363.75125	1437.70341	0.338
115.0	-1129.21655	1067.94466	-1372.93786	1447.34934	0.34
115.5	-1136.73729	1075.023	-1381.66513	1456.99528	0.342
116.0	-1144.25802	1082.10134	-1390.85173	1466.64121	0.346
116.5	-1151.77876	1089.17969	-1400.03834	1476.28714	0.348
117.0	-1159.2995	1096.25803	-1408.76561	1485.93308	0.35
117.5	-1166.82024	1103.11517	-1417.95221	1495.57901	0.352
118.0	-1174.11977	1110.19351	-1427.13881	1505.22494	0.354
118.5	-1181.64051	1117.27185	-1435.86609	1514.87088	0.356
119.0	-1189.16125	1124.35019	-1445.05269	1524.51681	0.358
119.5	-1196.68199	1131.20733	-1454.23929	1534.16274	0.362
120.0	-1204.20272	1138.28567	-1462.96657	1543.80868	0.364
120.5	-1211.72346	1145.36402	-1472.15317	1553.45461	0.366
121.0	-1219.2442	1152.44236	-1481.33977	1563.10054	0.368
121.5	-1226.76493	1159.5207	-1490.52638	1572.28715	0.37
122.0	-1234.28567	1166.59904	-1499.25365	1581.93308	0.372
122.5	-1241.80641	1173.45618	-1508.44025	1591.57901	0.374
123.0	-1249.32715	1180.53452	-1517.62686	1601.22495	0.378
123.5	-1256.84788	1187.61286	-1526.35413	1610.87088	0.38
124.0	-1264.36862	1194.6912	-1535.54073	1620.51681	0.382
124.5	-1271.88936	1201.76954	-1544.72734	1630.62208	0.384
125.0	-1279.41009	1208.84788	-1553.91394	1640.26801	0.386
125.5	-1286.93083	1215.92622	-1562.64121	1649.91394	0.388
126.0	-1294.45157	1222.78337	-1571.82782	1659.55988	0.39
126.5	-1301.9723	1229.86171	-1581.01442	1669.20581	0.394
127.0	-1309.49304	1236.94005	-1589.74169	1678.85174	0.396
127.5	-1317.01378	1244.01839	-1598.9283	1688.49768	0.398
128.0	-1324.53452	1251.09673	-1608.1149	1698.14361	0.4
128.5	-1332.05525	1258.17507	-1617.3015	1707.78954	0.402
129.0	-1339.57599	1265.25341	-1626.02877	1717.43548	0.404
129.5	-1347.31792	1272.11055	-1635.21538	1727.08141	0.406
130.0	-1354.83866	1279.1889	-1644.40198	1736.72734	0.41
130.5	-1362.3594	1286.26724	-1653.12925	1746.37328	0.412
131.0	-1369.88014	1293.34558	-1662.31586	1756.01921	0.414
131.5	-1377.40087	1300.42392	-1671.50246	1765.66514	0.416

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
132.0	-1384.92161	1307.50226	-1680.22973	1775.31108	0.418
132.5	-1392.44235	1314.3594	-1689.41634	1784.95701	0.42
133.0	-1399.96308	1321.43774	-1698.60294	1794.60294	0.422
133.5	-1407.48382	1328.51608	-1707.78954	1804.24888	0.426
134.0	-1415.00456	1335.59442	-1716.97615	1813.89481	0.428
134.5	-1422.5253	1342.67276	-1725.70342	1823.54074	0.43
135.0	-1430.04603	1349.7511	-1734.89002	1833.18668	0.432
135.5	-1437.78797	1356.82945	-1744.07663	1842.83261	0.434
136.0	-1445.3087	1363.68659	-1753.26323	1852.47854	0.436
136.5	-1452.82944	1370.76493	-1762.44983	1862.12448	0.438
137.0	-1460.35018	1377.84327	-1771.17711	1871.77041	0.44
137.5	-1467.87092	1384.92161	-1780.36371	1881.41635	0.444
138.0	-1475.61285	1391.99995	-1789.55031	1891.06228	0.446
138.5	-1483.13359	1399.07829	-1798.73692	1900.70821	0.448
139.0	-1490.65433	1406.15663	-1807.92352	1910.35415	0.45
139.5	-1498.17506	1413.23497	-1817.11012	1920.00008	0.452
140.0	-1505.6958	1420.31331	-1825.8374	1929.64601	0.454
140.5	-1513.43773	1427.39165	-1835.024	1939.75128	0.456
141.0	-1520.95847	1434.47	-1844.2106	1949.39721	0.46
141.5	-1528.47921	1441.54834	-1853.39721	1959.04314	0.462
142.0	-1535.99995	1448.62668	-1862.58381	1968.68908	0.464
142.5	-1543.52068	1455.70502	-1871.31108	1978.33501	0.466
143.0	-1551.04142	1462.78336	-1880.49768	1987.98094	0.468
143.5	-1558.56216	1469.8617	-1889.68429	1997.62688	0.47
144.0	-1566.30409	1476.71884	-1898.87089	2007.27281	0.474
144.5	-1573.82483	1483.79718	-1908.05749	2016.91874	0.476
145.0	-1581.34557	1490.87552	-1916.78477	2026.56468	0.478
145.5	-1588.8663	1497.95386	-1925.97137	2036.21061	0.48
146.0	-1596.38704	1505.03221	-1935.15797	2045.85654	0.482
146.5	-1603.90778	1512.11055	-1944.34458	2055.50248	0.484
147.0	-1611.42851	1519.18889	-1953.53118	2065.14841	0.486
147.5	-1619.17045	1526.26723	-1962.25845	2074.79434	0.49
148.0	-1626.69119	1533.34557	-1971.44506	2084.44028	0.492
148.5	-1634.21192	1540.42391	-1980.63166	2094.08621	0.494
149.0	-1641.73266	1547.28105	-1989.81826	2103.73214	0.496
149.5	-1649.2534	1554.35939	-1998.54554	2113.37808	0.498
150.0	-1656.99533	1561.43773	-2007.73214	2123.02401	0.5
150.5	-1664.51607	1568.51607	-2016.91874	2132.66994	0.502
151.0	-1672.03681	1575.59441	-2026.10535	2142.31588	0.506
151.5	-1679.55754	1582.67276	-2035.29195	2151.96181	0.508
152.0	-1687.29948	1589.7511	-2044.47855	2161.60774	0.51
152.5	-1694.82022	1596.82944	-2053.20583	2171.25368	0.512
153.0	-1702.34095	1603.90778	-2062.39243	2180.89961	0.514
153.5	-1709.86169	1610.98612	-2071.57903	2190.54554	0.516
154.0	-1717.38243	1618.06446	-2080.76564	2200.19148	0.518
154.5	-1725.12436	1625.1428	-2089.95224	2210.29674	0.522
155.0	-1732.6451	1632.22114	-2099.13884	2219.94267	0.524
155.5	-1740.16584	1639.07828	-2108.32545	2229.58861	0.526
156.0	-1747.68657	1646.15662	-2117.05272	2239.23454	0.528
156.5	-1755.20731	1653.23496	-2126.23932	2248.88048	0.53
157.0	-1762.94925	1660.31331	-2135.42593	2258.06708	0.532
157.5	-1770.46998	1667.17045	-2144.61253	2267.71301	0.534
158.0	-1777.99072	1674.24879	-2153.79913	2277.35895	0.536

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
158.5	-1785.51146	1681.32713	-2162.5264	2287.00488	0.54
159.0	-1793.0322	1688.40547	-2171.71301	2296.65081	0.542
159.5	-1800.55293	1695.26261	-2180.89961	2306.29675	0.544
160.0	-1808.07367	1702.34095	-2190.08621	2315.94268	0.546
160.5	-1815.59441	1709.41929	-2199.27282	2325.58861	0.548
161.0	-1823.11514	1716.49764	-2208.45942	2335.23455	0.55
161.5	-1830.63588	1723.35478	-2217.18669	2344.88048	0.552
162.0	-1838.15662	1730.43312	-2226.3733	2354.52641	0.556
162.5	-1845.67735	1737.51146	-2235.5599	2364.17235	0.558
163.0	-1853.19809	1744.3686	-2244.7465	2373.35895	0.56
163.5	-1860.94003	1751.44694	-2253.47378	2383.00488	0.562
164.0	-1868.46076	1758.52528	-2262.66038	2392.65082	0.564
164.5	-1875.9815	1765.60362	-2271.84698	2402.29675	0.566
165.0	-1883.50224	1772.46077	-2281.03359	2411.94268	0.568
165.5	-1891.02297	1779.53911	-2290.22019	2421.12929	0.572
166.0	-1898.54371	1786.39625	-2298.94746	2430.77522	0.574
166.5	-1905.84325	1793.47459	-2308.13407	2440.42115	0.576
167.0	-1913.36399	1800.33173	-2317.32067	2450.06709	0.578
167.5	-1920.88473	1807.41007	-2326.50727	2459.25369	0.58
168.0	-1928.40546	1814.26722	-2335.23455	2468.89962	0.582
168.5	-1935.9262	1821.34556	-2344.42115	2478.54556	0.584
169.0	-1943.44694	1828.2027	-2353.60775	2487.73216	0.586
169.5	-1950.96767	1835.28104	-2362.79436	2497.37809	0.59
170.0	-1958.48841	1842.13818	-2371.98096	2507.02403	0.592
170.5	-1966.00915	1849.21652	-2380.70823	2516.21063	0.594
171.0	-1973.52988	1856.07367	-2389.89483	2525.85656	0.596
171.5	-1981.05062	1862.93081	-2399.08144	2535.5025	0.598
172.0	-1988.57136	1870.00915	-2408.26804	2544.6891	0.6
172.5	-1996.0921	1876.86629	-2417.45464	2554.33503	0.602
173.0	-2003.61283	1883.72344	-2426.18192	2563.52164	0.604
173.5	-2010.91237	1890.58058	-2435.36852	2573.16757	0.608
174.0	-2018.43311	1897.65892	-2444.55512	2582.35417	0.61
174.5	-2025.95385	1904.51606	-2453.2824	2592.00011	0.612
175.0	-2033.47458	1911.3732	-2462.469	2601.18671	0.614
175.5	-2040.99532	1918.45155	-2471.6556	2610.83264	0.616
176.0	-2048.51606	1925.30869	-2480.38288	2620.47858	0.618
176.5	-2056.03679	1932.16583	-2489.56948	2629.66518	0.62
177.0	-2063.33633	1939.24417	-2498.75608	2639.31111	0.622
177.5	-2070.85707	1946.10131	-2507.94269	2648.49772	0.626
178.0	-2078.37781	1952.95846	-2516.66996	2658.14365	0.628
178.5	-2085.89854	1960.0368	-2525.85656	2667.33025	0.63
179.0	-2093.41928	1966.89394	-2535.04317	2676.97619	0.632
179.5	-2100.94002	1973.75108	-2544.22977	2686.62212	0.634
180.0	-2108.46076	1980.82942	-2552.95704	2695.80872	0.636
180.5	-2115.98149	1987.68657	-2562.14365	2705.45466	0.638
181.0	-2123.50223	1994.76491	-2571.33025	2714.64126	0.64
181.5	-2130.80177	2001.62205	-2580.51685	2724.28719	0.644
182.0	-2138.32251	2008.47919	-2589.24413	2733.4738	0.646
182.5	-2145.84324	2015.55753	-2598.43073	2743.11973	0.648
183.0	-2153.36398	2022.41468	-2607.61733	2752.30633	0.65
183.5	-2160.88472	2029.27182	-2616.80394	2761.95227	0.652
184.0	-2168.40545	2036.35016	-2625.99054	2771.13887	0.654
184.5	-2175.92619	2043.2073	-2634.71781	2780.7848	0.656
185.0	-2183.44693	2050.06444	-2643.90441	2789.97141	0.658
185.5	-2190.74647	2057.14278	-2653.09102	2799.61734	0.662

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	**Senzor *B*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*	
186.0	-2198.2672	2063.99993	-2662.27762	2808.80394	0.664
186.5	-2205.78794	2070.85707	-2671.46422	2818.44988	0.666
187.0	-2213.30868	2077.93541	-2680.65083	2827.63648	0.668
187.5	-2220.82942	2084.79255	-2689.83743	2837.28241	0.67
188.0	-2228.35015	2091.87089	-2699.02403	2846.46902	0.672
188.5	-2236.09209	2098.94923	-2708.21064	2856.11495	0.674
189.0	-2243.61282	2106.02758	-2717.39724	2865.76088	0.676
189.5	-2251.35476	2113.10592	-2727.04317	2874.94749	0.68
190.0	-2259.09669	2120.18426	-2736.22978	2884.59342	0.682
190.5	-2266.83863	2127.4838	-2745.87571	2894.23935	0.684
191.0	-2274.80176	2134.78334	-2755.52164	2903.88529	0.686
191.5	-2282.5437	2142.08287	-2765.16758	2913.99055	0.688
192.0	-2290.50683	2149.38241	-2774.81351	2923.63648	0.69
192.5	-2298.46997	2156.68195	-2784.91877	2933.74175	0.694
193.0	-2306.4331	2164.20269	-2794.56471	2943.38768	0.696
193.5	-2314.61743	2171.72343	-2804.66997	2953.49294	0.698
194.0	-2322.58056	2179.24416	-2814.31591	2963.59821	0.7
194.5	-2330.7649	2186.7649	-2824.42117	2973.70347	0.702
195.0	-2338.72803	2194.28564	-2834.0671	2983.3494	0.706
195.5	-2346.91236	2201.80637	-2844.17237	2993.45467	0.708
196.0	-2354.87549	2209.32711	-2854.27763	3003.55993	0.71
196.5	-2363.05982	2216.84785	-2864.38289	3013.6652	0.712
197.0	-2371.24416	2224.36859	-2874.02883	3023.77046	0.716
197.5	-2379.42849	2231.88932	-2884.13409	3033.87572	0.718
198.0	-2387.61282	2239.63126	-2894.23935	3043.98099	0.72
198.5	-2395.79715	2247.15199	-2904.34462	3054.08625	0.722
199.0	-2403.76028	2254.67273	-2914.44988	3064.19151	0.724
199.5	-2411.94462	2262.19347	-2924.55514	3074.29678	0.728
200.0	-2420.12895	2269.9354	-2934.66041	3084.40204	0.73
200.5	-2428.31328	2277.45614	-2944.30634	3094.5073	0.732
201.0	-2436.49761	2285.19808	-2954.4116	3104.61257	0.734
201.5	-2444.68194	2292.71881	-2964.51687	3114.71783	0.738
202.0	-2452.86627	2300.23955	-2974.62213	3124.82309	0.74
202.5	-2461.0506	2307.98149	-2984.7274	3134.92836	0.742
203.0	-2469.23494	2315.50222	-2994.83266	3145.03362	0.744
203.5	-2477.41927	2323.24416	-3004.93792	3155.13889	0.748
204.0	-2485.6036	2330.7649	-3015.04319	3165.24415	0.75
204.5	-2493.78793	2338.50683	-3025.14845	3175.34941	0.752
205.0	-2501.97226	2346.02757	-3035.25371	3185.45468	0.754
205.5	-2510.15659	2353.7695	-3045.35898	3195.55994	0.756
206.0	-2518.34093	2361.29024	-3055.46424	3205.6652	0.76
206.5	-2526.52526	2369.03217	-3065.5695	3215.77047	0.762
207.0	-2534.70959	2376.55291	-3075.67477	3225.87573	0.764
207.5	-2542.89392	2384.29485	-3085.78003	3235.98099	0.766
208.0	-2551.29945	2392.03678	-3095.88529	3246.08626	0.77
208.5	-2559.48378	2399.55752	-3105.99056	3256.65085	0.772
209.0	-2567.66811	2407.29945	-3116.09582	3266.75612	0.774
209.5	-2575.85244	2414.82019	-3126.20109	3276.86138	0.776
210.0	-2584.03678	2422.56213	-3136.76568	3286.96664	0.78
210.5	-2592.22111	2430.30406	-3146.87094	3297.07191	0.782
211.0	-2600.62664	2437.8248	-3156.97621	3307.17717	0.784
211.5	-2608.81097	2445.56673	-3167.08147	3317.28243	0.786
212.0	-2616.9953	2453.08747	-3177.18673	3327.3877	0.79

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
212.5	-2625.17963	2460.82941	-3187.292	3337.49296	0.792
213.0	-2633.36396	2468.57134	-3197.39726	3347.59822	0.794
213.5	-2641.54829	2476.09208	-3207.96185	3358.16282	0.796
214.0	-2649.95382	2483.83401	-3218.06712	3368.26808	0.798
214.5	-2658.13816	2491.35475	-3228.17238	3378.37334	0.802
215.0	-2666.32249	2499.09669	-3238.27764	3388.47861	0.804
215.5	-2674.50682	2506.83862	-3248.38291	3398.58387	0.806
216.0	-2682.69115	2514.35936	-3258.48817	3408.68914	0.808
216.5	-2691.09668	2522.10129	-3269.05277	3418.7944	0.812
217.0	-2699.28101	2529.84323	-3279.15803	3428.89966	0.814
217.5	-2707.46534	2537.36397	-3289.26329	3439.00493	0.816
218.0	-2715.64967	2545.1059	-3299.36856	3449.11019	0.818
218.5	-2723.83401	2552.62664	-3309.47382	3459.67478	0.822
219.0	-2732.01834	2560.36857	-3320.03841	3469.78005	0.824
219.5	-2740.42387	2568.11051	-3330.14368	3479.88531	0.826
220.0	-2748.6082	2575.63125	-3340.24894	3489.99057	0.828
220.5	-2756.79253	2583.37318	-3350.3542	3500.09584	0.832
221.0	-2764.97686	2591.11512	-3360.9188	3510.2011	0.834
221.5	-2773.38239	2598.63585	-3371.02406	3520.30636	0.836
222.0	-2781.56672	2606.37779	-3381.12933	3530.87096	0.838
222.5	-2789.75105	2614.11972	-3391.23459	3540.97622	0.842
223.0	-2797.93539	2621.64046	-3401.79918	3551.08149	0.844
223.5	-2806.34092	2629.3824	-3411.90445	3561.18675	0.846
224.0	-2814.52525	2637.12433	-3422.00971	3571.29201	0.848
224.5	-2822.70958	2644.64507	-3432.11497	3581.39728	0.852
225.0	-2830.89391	2652.387	-3442.67957	3591.96187	0.854
225.5	-2839.29944	2660.12894	-3452.78483	3602.06713	0.856
226.0	-2847.48377	2667.87087	-3462.89009	3612.1724	0.858
226.5	-2855.6681	2675.39161	-3473.45469	3622.27766	0.862
227.0	-2863.85243	2683.13355	-3483.55995	3632.38292	0.864
227.5	-2872.25796	2690.87548	-3493.66522	3642.48819	0.866
228.0	-2880.4423	2698.39622	-3503.77048	3653.05278	0.868
228.5	-2888.62663	2706.13815	-3514.33507	3663.15805	0.872
229.0	-2896.81096	2713.88009	-3524.44034	3673.26331	0.874
229.5	-2904.99529	2721.40083	-3534.5456	3683.36857	0.876
230.0	-2913.17962	2729.14276	-3545.11019	3693.47384	0.878
230.5	-2921.36395	2736.6635	-3555.21546	3703.5791	0.882
231.0	-2929.54828	2744.40543	-3565.32072	3713.68436	0.884
231.5	-2937.95381	2751.92617	-3575.42598	3723.78963	0.886
232.0	-2946.13815	2759.66811	-3585.99058	3733.89489	0.888
232.5	-2954.32248	2767.41004	-3596.09584	3744.00015	0.892
233.0	-2962.50681	2774.93078	-3606.66044	3754.10542	0.894
233.5	-2970.69114	2782.67271	-3616.7657	3764.67001	0.896
234.0	-2979.09667	2790.41465	-3626.87096	3774.77527	0.898
234.5	-2987.281	2797.93539	-3637.43556	3784.88054	0.902
235.0	-2995.46533	2805.67732	-3647.54082	3794.9858	0.904
235.5	-3003.64966	2813.41926	-3657.64608	3805.09107	0.906
236.0	-3012.05519	2821.16119	-3668.21068	3815.19633	0.908
236.5	-3020.23953	2828.68193	-3678.31594	3825.30159	0.912
237.0	-3028.42386	2836.42386	-3688.88053	3835.86619	0.914
237.5	-3036.60819	2844.1658	-3698.9858	3845.97145	0.916
238.0	-3045.01372	2851.68654	-3709.09106	3856.07671	0.918
238.5	-3053.19805	2859.42847	-3719.65566	3866.18198	0.922
239.0	-3061.38238	2867.17041	-3729.76092	3876.28724	0.924
239.5	-3069.78791	2874.69114	-3739.86618	3886.85183	0.926

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
240.0	-3077.97224	2882.43308	-3750.43078	3896.9571	0.928
240.5	-3086.15657	2890.17501	-3760.53604	3907.06236	0.93
241.0	-3094.5621	2897.91695	-3771.10063	3917.16762	0.934
241.5	-3102.74643	2905.43769	-3781.2059	3927.27289	0.936
242.0	-3110.93077	2913.17962	-3791.31116	3937.83748	0.938
242.5	-3119.1151	2920.92156	-3801.87575	3947.94275	0.942
243.0	-3127.52063	2928.44229	-3811.98102	3958.04801	0.944
243.5	-3135.70496	2936.18423	-3822.08628	3968.15327	0.946
244.0	-3143.88929	2943.92616	-3832.65088	3978.25854	0.948
244.5	-3152.07362	2951.4469	-3842.75614	3988.3638	0.95
245.0	-3160.25795	2959.18884	-3852.8614	3998.46906	0.954
245.5	-3168.66348	2966.93077	-3863.426	4008.57433	0.956
246.0	-3176.84781	2974.45151	-3873.53126	4018.67959	0.958
246.5	-3185.03215	2982.19344	-3883.63652	4029.24418	0.96
247.0	-3193.21648	2989.93538	-3894.20112	4039.34945	0.964
247.5	-3201.40081	2997.45612	-3904.30638	4049.45471	0.966
248.0	-3209.58514	3005.19805	-3914.87097	4059.55998	0.968
248.5	-3217.99067	3012.93999	-3924.97624	4069.66524	0.97
249.0	-3226.175	3020.46072	-3935.0815	4079.7705	0.974
249.5	-3234.35933	3028.20266	-3945.6461	4089.87577	0.976
250.0	-3242.76486	3035.94459	-3955.75136	4100.44036	0.978
250.5	-3250.94919	3043.68653	-3966.31595	4110.54562	0.98
251.0	-3259.13353	3051.20727	-3976.42122	4120.65089	0.984
251.5	-3267.31786	3058.9492	-3986.98581	4130.75615	0.986
252.0	-3275.50219	3066.69114	-3997.09107	4140.86141	0.988
252.5	-3283.90772	3074.43307	-4007.65567	4151.42601	0.99
253.0	-3292.09205	3081.95381	-4017.76093	4161.53127	0.994
253.5	-3300.27638	3089.69574	-4027.86619	4171.63653	0.996
254.0	-3308.68191	3097.43768	-4038.43079	4181.7418	0.998
254.5	-3316.86624	3105.17961	-4048.99538	4192.30639	1
255.0	-3325.05057	3112.92155	-4059.10065	4202.41166	1.004
255.5	-3333.4561	3120.44229	-4069.66524	4212.51692	1.006
256.0	-3341.64044	3128.18422	-4079.7705	4222.62218	1.008
256.5	-3349.82477	3135.92616	-4090.3351	4232.72745	1.01
257.0	-3358.0091	3143.66809	-4100.44036	4243.29204	1.014
257.5	-3366.19343	3151.18883	-4111.00495	4253.3973	1.016
258.0	-3374.59896	3158.93076	-4121.11022	4263.50257	1.018
258.5	-3382.78329	3166.4515	-4131.21548	4273.60783	1.02
259.0	-3390.96762	3174.19344	-4141.78007	4283.71309	1.024
259.5	-3399.15195	3181.93537	-4151.88534	4293.81836	1.026
260.0	-3407.33629	3189.45611	-4162.44993	4303.92362	1.028
260.5	-3415.52062	3197.19804	-4172.5552	4314.02889	1.03
261.0	-3423.92615	3204.93998	-4183.11979	4324.59348	1.034
261.5	-3432.11048	3212.46072	-4193.22505	4334.69874	1.036
262.0	-3440.29481	3220.20265	-4203.78965	4344.80401	1.038
262.5	-3448.47914	3227.94459	-4213.89491	4354.90927	1.04
263.0	-3456.88467	3235.68652	-4224.4595	4365.01453	1.044
263.5	-3465.069	3243.20726	-4234.56477	4375.1198	1.046
264.0	-3473.25333	3250.94919	-4245.12936	4385.68439	1.048
264.5	-3481.43767	3258.69113	-4255.23462	4395.78965	1.05
265.0	-3489.622	3266.21187	-4265.79922	4405.89492	1.054
265.5	-3498.02753	3273.9538	-4275.90448	4416.00018	1.056
266.0	-3506.21186	3281.69574	-4286.46908	4426.10544	1.058

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
266.5	-3514.39619	3289.43767	-4296.57434	4436.21071	1.06
267.0	-3522.58052	3296.95841	-4307.13893	4446.7753	1.064
267.5	-3530.98605	3304.70034	-4317.2442	4456.88057	1.066
268.0	-3539.17038	3312.44228	-4327.80879	4466.98583	1.068
268.5	-3547.35471	3320.18422	-4337.91405	4477.55042	1.07
269.0	-3555.53905	3327.70495	-4348.47865	4487.65569	1.074
269.5	-3563.72338	3335.44689	-4358.58391	4497.76095	1.076
270.0	-3572.12891	3343.18882	-4369.1485	4508.32554	1.078
270.5	-3580.31324	3350.93076	-4379.25377	4518.43081	1.08
271.0	-3588.49757	3358.67269	-4389.81836	4528.53607	1.084
271.5	-3596.9031	3366.19343	-4399.92363	4539.10066	1.086
272.0	-3605.08743	3373.93537	-4410.48822	4549.20593	1.088
272.5	-3613.27176	3381.6773	-4420.59348	4559.31119	1.09
273.0	-3621.45609	3389.41924	-4431.15808	4569.41646	1.094
273.5	-3629.64043	3396.93997	-4441.26334	4579.98105	1.096
274.0	-3637.82476	3404.68191	-4451.82793	4590.08631	1.098
274.5	-3646.00909	3412.42384	-4461.9332	4600.19158	1.1
275.0	-3654.41462	3419.94458	-4472.03846	4610.29684	1.104
275.5	-3662.59895	3427.68652	-4482.60305	4620.86143	1.106
276.0	-3670.78328	3435.42845	-4492.70832	4630.9667	1.108
276.5	-3678.96761	3442.94919	-4503.27291	4641.07196	1.11
277.0	-3687.15194	3450.69112	-4513.37818	4651.17722	1.114
277.5	-3695.33628	3458.43306	-4523.94277	4661.74182	1.116
278.0	-3703.74181	3465.9538	-4534.50736	4671.84708	1.118
278.5	-3711.92614	3473.69573	-4544.61263	4681.95235	1.12
279.0	-3720.11047	3481.43767	-4555.17722	4692.05761	1.124
279.5	-3728.2948	3489.1796	-4565.28248	4702.16287	1.126
280.0	-3736.47913	3496.92154	-4575.84708	4712.72747	1.128
280.5	-3744.88466	3504.66347	-4585.95234	4722.83273	1.13
281.0	-3753.06899	3512.40541	-4596.51694	4732.93799	1.134
281.5	-3761.25332	3519.92614	-4607.08153	4743.04326	1.136
282.0	-3769.43766	3527.66808	-4617.18679	4753.14852	1.138
282.5	-3777.62199	3535.41001	-4627.75139	4763.25378	1.14
283.0	-3786.02752	3543.15195	-4637.85665	4773.81838	1.144
283.5	-3794.21185	3550.89388	-4648.42124	4783.92364	1.146
284.0	-3802.39618	3558.63582	-4658.98584	4794.02891	1.148
284.5	-3810.58051	3566.15656	-4669.55043	4804.13417	1.15
285.0	-3818.98604	3573.89849	-4679.65569	4814.69876	1.154
285.5	-3827.17037	3581.64043	-4690.22029	4824.80403	1.156
286.0	-3835.3547	3589.38236	-4700.78488	4834.90929	1.158
286.5	-3843.53904	3597.1243	-4710.89015	4845.01455	1.16
287.0	-3851.72337	3604.86623	-4721.45474	4855.11982	1.164
287.5	-3860.1289	3612.38697	-4732.01933	4865.68441	1.166
288.0	-3868.31323	3620.1289	-4742.1246	4875.78967	1.168
288.5	-3876.49756	3627.87084	-4752.68919	4885.89494	1.172
289.0	-3884.68189	3635.61278	-4763.25378	4896.0002	1.174
289.5	-3892.86622	3643.35471	-4773.35905	4906.10546	1.176
290.0	-3901.05055	3650.87545	-4783.92364	4916.67006	1.178
290.5	-3909.23489	3658.61738	-4794.48824	4926.77532	1.182
291.0	-3917.64042	3666.35932	-4804.5935	4936.88059	1.184
291.5	-3925.82475	3674.10125	-4815.15809	4946.98585	1.186
292.0	-3934.00908	3681.84319	-4825.72269	4957.09111	1.188
292.5	-3942.19341	3689.58512	-4835.82795	4967.65571	1.192
293.0	-3950.37774	3697.32706	-4846.39254	4977.76097	1.194
293.5	-3958.78327	3705.06899	-4856.95714	4987.86623	1.196

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
294.0	-3966.9676	3712.81093	-4867.0624	4997.9715	1.198
294.5	-3975.15193	3720.33167	-4877.62699	5008.53609	1.202
295.0	-3983.33627	3728.0736	-4888.19159	5018.64135	1.204
295.5	-3991.5206	3735.81554	-4898.29685	5029.20595	1.206
296.0	-3999.92613	3743.55747	-4908.86145	5039.31121	1.208
296.5	-4008.11046	3751.29941	-4918.96671	5049.41648	1.212
297.0	-4016.29479	3759.04134	-4929.5313	5059.98107	1.214
297.5	-4024.47912	3766.78328	-4940.0959	5070.08633	1.216
298.0	-4032.66345	3774.52521	-4950.20116	5080.1916	1.22
298.5	-4041.06898	3782.26715	-4960.76575	5090.75619	1.222
299.0	-4049.25331	3789.78789	-4971.33035	5100.86145	1.224
299.5	-4057.43765	3797.52982	-4981.89494	5110.96672	1.226
300.0	-4065.62198	3805.27176	-4992.00021	5121.07198	1.23
300.5	-4073.80631	3813.01369	-5002.5648	5131.17724	1.232
301.0	-4082.21184	3820.75563	-5013.12939	5141.74184	1.234
301.5	-4090.39617	3828.49756	-5023.69399	5151.8471	1.236
302.0	-4098.5805	3836.2395	-5034.25858	5161.95237	1.24
302.5	-4106.76483	3843.98143	-5044.36384	5172.05763	1.242
303.0	-4114.94916	3851.72337	-5054.92844	5182.16289	1.244
303.5	-4123.1335	3859.4653	-5065.49303	5192.72749	1.246
304.0	-4131.31783	3867.20724	-5075.59829	5202.83275	1.25
304.5	-4139.50216	3874.94917	-5086.16289	5212.93801	1.252
305.0	-4147.68649	3882.69111	-5096.72748	5223.04328	1.254
305.5	-4155.87082	3890.21184	-5107.29208	5233.60787	1.256
306.0	-4164.05515	3897.95378	-5117.39734	5243.71313	1.26
306.5	-4172.46068	3905.69572	-5127.96193	5253.8184	1.262
307.0	-4180.64501	3913.43765	-5138.52653	5263.92366	1.264
307.5	-4188.82935	3921.17959	-5149.09112	5274.02892	1.266
308.0	-4197.01368	3928.92152	-5159.19638	5284.59352	1.27
308.5	-4205.19801	3936.66346	-5169.76098	5294.69878	1.272
309.0	-4213.38234	3944.40539	-5180.32557	5304.80405	1.274
309.5	-4221.56667	3952.14733	-5190.89017	5314.90931	1.276
310.0	-4229.751	3959.88926	-5200.99543	5325.4739	1.28
310.5	-4237.93533	3967.6312	-5211.56002	5335.57917	1.282
311.0	-4246.11967	3975.37313	-5222.12462	5345.68443	1.284
311.5	-4254.304	3983.11507	-5232.22988	5355.78969	1.288
312.0	-4262.48833	3990.857	-5242.79447	5366.35429	1.29
312.5	-4270.67266	3998.59894	-5253.35907	5376.45955	1.292
313.0	-4278.85699	4006.34087	-5263.46433	5386.56481	1.294
313.5	-4287.04132	4014.08281	-5274.02892	5396.67008	1.298
314.0	-4295.22566	4021.82474	-5284.59352	5406.77534	1.3
314.5	-4303.40999	4029.56668	-5294.69878	5417.33994	1.302
315.0	-4311.59432	4037.30861	-5305.26338	5427.4452	1.304
315.5	-4319.77865	4045.05055	-5315.36864	5437.55046	1.308
316.0	-4327.96298	4052.79248	-5325.93323	5447.65573	1.31
316.5	-4336.14731	4060.53442	-5336.0385	5458.22032	1.312
317.0	-4344.33164	4068.27635	-5346.60309	5468.32558	1.314
317.5	-4352.51598	4076.01829	-5356.70835	5478.43085	1.318
318.0	-4360.47911	4083.76023	-5367.27295	5488.53611	1.32
318.5	-4368.66344	4091.50216	-5377.37821	5498.64137	1.322
319.0	-4376.84777	4099.0229	-5387.94281	5509.20597	1.324
319.5	-4385.0321	4106.76483	-5398.04807	5519.31123	1.328
320.0	-4393.21644	4114.50677	-5408.61266	5529.4165	1.33

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
320.5	-4401.17957	4122.2487	-5418.71793	5539.52176	1.332
321.0	-4409.3639	4129.99064	-5428.82319	5549.62702	1.336
321.5	-4417.54823	4137.73257	-5439.38778	5560.19162	1.338
322.0	-4425.73256	4145.47451	-5449.49305	5570.29688	1.34
322.5	-4433.91689	4153.21644	-5459.59831	5580.40214	1.342
323.0	-4442.10123	4160.95838	-5470.1629	5590.50741	1.346
323.5	-4450.28556	4168.70031	-5480.26817	5600.61267	1.348
324.0	-4458.24869	4176.66345	-5490.37343	5610.71793	1.35
324.5	-4466.43302	4184.40538	-5500.47869	5620.8232	1.352
325.0	-4474.61735	4192.14732	-5510.58396	5631.38779	1.356
325.5	-4482.80169	4199.88925	-5520.68922	5641.49305	1.358
326.0	-4490.98602	4207.63119	-5530.79449	5651.59832	1.36
326.5	-4498.94915	4215.37312	-5541.35908	5661.70358	1.362
327.0	-4507.13348	4223.11506	-5551.46434	5672.26818	1.366
327.5	-4515.31781	4231.07819	-5561.56961	5682.37344	1.368
328.0	-4523.50215	4238.82013	-5572.1342	5692.4787	1.37
328.5	-4531.46528	4246.56206	-5582.23946	5702.58397	1.374
329.0	-4539.64961	4254.304	-5592.80406	5713.14856	1.376
329.5	-4547.61274	4262.26713	-5602.90932	5723.25382	1.378
330.0	-4555.79707	4270.00907	-5613.47391	5733.35909	1.38
330.5	-4563.98141	4277.751	-5623.57918	5743.46435	1.384
331.0	-4571.94454	4285.49294	-5634.14377	5754.02894	1.386
331.5	-4580.12887	4293.23487	-5644.70837	5764.13421	1.388
332.0	-4588.092	4301.19801	-5654.81363	5774.23947	1.39
332.5	-4596.27634	4308.93994	-5665.37822	5784.80407	1.394
333.0	-4604.23947	4316.68188	-5675.94282	5794.90933	1.396
333.5	-4612.4238	4324.42381	-5686.04808	5805.01459	1.398
334.0	-4620.38693	4332.16575	-5696.61267	5815.11986	1.4
334.5	-4628.57127	4340.12888	-5707.17727	5825.22512	1.404
335.0	-4636.5344	4347.87081	-5717.28253	5835.78971	1.406
335.5	-4644.49753	4355.61275	-5727.84713	5845.89498	1.408
336.0	-4652.68186	4363.35469	-5737.95239	5856.00024	1.412
336.5	-4660.645	4371.31782	-5748.51698	5866.56483	1.414
337.0	-4668.82933	4379.05975	-5759.08158	5876.6701	1.416
337.5	-4676.79246	4386.80169	-5769.18684	5886.77536	1.418
338.0	-4684.7556	4394.76482	-5779.75143	5897.33996	1.422
338.5	-4692.93993	4402.50676	-5789.8567	5907.44522	1.424
339.0	-4700.90306	4410.24869	-5800.42129	5918.00981	1.426
339.5	-4708.86619	4418.21183	-5810.52655	5928.11508	1.43
340.0	-4717.05053	4425.95376	-5821.09115	5938.22034	1.432
340.5	-4725.01366	4433.6957	-5831.19641	5948.78493	1.434
341.0	-4732.97679	4441.65883	-5841.76101	5958.8902	1.436
341.5	-4740.93993	4449.40077	-5851.86627	5968.99546	1.44
342.0	-4749.12426	4457.1427	-5862.43086	5979.56005	1.442
342.5	-4757.08739	4464.88464	-5872.99546	5989.66532	1.444
343.0	-4765.05052	4472.84777	-5883.10072	6000.22991	1.446
343.5	-4773.01366	4480.5897	-5893.66531	6010.33518	1.45
344.0	-4780.97679	4488.33164	-5903.77058	6020.44044	1.452
344.5	-4788.93992	4496.29477	-5914.33517	6031.00503	1.454
345.0	-4796.90306	4504.03671	-5924.44043	6041.1103	1.458
345.5	-4804.86619	4511.77864	-5934.5457	6051.21556	1.46
346.0	-4812.82932	4519.74178	-5945.11029	6061.78015	1.462
346.5	-4820.79246	4527.48371	-5955.21556	6071.88542	1.464
347.0	-4828.75559	4535.22565	-5965.78015	6081.99068	1.468
347.5	-4836.71872	4542.96758	-5975.88541	6092.55527	1.47

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	**Senzor *B*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*	
348.0	-4844.68186	4550.93072	-5986.45001	6102.66054	1.472
348.5	-4852.64499	4558.67265	-5996.55527	6112.7658	1.476
349.0	-4860.82932	4566.41459	-6006.66053	6123.3304	1.478
349.5	-4868.79246	4574.37772	-6017.22513	6133.43566	1.48
350.0	-4876.75559	4582.11965	-6027.33039	6143.54092	1.484
350.5	-4884.49752	4590.08279	-6037.89498	6154.10552	1.486
351.0	-4892.46066	4597.82472	-6048.00025	6164.21078	1.488
351.5	-4900.42379	4605.56666	-6058.10551	6174.77537	1.49
352.0	-4908.38692	4613.52979	-6068.67011	6184.88064	1.494
352.5	-4916.35006	4621.27173	-6078.77537	6195.44523	1.496
353.0	-4924.31319	4629.23486	-6089.33996	6205.55049	1.498
353.5	-4932.27632	4636.9768	-6099.44523	6216.11509	1.502
354.0	-4940.23946	4644.71873	-6109.55049	6226.22035	1.504
354.5	-4948.20259	4652.68186	-6119.65575	6236.78495	1.506
355.0	-4956.16572	4660.4238	-6130.22035	6246.89021	1.51
355.5	-4963.90766	4668.16573	-6140.32561	6257.4548	1.512
356.0	-4971.87079	4676.12887	-6150.43087	6267.56007	1.514
356.5	-4979.83393	4683.8708	-6160.53614	6278.12466	1.516
357.0	-4987.79706	4691.83394	-6171.10073	6288.22992	1.52
357.5	-4995.76019	4699.57587	-6181.206	6298.79452	1.522
358.0	-5003.72333	4707.31781	-6191.31126	6308.89978	1.524
358.5	-5011.46526	4715.28094	-6201.41652	6319.46437	1.528
359.0	-5019.42839	4723.02288	-6211.52179	6329.56964	1.53
359.5	-5027.39153	4730.76481	-6222.08638	6339.6749	1.532
360.0	-5035.13346	4738.72794	-6232.19164	6350.2395	1.536
360.5	-5043.0966	4746.46988	-6242.29691	6360.34476	1.538
361.0	-5051.05973	4754.21181	-6252.40217	6370.90935	1.54
361.5	-5058.80167	4762.17495	-6262.50743	6381.01462	1.544
362.0	-5066.7648	4769.91688	-6272.6127	6391.57921	1.546
362.5	-5074.72793	4777.65882	-6283.17729	6401.68447	1.548
363.0	-5082.46987	4785.62195	-6293.28256	6412.24907	1.55
363.5	-5090.433	4793.36389	-6303.38782	6422.35433	1.554
364.0	-5098.39613	4801.10582	-6313.49308	6432.91892	1.556
364.5	-5106.13807	4808.84776	-6323.59835	6443.02419	1.558
365.0	-5114.1012	4816.81089	-6333.70361	6453.58878	1.562
365.5	-5122.06434	4824.55283	-6343.80887	6463.69405	1.564
366.0	-5129.80627	4832.29476	-6353.91414	6473.79931	1.566
366.5	-5137.7694	4840.25789	-6364.47873	6484.3639	1.57
367.0	-5145.73254	4847.99983	-6374.58399	6494.46917	1.572
367.5	-5153.47447	4855.96296	-6384.68926	6505.03376	1.574
368.0	-5161.43761	4863.7049	-6394.79452	6515.13902	1.578
368.5	-5169.40074	4871.44683	-6405.35911	6525.70362	1.58
369.0	-5177.36387	4879.40997	-6415.46438	6535.80888	1.582
369.5	-5185.10581	4887.1519	-6425.56964	6546.37347	1.584
370.0	-5193.06894	4895.11504	-6435.67491	6556.47874	1.588
370.5	-5201.03208	4902.85697	-6446.2395	6567.04333	1.59
371.0	-5208.99521	4910.8201	-6456.34476	6577.1486	1.592
371.5	-5216.95834	4918.56204	-6466.90936	6587.25386	1.596
372.0	-5224.92148	4926.30397	-6477.01462	6597.81845	1.598
372.5	-5232.88461	4934.26711	-6487.11988	6607.92372	1.6
373.0	-5240.84774	4942.00904	-6497.68448	6618.48831	1.604
373.5	-5248.81088	4949.75098	-6507.78974	6628.59357	1.606
374.0	-5256.77401	4957.71411	-6518.35433	6638.69884	1.608

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
374.5	-5264.73714	4965.45605	-6528.91893	6649.26343	1.612
375.0	-5272.70028	4973.19798	-6539.02419	6659.36869	1.614
375.5	-5280.66341	4980.93992	-6549.58879	6669.47396	1.616
376.0	-5288.62654	4988.68185	-6560.15338	6679.57922	1.618
376.5	-5296.58968	4996.64499	-6570.71797	6690.14382	1.622
377.0	-5304.77401	5004.38692	-6581.28257	6700.24908	1.624
377.5	-5312.73714	5012.12886	-6591.38783	6710.35434	1.626
378.0	-5320.92147	5019.87079	-6601.95242	6720.45961	1.63
378.5	-5328.88461	5027.61273	-6612.51702	6730.56487	1.632
379.0	-5337.06894	5035.35466	-6623.08161	6741.12946	1.634
379.5	-5345.25327	5043.0966	-6633.64621	6751.23473	1.638
380.0	-5353.4376	5050.83853	-6644.2108	6761.33999	1.64
380.5	-5361.40073	5058.58047	-6654.77539	6771.44525	1.642
381.0	-5369.58506	5066.3224	-6665.79932	6781.55052	1.646
381.5	-5377.7694	5074.06434	-6676.36391	6791.65578	1.648
382.0	-5385.95373	5081.80627	-6686.9285	6802.22038	1.65
382.5	-5394.13806	5089.54821	-6697.4931	6812.32564	1.652
383.0	-5402.32239	5097.29014	-6708.05769	6822.4309	1.656
383.5	-5410.50672	5105.03208	-6718.62229	6832.53617	1.658
384.0	-5418.69105	5112.77401	-6729.18688	6842.64143	1.66
384.5	-5427.09658	5120.51595	-6739.75147	6853.20602	1.664
385.0	-5435.28091	5128.25788	-6750.7754	6863.31129	1.666
385.5	-5443.46525	5135.99982	-6761.33999	6873.41655	1.668
386.0	-5451.64958	5143.74175	-6771.90458	6883.98114	1.67
386.5	-5459.83391	5151.48369	-6782.46918	6894.08641	1.674
387.0	-5468.01824	5159.22563	-6793.03377	6904.19167	1.676
387.5	-5476.20257	5166.96756	-6803.59837	6914.29693	1.678
388.0	-5484.6081	5174.7095	-6814.16296	6924.86153	1.682
388.5	-5492.79243	5182.23023	-6824.72755	6934.96679	1.684
389.0	-5500.97677	5189.97217	-6835.29215	6945.07206	1.686
389.5	-5509.1611	5197.7141	-6845.85674	6955.17732	1.69
390.0	-5517.34543	5205.45604	-6856.42133	6965.74191	1.692
390.5	-5525.52976	5213.19797	-6866.98593	6975.84718	1.694
391.0	-5533.71409	5220.71871	-6877.55052	6985.95244	1.696
391.5	-5541.89842	5228.46065	-6888.11512	6996.51703	1.7
392.0	-5550.30395	5236.20258	-6898.67971	7006.6223	1.702
392.5	-5558.48828	5243.94452	-6909.2443	7016.72756	1.704
393.0	-5566.67262	5251.68645	-6919.8089	7027.29215	1.706
393.5	-5574.85695	5259.20719	-6930.37349	7037.39742	1.71
394.0	-5583.04128	5266.94912	-6940.93808	7047.50268	1.712
394.5	-5591.22561	5274.69106	-6951.50268	7058.06728	1.714
395.0	-5599.63114	5282.43299	-6962.06727	7068.17254	1.718
395.5	-5607.81547	5290.17493	-6972.63187	7078.2778	1.72
396.0	-5615.9998	5297.69567	-6983.19646	7088.8424	1.722
396.5	-5624.18413	5305.4376	-6993.76105	7098.94766	1.726
397.0	-5632.36847	5313.17954	-7004.32565	7109.05292	1.728
397.5	-5640.774	5320.92147	-7014.89024	7119.15819	1.73
398.0	-5648.95833	5328.44221	-7025.45483	7129.72278	1.732
398.5	-5657.14266	5336.18414	-7036.01943	7139.82804	1.736
399.0	-5665.32699	5343.92608	-7046.58402	7149.93331	1.738
399.5	-5673.51132	5351.66801	-7057.14862	7160.4979	1.74
400.0	-5681.91685	5359.40995	-7067.71321	7170.60317	1.744
400.5	-5690.10118	5366.93069	-7078.2778	7180.70843	1.746
401.0	-5698.28551	5374.67262	-7088.8424	7190.81369	1.748
401.5	-5706.46985	5382.19336	-7099.40699	7200.91896	1.75

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	**Senzor *B*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*	
402.0	-5714.65418	5389.93529	-7109.97158	7211.02422	1.754
402.5	-5722.83851	5397.45603	-7120.53618	7221.12948	1.756
403.0	-5731.02284	5405.19797	-7131.10077	7231.23475	1.758
403.5	-5739.20717	5412.9399	-7141.66537	7241.34001	1.762
404.0	-5747.3915	5420.46064	-7152.22996	7251.44527	1.764
404.5	-5755.79703	5428.20257	-7162.33522	7261.55054	1.766
405.0	-5763.98136	5435.94451	-7172.89982	7272.11513	1.768
405.5	-5772.1657	5443.68644	-7183.46441	7282.22039	1.772
406.0	-5780.35003	5451.20718	-7194.029	7292.32566	1.774
406.5	-5788.75556	5458.94912	-7204.5936	7302.43092	1.776
407.0	-5796.93989	5466.46985	-7215.15819	7312.99552	1.78
407.5	-5805.12422	5474.21179	-7225.72278	7323.10078	1.782
408.0	-5813.30855	5481.95372	-7236.28738	7333.20604	1.784
408.5	-5821.71408	5489.47446	-7246.85197	7343.77064	1.786
409.0	-5829.89841	5497.2164	-7257.41657	7353.8759	1.79
409.5	-5838.08274	5504.95833	-7267.98116	7363.98116	1.792
410.0	-5846.48827	5512.70027	-7278.54575	7374.54576	1.794
410.5	-5854.67261	5520.221	-7289.11035	7384.65102	1.798
411.0	-5862.85694	5527.96294	-7299.67494	7394.75628	1.8
411.5	-5871.26247	5535.70487	-7310.23953	7405.32088	1.802
412.0	-5879.4468	5543.44681	-7320.80413	7415.42614	1.806
412.5	-5887.63113	5550.96755	-7331.36872	7425.53141	1.808
413.0	-5896.03666	5558.70948	-7341.93332	7435.63667	1.81
413.5	-5904.22099	5566.45142	-7352.49791	7445.74193	1.814
414.0	-5912.40532	5574.19335	-7363.0625	7456.30653	1.816
414.5	-5920.81085	5581.71409	-7373.6271	7466.41179	1.818
415.0	-5928.99518	5589.45602	-7384.19169	7476.51705	1.82
415.5	-5937.40071	5597.19796	-7394.75628	7486.62232	1.824
416.0	-5945.58504	5604.7187	-7405.32088	7496.72758	1.826
416.5	-5953.76938	5612.46063	-7415.88547	7506.83284	1.828
417.0	-5962.17491	5620.20257	-7426.45007	7516.93811	1.832
417.5	-5970.35924	5627.7233	-7437.47399	7527.04337	1.834
418.0	-5978.54357	5635.46524	-7448.03858	7537.14863	1.836
418.5	-5986.9491	5643.20717	-7458.60318	7547.2539	1.838
419.0	-5995.13343	5650.72791	-7469.16777	7557.81849	1.842
419.5	-6003.31776	5658.46985	-7479.73236	7567.92376	1.844
420.0	-6011.72329	5666.21178	-7490.29696	7578.02902	1.846
420.5	-6019.90762	5673.73252	-7500.86155	7588.13428	1.85
421.0	-6028.09195	5681.47445	-7511.42615	7598.23955	1.852
421.5	-6036.49748	5689.21639	-7521.99074	7608.34481	1.854
422.0	-6044.68182	5696.73713	-7532.55533	7618.45007	1.858
422.5	-6052.86615	5704.47906	-7543.11993	7628.55534	1.86
423.0	-6061.27168	5712.221	-7553.68452	7639.11993	1.862
423.5	-6069.45601	5719.74173	-7564.70844	7649.22519	1.864
424.0	-6077.86154	5727.48367	-7575.27304	7659.33046	1.868
424.5	-6086.04587	5735.2256	-7585.83763	7669.43572	1.87
425.0	-6094.2302	5742.74634	-7596.40223	7679.54099	1.872
425.5	-6102.63573	5750.48828	-7606.96682	7689.64625	1.876
426.0	-6110.82006	5758.23021	-7617.53141	7699.75151	1.878
426.5	-6119.22559	5765.75095	-7628.09601	7709.85678	1.88
427.0	-6127.40992	5773.27169	-7638.6606	7719.50271	1.882
427.5	-6135.59425	5780.79242	-7649.22519	7729.60797	1.886
428.0	-6143.77859	5788.31316	-7659.78979	7739.71324	1.888

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
428.5	-6151.96292	5795.8339	-7670.35438	7749.35917	1.89
429.0	-6160.14725	5803.35463	-7680.91898	7759.46443	1.894
429.5	-6168.33158	5811.09657	-7691.48357	7769.5697	1.896
430.0	-6176.73711	5818.61731	-7702.04816	7779.21563	1.898
430.5	-6184.92144	5826.35924	-7712.61276	7789.32089	1.9
431.0	-6193.32697	5833.87998	-7723.17735	7798.96683	1.904
431.5	-6201.5113	5841.62191	-7734.20127	7808.61276	1.906
432.0	-6209.91683	5849.14265	-7744.76587	7818.71802	1.908
432.5	-6218.10116	5856.88459	-7755.33046	7828.36396	1.912
433.0	-6226.2855	5864.40532	-7765.89506	7838.46922	1.914
433.5	-6234.69103	5872.14726	-7776.45965	7848.57448	1.916
434.0	-6242.87536	5879.668	-7787.02424	7858.22042	1.918
434.5	-6251.28089	6853.38225	-7798.04817	7868.32568	1.922
435.0	-6259.46522	6853.38225	-7808.61276	7877.97162	1.924
435.5	-6267.87075	6853.38225	-7819.17735	7887.61755	1.926
436.0	-6276.05508	6853.38225	-7830.20128	7897.72281	1.93
436.5	-6284.23941	6853.38225	-7840.76587	7907.36875	1.932
437.0	-6292.64494	6853.38225	-7851.33047	7917.01468	1.934
437.5	-6300.82927	6853.38225	-7862.35439	7926.66061	1.938
438.0	-6309.2348	6853.38225	-7872.91898	7936.30655	1.94
438.5	-6317.41913	6853.38225	-7883.48358	7945.95248	1.942
439.0	-6325.82466	6853.38225	-7894.5075	7955.13908	1.944
439.5	-6334.23019	6853.38225	-7905.07209	7964.32569	1.948
440.0	-6342.41452	6853.38225	-7916.09602	7973.51229	1.95
440.5	-6350.82005	6853.38225	-7926.66061	7982.23956	1.952
441.0	-6359.00438	-7642.83844	-7937.68454	7990.96684	1.956
441.5	-6367.40991	-7642.83844	-7948.24913	7999.23478	1.958
442.0	-6375.59425	-7642.83844	-7959.27305	8007.04339	1.96
442.5	-6383.99978	-7642.83844	-7969.83765	8014.852	1.964
443.0	-6392.40531	-7642.83844	-7980.86157	8023.11995	1.966
443.5	-6400.58964	-7642.83844	-7991.8855	8031.38789	1.968
444.0	-6408.99517	-7642.83844	-8002.90942	8039.65583	1.97
444.5	-6417.4007	-7642.83844	-8013.93334	8048.84244	1.974
445.0	-6425.58503	-7642.83844	-8024.49794	8057.56971	1.976
445.5	-6433.99056	-7642.83844	-8035.52186	8066.75631	1.978
446.0	-6442.17489	-7642.83844	-8046.08645	8076.40225	1.982
446.5	-6450.58042	-7642.83844	-8057.11038	8085.58885	1.984
447.0	-6458.76475	-7642.83844	-8067.67497	8095.23478	1.986
447.5	-6467.17028	-7642.83844	-8078.6989	8104.88072	1.99
448.0	-6475.57581	-7642.83844	-8089.26349	8114.52665	1.992
448.5	-6483.76014	-7642.83844	-8100.28741	8124.17258	1.994
449.0	-6492.16567	-7642.83844	-8110.85201	8133.81852	1.996
449.5	-6500.35	-7642.83844	-8121.4166	8143.46445	2
450.0	-6508.75553	-7642.83844	-8132.44053	8153.11038	2.002
450.5	-6516.93986	-7642.83844	-8143.00512	8162.75632	2.004
451.0	-6525.12419	-7642.83844	-8153.56971	8172.86158	2.008
451.5	-6533.30853	-7642.83844	-8164.59364	8182.50751	2.01
452.0	-6541.71406	-7642.83844	-8175.15823	8192.15345	2.012
452.5	-6549.89839	-7642.83844	-8185.72282	8202.25871	2.014
453.0	-6558.08272	-7642.83844	-8196.28742	8211.90464	2.018
453.5	-6566.48825	-7642.83844	-8207.31134	8221.55058	2.02
454.0	-6574.67258	-7642.83844	-8217.87594	8231.65584	2.022
454.5	-6583.07811	-7642.83844	-8228.89986	8241.30177	2.026
455.0	-6591.48364	-7642.83844	-8239.46445	8251.40704	2.028
455.5	-6599.66797	-7642.83844	-8250.48838	8261.05297	2.03

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
456.0	-6608.0735	-7642.83844	-8261.5123	8271.15823	2.032
456.5	-6616.47903	-7642.83844	-8272.53622	8281.2635	2.036
457.0	-6624.66336	-7642.83844	-8283.56015	8290.90943	2.038
457.5	-6633.06889	-7642.83844	-8294.58407	8301.01469	2.04
458.0	-6641.47442	-7642.83844	-8305.14867	8310.66063	2.044
458.5	-6649.65875	-7642.83844	-8316.17259	8320.76589	2.046
459.0	-6658.06428	-7642.83844	-8327.19651	8330.87116	2.048
459.5	-6666.24861	-7642.83844	-8337.76111	8340.51709	2.052
460.0	-6674.65414	-7642.83844	-8348.78503	8350.62235	2.054
460.5	-6683.05967	-7642.83844	-8359.34963	8360.26829	2.056
461.0	-6691.244	-7642.83844	-8370.37355	8370.37355	2.058
461.5	-6699.42834	-7642.83844	-8380.93814	8380.01948	2.062
462.0	-6707.61267	-7642.83844	-8391.50274	8390.12475	2.064
462.5	-6716.0182	-7642.83844	-8402.52666	8400.23001	2.066
463.0	-6724.20253	-7642.83844	-8413.09125	8409.87594	2.07
463.5	-6732.38686	-7642.83844	-8424.11518	8419.98121	2.072
464.0	-6740.79239	-7642.83844	-8434.67977	8429.62714	2.074
464.5	-6748.97672	-7642.83844	-8445.24437	8439.7324	2.076
465.0	-6757.38225	-7642.83844	-8456.26829	8449.83767	2.08
465.5	-6765.78778	-7642.83844	-8466.83288	8459.4836	2.082
466.0	-6773.97211	-7642.83844	-8477.85681	8469.58886	2.084
466.5	-6782.37764	-7642.83844	-8488.4214	8479.2348	2.088
467.0	-6790.78317	-7642.83844	-8499.44533	8489.34006	2.09
467.5	-6798.9675	-7642.83844	-8510.00992	8499.44533	2.092
468.0	-6807.37303	-7642.83844	-8521.03384	8509.09126	2.094
468.5	-6815.77856	-7642.83844	-8531.59844	8519.19652	2.098
469.0	-6824.18409	-7642.83844	-8542.62236	8529.30179	2.1
469.5	-6832.36842	-7642.83844	-8553.64628	8538.94772	2.102
470.0	-6840.77395	-7642.83844	-8564.21088	8549.05298	2.106
470.5	-6849.17948	-7642.83844	-8575.2348	8559.15825	2.108
471.0	-6857.36381	-7642.83844	-8585.7994	8568.80418	2.11
471.5	-6865.76934	-7642.83844	-8596.82332	8578.45011	2.114
472.0	-6873.95368	-7642.83844	-8607.38791	8588.55538	2.116
472.5	-6882.35921	-7642.83844	-8618.41184	8598.20131	2.118
473.0	-6890.54354	-7642.83844	-8628.97643	8608.30657	2.12
473.5	-6898.94907	-7642.83844	-8640.00035	8617.95251	2.124
474.0	-6907.3546	-7642.83844	-8650.56495	8628.05777	2.126
474.5	-6915.53893	-7642.83844	-8661.58887	8637.7037	2.128
475.0	-6923.94446	-7642.83844	-8672.15347	8647.80897	2.132
475.5	-6932.34999	-7642.83844	-8683.17739	8657.4549	2.134
476.0	-6940.53432	-7642.83844	-8693.74198	8667.56016	2.136
476.5	-6948.93985	-7642.83844	-8704.76591	8677.2061	2.14
477.0	-6957.34538	-7642.83844	-8715.3305	8687.31136	2.142
477.5	-6965.52971	-7642.83844	-8726.35443	8697.41663	2.144
478.0	-6973.93524	-7642.83844	-8736.91902	8707.06256	2.146
478.5	-6982.34077	-7642.83844	-8747.94294	8717.16782	2.15
479.0	-6990.7463	-7642.83844	-8758.50754	8726.81376	2.152
479.5	-6998.93063	-7642.83844	-8769.53146	8736.91902	2.154
480.0	-7007.33616	-7642.83844	-8780.09605	8747.02428	2.158
480.5	-7015.74169	-7642.83844	-8791.11998	8756.67022	2.16
481.0	-7024.14722	-7642.83844	-8801.68457	8766.77548	2.162
481.5	-7032.33155	-7642.83844	-8812.7085	8776.88074	2.164
482.0	-7040.73708	-7642.83844	-8823.27309	8786.52668	2.168

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
482.5	-7049.14261	-7642.83844	-8834.29701	8796.63194	2.17
483.0	-7057.54814	-7642.83844	-8844.86161	8806.27787	2.172
483.5	-7065.73247	-7642.83844	-8855.88553	8816.38314	2.176
484.0	-7074.138	-7642.83844	-8866.45012	8826.4884	2.178
484.5	-7082.54353	-7642.83844	-8877.47405	8836.13433	2.18
485.0	-7090.72786	-7642.83844	-8888.49797	8846.2396	2.182
485.5	-7098.91219	-7642.83844	-8899.06257	8856.34486	2.186
486.0	-7106.87533	-7642.83844	-8910.08649	8866.45012	2.188
486.5	-7114.61726	-7642.83844	-8920.65108	8876.55539	2.19
487.0	-7122.138	-7642.83844	-8931.67501	8886.20132	2.194
487.5	-7129.43754	-7642.83844	-8942.2396	8896.30659	2.196
488.0	-7136.73708	-7642.83844	-8952.8042	8906.41185	2.198
488.5	-7143.81542	-7642.83844	-8963.82812	8916.05778	2.202
489.0	-7150.67256	-7642.83844	-8974.39271	8926.16305	2.204
489.5	-7157.5297	-7642.83844	-8985.41664	8935.80898	2.206
490.0	-7969.9905	-7642.83844	-8995.98123	8945.91424	2.208
490.5	-7969.9905	-7642.83844	-9006.54582	8955.56018	2.212
491.0	-7969.9905	-7642.83844	-9017.56975	8965.20611	2.214
491.5	-7969.9905	-7642.83844	-9028.59367	8975.31137	2.216
492.0	-7969.9905	-7642.83844	-9039.15827	8985.41664	2.22
492.5	-7969.9905	-7642.83844	-9050.18219	8995.06257	2.222
493.0	-7969.9905	-7642.83844	-9060.74678	9005.16783	2.224
493.5	-7969.9905	-7642.83844	-9071.77071	9014.81377	2.226
494.0	-7969.9905	-7642.83844	-9082.3353	9024.91903	2.23
494.5	-7969.9905	-7642.83844	-9093.35923	9034.56496	2.232
495.0	-7969.9905	-7642.83844	-9103.92382	9044.67023	2.234
495.5	-7969.9905	-7642.83844	-9114.94774	9054.77549	2.238
496.0	-7969.9905	-7642.83844	-9125.51234	9064.42142	2.24
496.5	-7969.9905	-7642.83844	-9136.53626	9074.52669	2.242
497.0	-7969.9905	-7642.83844	-9147.10085	9084.63195	2.244
497.5	-7969.9905	-7642.83844	-9158.12478	9094.27789	2.248
498.0	-7969.9905	-7642.83844	-9168.68937	9104.38315	2.25
498.5	-7969.9905	-7642.83844	-9179.7133	9114.48841	2.252
499.0	-7969.9905	-7642.83844	-9190.27789	9124.13435	2.256
499.5	-7969.9905	-7642.83844	-9201.30181	9134.23961	2.258
500.0	-7969.9905	-7642.83844	-9211.86641	9144.34487	2.26
500.5	-7969.9905	-7642.83844	-9222.89033	9153.99081	2.262
501.0	-7969.9905	-7642.83844	-9233.91425	9164.09607	2.266
501.5	-7969.9905	-7642.83844	-9244.47885	9174.20133	2.268
502.0	-7969.9905	-7642.83844	-9255.50277	9184.3066	2.27
502.5	-7969.9905	-7642.83844	-9266.06737	9193.95253	2.274
503.0	-7969.9905	-7642.83844	-9277.09129	9204.05779	2.276
503.5	-7969.9905	-7642.83844	-9287.65588	9213.70373	2.278
504.0	-7969.9905	-7642.83844	-9298.67981	9223.80899	2.282
504.5	-7969.9905	-7642.83844	-9309.2444	9233.45492	2.284
505.0	-7969.9905	-7642.83844	-9320.26833	9243.10086	2.286
505.5	-7969.9905	-7642.83844	-9330.83292	9253.20612	2.288
506.0	-7969.9905	-7642.83844	-9341.85684	9263.31139	2.292
506.5	-7969.9905	-7642.83844	-9352.42144	9272.95732	2.294
507.0	-7969.9905	-7642.83844	-9362.98603	9283.06258	2.296
507.5	-7969.9905	-7642.83844	-9374.00995	9293.16785	2.3
508.0	-7969.9905	-7642.83844	-9384.57455	9302.81378	2.302
508.5	-7969.9905	-7642.83844	-9395.59847	9312.91904	2.304
509.0	-7969.9905	-7642.83844	-9406.16307	9322.56498	2.308
509.5	-7969.9905	-7642.83844	-9416.72766	9332.21091	2.31

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
510.0	-7969.9905	-7642.83844	-9427.75158	9342.31617	2.312
510.5	-7969.9905	-7642.83844	-9438.31618	9352.42144	2.314
511.0	-7969.9905	-7642.83844	-9448.88077	9362.5267	2.318
511.5	-7969.9905	-7642.83844	-9459.90469	9373.09129	2.32
512.0	-7969.9905	-7642.83844	-9470.46929	9383.19656	2.322
512.5	-7969.9905	-7642.83844	-9481.49321	9393.30182	2.324
513.0	-7969.9905	-7642.83844	-9492.05781	9403.40708	2.328
513.5	-7969.9905	-7642.83844	-9502.6224	9413.51235	2.33
514.0	-7969.9905	-7642.83844	-9513.64632	9423.61761	2.332
514.5	-7969.9905	-7642.83844	-9524.21092	9433.72288	2.336
515.0	-7969.9905	-7642.83844	-9535.23484	9443.82814	2.338
515.5	-7969.9905	-7642.83844	-9546.25877	9453.9334	2.34
516.0	-7969.9905	-7642.83844	-9557.28269	9464.03867	2.342
516.5	-7969.9905	-7642.83844	-9567.84728	9474.14393	2.346
517.0	-7969.9905	-7642.83844	-9578.87121	9483.78986	2.348
517.5	-7969.9905	-7642.83844	-9589.89513	9493.89513	2.35
518.0	-7969.9905	-7642.83844	-9600.91905	9503.54106	2.354
518.5	-7969.9905	-7642.83844	-9611.48365	9513.64632	2.356
519.0	-7969.9905	-7642.83844	-9622.50757	9523.29226	2.358
519.5	-7969.9905	-7642.83844	-9633.5315	9533.39752	2.362
520.0	-7969.9905	-7642.83844	-9644.55542	9543.50278	2.364
520.5	-7969.9905	-7642.83844	-9655.12001	9553.14872	2.366
521.0	-7969.9905	-7642.83844	-9666.14394	9562.79465	2.368
521.5	-7969.9905	-7642.83844	-9677.16786	9572.44058	2.372
522.0	-7969.9905	-7642.83844	-9688.19179	9582.08652	2.374
522.5	-7969.9905	-7642.83844	-9699.21571	9592.19178	2.376
523.0	-7969.9905	-7642.83844	-9709.7803	9603.21571	2.38
523.5	-7969.9905	-7642.83844	-9719.88557	9615.61762	2.382
524.0	-7969.9905	-7642.83844	-9729.99083	9628.93819	2.384
524.5	-7969.9905	-7642.83844	-9740.09609	9641.79944	2.386
525.0	-7969.9905	-7642.83844	-9750.20136	9653.74202	2.39
525.5	-7969.9905	-7642.83844	-9760.30662	9665.22528	2.392
526.0	-7969.9905	-7642.83844	-9770.87121	9675.78987	2.394
526.5	-7969.9905	-7642.83844	-9781.43581	9686.35446	2.396
527.0	-7969.9905	-7642.83844	-9792.0004	9696.45973	2.4
527.5	-7969.9905	-7642.83844	-9802.565	9706.56499	2.402
528.0	-7969.9905	-7642.83844	-9813.58892	9716.67026	2.404
528.5	-7969.9905	-7642.83844	-9824.15351	9726.77552	2.406
529.0	-7969.9905	-7642.83844	-9835.17744	9736.88078	2.41
529.5	-7969.9905	-7642.83844	-9845.74203	9746.98605	2.412
530.0	-7969.9905	-7642.83844	-9856.76596	9757.09131	2.414
530.5	-7969.9905	-7642.83844	-9867.78988	9767.19657	2.418
531.0	-7969.9905	-7642.83844	-9878.8138	9777.30184	2.42
531.5	-7969.9905	-7642.83844	-9889.83773	9787.86643	2.422
532.0	-7969.9905	-7642.83844	-9900.40232	9797.97169	2.426
532.5	-7969.9905	-7642.83844	-9911.42624	9808.53629	2.428
533.0	-7969.9905	-7642.83844	-9922.45017	9818.64155	2.43
533.5	-7969.9905	-7642.83844	-9933.47409	9828.74682	2.432
534.0	-7969.9905	-7642.83844	-9944.49802	9838.39275	2.436
534.5	-7969.9905	-7642.83844	-9955.06261	9848.49801	2.438
535.0	-7969.9905	-7642.83844	-9966.08653	9858.60328	2.44
535.5	-7969.9905	-7642.83844	-9977.11046	9868.70854	2.444
536.0	-7969.9905	-7642.83844	-9988.13438	9878.35447	2.446

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
536.5	-7969.9905	-7642.83844	-9998.69898	9888.45974	2.448
537.0	-7969.9905	-7642.83844	-10009.7229	9897.64634	2.45
537.5	-7969.9905	-7642.83844	-10020.28749	9907.29227	2.454
538.0	-7969.9905	-7642.83844	-10031.31142	9916.47888	2.456
538.5	-7969.9905	-7642.83844	-10041.87601	9926.12481	2.458
539.0	-7969.9905	-7642.83844	-10052.89993	9935.77074	2.462
539.5	-7969.9905	-7642.83844	-10063.92386	9945.41668	2.464
540.0	-7969.9905	-7642.83844	-10074.94778	9955.52194	2.466
540.5	-7969.9905	-7642.83844	-10085.97171	9965.16787	2.468
541.0	-7969.9905	-7642.83844	-10096.99563	9974.81381	2.472
541.5	-7969.9905	-7642.83844	-10107.56022	9984.91907	2.474
542.0	-7969.9905	-7642.83844	-10118.58415	9994.565	2.476
542.5	-7969.9905	-7642.83844	-10129.60807	10004.21094	2.48
543.0	-7969.9905	-7642.83844	-10140.632	10014.3162	2.482
543.5	-7969.9905	-7642.83844	-10151.19659	10023.96213	2.484
544.0	-7969.9905	-7642.83844	-10161.76118	10033.60807	2.486
544.5	-7969.9905	-7642.83844	-10172.78511	10043.254	2.49
545.0	-7969.9905	-7642.83844	-10183.3497	10052.89993	2.492
545.5	-7969.9905	-7642.83844	-10194.37362	10063.0052	2.494
546.0	-7969.9905	-7642.83844	-10204.93822	10072.65113	2.496
546.5	-7969.9905	-7642.83844	-10215.96214	10082.75639	2.5
547.0	-7969.9905	-7642.83844	-10226.52674	10092.86166	2.502
547.5	-7969.9905	-7642.83844	-10237.55066	10102.50759	2.504
548.0	-7969.9905	-7642.83844	-10248.11525	10112.61286	2.508
548.5	-7969.9905	-7642.83844	-10259.13918	10122.25879	2.51
549.0	-7969.9905	-7642.83844	-10270.1631	10132.36405	2.512
549.5	-7969.9905	-7642.83844	-10280.72769	10142.46932	2.514
550.0	-7969.9905	-7642.83844	-10291.75162	10152.11525	2.518
550.5	-7969.9905	-7642.83844	-10302.31621	10162.22051	2.52
551.0	-7969.9905	-7642.83844	-10312.88081	10172.32578	2.522
551.5	-7969.9905	-7642.83844	-10323.90473	10181.97171	2.526
552.0	-7969.9905	-7642.83844	-10334.46932	10191.15831	2.528
552.5	-7969.9905	-7642.83844	-10345.03392	10200.80425	2.53
553.0	-7969.9905	-7642.83844	-10356.05784	10210.45018	2.532
553.5	-7969.9905	-7642.83844	-10366.62244	10220.09611	2.536
554.0	-7969.9905	-7642.83844	-10377.18703	10230.20138	2.538
554.5	-7969.9905	-7642.83844	-10388.21095	10239.84731	2.54
555.0	-7969.9905	-7642.83844	-10399.23488	10249.95257	2.544
555.5	-7969.9905	-7642.83844	-10409.79947	10259.59851	2.546
556.0	-7969.9905	-7642.83844	-10420.82339	10269.70377	2.548
556.5	-7969.9905	-7642.83844	-10431.38799	10279.3497	2.55
557.0	-7969.9905	-7642.83844	-10442.41191	10288.99564	2.554
557.5	-7969.9905	-7642.83844	-10452.97651	10299.1009	2.556
558.0	-7969.9905	-7642.83844	-10464.00043	10309.20616	2.558
558.5	-7969.9905	-7642.83844	-10475.02435	10318.8521	2.56
559.0	-7969.9905	-7642.83844	-10486.04828	10328.95736	2.564
559.5	-7969.9905	-7642.83844	-10497.0722	10339.06263	2.566
560.0	-7969.9905	-7642.83844	-10508.09613	10348.70856	2.568
560.5	-7969.9905	-7642.83844	-10519.12005	10358.81382	2.572
561.0	-7969.9905	-7642.83844	-10530.14397	10368.91909	2.574
561.5	-7969.9905	-7642.83844	-10540.70857	10379.02435	2.576
562.0	-7969.9905	-7642.83844	-10551.73249	10389.12961	2.578
562.5	-7969.9905	-7642.83844	-10562.29708	10399.69421	2.582
563.0	-7969.9905	-7642.83844	-10572.86168	10410.2588	2.584
563.5	-7969.9905	-7642.83844	-10583.42627	10421.28272	2.586

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
564.0	-7969.9905	-7642.83844	-10593.99087	10431.84732	2.588
564.5	-7969.9905	-7642.83844	-10604.55546	10442.41191	2.592
565.0	-7969.9905	-7642.83844	-10615.12005	10452.51718	2.594
565.5	-7969.9905	-7642.83844	-10626.14398	10463.08177	2.596
566.0	-7969.9905	-7642.83844	-10636.70857	10472.7277	2.598
566.5	-7969.9905	-7642.83844	-10647.73249	10482.83297	2.602
567.0	-7969.9905	-7642.83844	-10658.75642	10492.93823	2.604
567.5	-7969.9905	-7642.83844	-10669.78034	10503.04349	2.606
568.0	-7969.9905	-7642.83844	-10680.80427	10512.68943	2.608
568.5	-7969.9905	-7642.83844	-10691.82819	10522.79469	2.612
569.0	-7969.9905	-7642.83844	-10703.31144	10532.89995	2.614
569.5	-7969.9905	-7642.83844	-10714.7947	10542.54589	2.616
570.0	-7969.9905	-7642.83844	-10726.27795	10552.65115	2.62
570.5	-7969.9905	-7642.83844	-10737.76121	10562.75641	2.622
571.0	-7969.9905	-7642.83844	-10748.78513	10572.40235	2.624
571.5	-7969.9905	-7642.83844	-10760.26838	10582.50761	2.626
572.0	-7969.9905	-7642.83844	-10771.75164	10592.15355	2.63
572.5	-7969.9905	-7642.83844	-10782.77556	10602.25881	2.632
573.0	-7969.9905	-7642.83844	-10794.25882	10612.36407	2.634
573.5	-7969.9905	-7642.83844	-10805.28274	10622.01001	2.636
574.0	-7969.9905	-7642.83844	-10816.30666	10631.65594	2.64
574.5	-7969.9905	-7642.83844	-10827.33059	10641.7612	2.642
575.0	-7969.9905	-7642.83844	-10838.35451	10651.40714	2.644
575.5	-7969.9905	-7642.83844	-10849.37844	10661.5124	2.646
576.0	-7969.9905	-7642.83844	-10860.40236	10671.15833	2.65
576.5	-7969.9905	-7642.83844	-10871.42628	10681.2636	2.652
577.0	-7969.9905	-7642.83844	-10882.45021	10691.36886	2.654
577.5	-7969.9905	-7642.83844	-10893.47413	10701.01479	2.656
578.0	-7969.9905	-7642.83844	-10904.49806	10711.12006	2.66
578.5	-7969.9905	-7642.83844	-10915.06265	10720.76599	2.662
579.0	-7969.9905	-7642.83844	-10926.08657	10730.87125	2.664
579.5	-7969.9905	-7642.83844	-10937.1105	10740.51719	2.668
580.0	-7969.9905	-7642.83844	-10948.13442	10750.62245	2.67
580.5	-7969.9905	-7642.83844	-10958.69901	10760.72771	2.672
581.0	-7969.9905	-7642.83844	-10969.72294	10770.37365	2.674
581.5	-7969.9905	-7642.83844	-10980.74686	10780.47891	2.678
582.0	-7969.9905	-7642.83844	-10991.31146	10790.12485	2.68
582.5	-7969.9905	-7642.83844	-11002.33538	10800.23011	2.682
583.0	-7969.9905	-7642.83844	-11013.3593	10809.87604	2.684
583.5	-7969.9905	-7642.83844	-11024.38323	10819.98131	2.688
584.0	-7969.9905	-7642.83844	-11034.94782	10830.08657	2.69
584.5	-7969.9905	-7642.83844	-11045.97175	10839.7325	2.692
585.0	-7969.9905	-7642.83844	-11056.99567	10849.83777	2.696
585.5	-7969.9905	-7642.83844	-11068.01959	10859.4837	2.698
586.0	-7969.9905	-7642.83844	-11079.04352	10869.58896	2.7
586.5	-7969.9905	-7642.83844	-11089.60811	10879.69423	2.702
587.0	-7969.9905	-7642.83844	-11100.1727	10889.34016	2.706
587.5	-7969.9905	-7642.83844	-11110.7373	10898.98609	2.708
588.0	-7969.9905	-7642.83844	-11121.30189	10908.63203	2.71
588.5	-7969.9905	-7642.83844	-11131.86649	10918.73729	2.712
589.0	-7969.9905	-7642.83844	-11142.89041	10928.38322	2.716
589.5	-7969.9905	-7642.83844	-11153.455	10938.02916	2.718
590.0	-7969.9905	-7642.83844	-11164.47893	10948.13442	2.72

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	**Senzor *B*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*	
590.5	-7969.9905	-7642.83844	-11175.04352	10958.23968	2.724
591.0	-7969.9905	-7642.83844	-11186.06745	10967.88562	2.726
591.5	-7969.9905	-7642.83844	-11197.09137	10977.99088	2.728
592.0	-7969.9905	-7642.83844	-11207.65596	10988.09615	2.73
592.5	-7969.9905	-7642.83844	-11218.67989	10997.74208	2.734
593.0	-7969.9905	-7642.83844	-11229.70381	11007.84734	2.736
593.5	-7969.9905	-7642.83844	-11240.72773	11017.49328	2.738
594.0	-7969.9905	-7642.83844	-11251.75166	11027.59854	2.742
594.5	-7969.9905	-7642.83844	-11262.77558	11037.24447	2.744
595.0	-7969.9905	-7642.83844	-11273.79951	11047.34974	2.746
595.5	-7969.9905	-7642.83844	-11284.82343	11056.99567	2.748
596.0	-7969.9905	-7642.83844	-11295.38802	11066.6416	2.752
596.5	-7969.9905	-7642.83844	-11306.41195	11076.74687	2.754
597.0	-7969.9905	-7642.83844	-11317.43587	11086.3928	2.756
597.5	-7969.9905	-7642.83844	-11328.4598	11096.03873	2.76
598.0	-7969.9905	-7642.83844	-11339.48372	11105.68467	2.762
598.5	-7969.9905	-7642.83844	-11350.04831	11115.78993	2.764
599.0	-7969.9905	-7642.83844	-11361.07224	11125.43586	2.766
599.5	-7969.9905	-7642.83844	-11372.09616	11135.54113	2.77
600.0	-7969.9905	-7642.83844	-11383.12008	11145.18706	2.772
600.5	-7969.9905	-7642.83844	-11394.14401	11155.29232	2.774
601.0	-7969.9905	-7642.83844	-11404.7086	11164.93826	2.778
601.5	-7969.9905	-7642.83844	-11415.73253	11174.58419	2.78
602.0	-7969.9905	-7642.83844	-11426.75645	11184.68945	2.782
602.5	-7969.9905	-7642.83844	-11438.2397	11194.33539	2.784
603.0	-7969.9905	-7642.83844	-11449.72296	11203.52199	2.786
603.5	-7969.9905	-7642.83844	-11461.20621	11213.16792	2.79
604.0	-7969.9905	-7642.83844	-11472.23014	11222.81386	2.792
604.5	-7969.9905	-7642.83844	-11483.25406	11232.91912	2.794
605.0	-7969.9905	-7642.83844	-11494.27798	11243.02439	2.798
605.5	-7969.9905	-7642.83844	-11505.30191	11253.12965	2.8
606.0	-7969.9905	-7642.83844	-11515.8665	11262.77558	2.802
606.5	-7969.9905	-7642.83844	-11526.89043	11272.88085	2.804
607.0	-7969.9905	-7642.83844	-11537.91435	11282.98611	2.808
607.5	-7969.9905	-7642.83844	-11548.47894	11293.09137	2.81
608.0	-7969.9905	-7642.83844	-11559.50287	11302.73731	2.812
608.5	-7969.9905	-7642.83844	-11570.06746	11312.84257	2.816
609.0	-7969.9905	-7642.83844	-11581.09138	11322.4885	2.818
609.5	-7969.9905	-7642.83844	-11591.65598	11332.59377	2.82
610.0	-7969.9905	-7642.83844	-11602.6799	11342.69903	2.822
610.5	-7969.9905	-7642.83844	-11613.70383	11352.34496	2.826
611.0	-7969.9905	-7642.83844	-11624.72775	11362.45023	2.828
611.5	-7969.9905	-7642.83844	-11635.75167	11372.55549	2.83
612.0	-7969.9905	-7642.83844	-11646.7756	11382.20142	2.832
612.5	-7969.9905	-7642.83844	-11657.34019	11392.30669	2.836
613.0	-7969.9905	-7642.83844	-11668.36412	11402.41195	2.838
613.5	-7969.9905	-7642.83844	-11678.92871	11412.05788	2.84
614.0	-7969.9905	-7642.83844	-11689.95263	11422.16315	2.842
614.5	-7969.9905	-7642.83844	-11700.97656	11431.80908	2.846
615.0	-7969.9905	-7642.83844	-11711.54115	11441.91435	2.848
615.5	-7969.9905	-7642.83844	-11722.56507	11452.01961	2.85
616.0	-7969.9905	-7642.83844	-11733.12967	11461.66554	2.854
616.5	-7969.9905	-7642.83844	-11744.15359	11471.77081	2.856
617.0	-7969.9905	-7642.83844	-11754.71819	11481.87607	2.858

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	**Senzor *B*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*	
617.5	-7969.9905	-7642.83844	-11765.74211	11491.98133	2.86
618.0	-7969.9905	-7642.83844	-11776.3067	11501.62727	2.864
618.5	-7969.9905	-7642.83844	-11786.8713	11511.73253	2.866
619.0	-7969.9905	-7642.83844	-11797.89522	11521.83779	2.868
619.5	-7969.9905	-7642.83844	-11808.45982	11531.94306	2.87
620.0	-7969.9905	-7642.83844	-11819.02441	11542.04832	2.874
620.5	-7969.9905	-7642.83844	-11830.04833	11551.69425	2.876
621.0	-7969.9905	-7642.83844	-11840.61293	11561.79952	2.878
621.5	-7969.9905	-7642.83844	-11851.17752	11571.90478	2.88
622.0	-7969.9905	-7642.83844	-11861.74211	11582.46938	2.884
622.5	-7969.9905	-7642.83844	-11872.30671	11592.57464	2.886
623.0	-7969.9905	-7642.83844	-11882.8713	11602.6799	2.888
623.5	-7969.9905	-7642.83844	-11893.4359	11612.78517	2.89
624.0	-7969.9905	-7642.83844	-11904.00049	11622.89043	2.894
624.5	-7969.9905	-7642.83844	-11914.10575	11632.53636	2.896
625.0	-7969.9905	-7642.83844	-11924.67035	11642.1823	2.898
625.5	-7969.9905	-7642.83844	-11935.23494	11651.82823	2.902
626.0	-7969.9905	-7642.83844	-11945.3402	11661.47416	2.904
626.5	-7969.9905	-7642.83844	-11955.9048	11671.1201	2.906
627.0	-7969.9905	-7642.83844	-11966.01006	11680.76603	2.908
627.5	-7969.9905	-7642.83844	-11975.65599	11690.87129	2.91
628.0	-7969.9905	-7642.83844	-11985.76126	11700.97656	2.914
628.5	-7969.9905	-7642.83844	-11995.86652	11711.08182	2.916
629.0	-7969.9905	-7642.83844	-12005.97178	11720.26842	2.918
629.5	-7969.9905	-7642.83844	-12016.07705	11729.45503	2.92
630.0	-7969.9905	-7642.83844	-12026.64164	11738.1823	2.924
630.5	-7969.9905	-7642.83844	-12036.74691	11746.90957	2.926
631.0	-7969.9905	-7642.83844	-12047.3115	11755.63685	2.928
631.5	-7969.9905	-7642.83844	-12057.41676	11764.82345	2.93
632.0	-7969.9905	-7642.83844	-12067.98136	11774.01005	2.934
632.5	-7969.9905	-7642.83844	-12078.08662	11783.19666	2.936
633.0	-7969.9905	-7642.83844	-12088.65121	11792.84259	2.938
633.5	-7969.9905	-7642.83844	-12098.75648	11802.02919	2.94
634.0	-7969.9905	-7642.83844	-12109.32107	11811.67513	2.944
634.5	-7969.9905	-7642.83844	-12119.42634	11821.32106	2.946
635.0	-7969.9905	-7642.83844	-12129.99093	11830.96699	2.948
635.5	-7969.9905	-7642.83844	-12140.55552	11840.61293	2.952
636.0	-7969.9905	-7642.83844	-12151.12012	11850.25886	2.954
636.5	-7969.9905	-7642.83844	-12161.68471	11860.36412	2.956
637.0	-7969.9905	-7642.83844	-12172.2493	11870.01006	2.958
637.5	-7969.9905	-7642.83844	-12182.8139	11879.65599	2.962
638.0	-7969.9905	-7642.83844	-12193.37849	11889.30192	2.964
638.5	-7969.9905	-7642.83844	-12203.94308	11898.94786	2.966
639.0	-7969.9905	-7642.83844	-12214.50768	11908.59379	2.968
639.5	-7969.9905	-7642.83844	-12225.07227	11918.69905	2.972
640.0	-7969.9905	-7642.83844	-12235.63687	11928.34499	2.974
640.5	-7969.9905	-7642.83844	-12246.66079	11938.45025	2.976
641.0	-7969.9905	-7642.83844	-12257.22538	11948.09618	2.978
641.5	-7969.9905	-7642.83844	-12267.78998	11958.20145	2.982
642.0	-7969.9905	-7642.83844	-12278.35457	11967.84738	2.984
642.5	-7969.9905	-7642.83844	-12288.91916	11978.87131	2.986
643.0	-7969.9905	-7642.83844	-12299.94309	11990.35456	2.988
643.5	-7969.9905	-7642.83844	-12310.50768	12002.29714	2.992

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	**Senzor *B*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*	
644.0	-7969.9905	-7642.83844	-12321.07228	12013.7804	2.994
644.5	-7969.9905	-7642.83844	-12331.63687	12024.80432	2.996
645.0	-7969.9905	-7642.83844	-12342.66079	12035.82825	2.998
645.5	-7969.9905	-7642.83844	-12353.22539	12046.39284	3.002
646.0	-7969.9905	-7642.83844	-12364.24931	12056.4981	3.004
646.5	-7969.9905	-7642.83844	-12374.81391	12067.0627	3.006
647.0	-7969.9905	-7642.83844	-12385.83783	12076.70863	3.008
647.5	-7969.9905	-7642.83844	-12396.40242	12086.81389	3.012
648.0	-7969.9905	-7642.83844	-12407.42635	12096.91916	3.014
648.5	-7969.9905	-7642.83844	-12418.45027	12107.02442	3.016
649.0	-7969.9905	-7642.83844	-12429.01486	12116.67035	3.018
649.5	-7969.9905	-7642.83844	-12440.03879	12126.77562	3.022
650.0	-7969.9905	-7642.83844	-12451.06271	12136.42155	3.024
650.5	-7969.9905	-7642.83844	-12461.62731	12146.52681	3.026
651.0	-7969.9905	-7642.83844	-12472.1919	12156.17275	3.028
651.5	-7969.9905	-7642.83844	-12482.75649	12165.81868	3.032
652.0	-7969.9905	-7642.83844	-12493.32109	12175.46461	3.034
652.5	-7969.9905	-7642.83844	-12503.88568	12185.11055	3.036
653.0	-7969.9905	-7642.83844	-12514.45027	12194.75648	3.038
653.5	-7969.9905	-7642.83844	-12525.4742	12204.40242	3.042
654.0	-7969.9905	-7642.83844	-12536.03879	12214.04835	3.044
654.5	-7969.9905	-7642.83844	-12547.06272	12223.69428	3.046
655.0	-7969.9905	-7642.83844	-12557.62731	12233.34022	3.048
655.5	-7969.9905	-7642.83844	-12568.65123	12243.44548	3.052
656.0	-7969.9905	-7642.83844	-12579.21583	12253.09141	3.054
656.5	-7969.9905	-7642.83844	-12590.23975	12262.73735	3.056
657.0	-7969.9905	-7642.83844	-12601.26368	12272.38328	3.06
657.5	-7969.9905	-7642.83844	-12611.82827	12282.48854	3.062
658.0	-7969.9905	-7642.83844	-12622.85219	12292.13448	3.064
658.5	-7969.9905	-7642.83844	-12633.87612	12301.78041	3.066
659.0	-7969.9905	-7642.83844	-12644.44071	12311.88567	3.07
659.5	-7969.9905	-7642.83844	-12655.46463	12321.53161	3.072
660.0	-7969.9905	-7642.83844	-12666.48856	12331.63687	3.074
660.5	-7969.9905	-7642.83844	-12677.05315	12341.2828	3.076
661.0	-7969.9905	-7642.83844	-12688.07708	12350.92874	3.08
661.5	-7969.9905	-7642.83844	-12699.101	12361.034	3.082
662.0	-7969.9905	-7642.83844	-12710.12492	12370.67993	3.084
662.5	-7969.9905	-7642.83844	-12720.68952	12380.7852	3.086
663.0	-7969.9905	-7642.83844	-12731.71344	12390.43113	3.09
663.5	-7969.9905	-7642.83844	-12742.73737	12400.53639	3.092
664.0	-7969.9905	-7642.83844	-12753.30196	12410.18233	3.094
664.5	-7969.9905	-7642.83844	-12764.32588	12419.82826	3.096
665.0	-7969.9905	-7642.83844	-12775.34981	12429.93352	3.1
665.5	-7969.9905	-7642.83844	-12785.9144	12439.57946	3.102
666.0	-7969.9905	-7642.83844	-12796.93832	12449.22539	3.104
666.5	-7969.9905	-7642.83844	-12807.50292	12459.33066	3.106
667.0	-7969.9905	-7642.83844	-12818.06751	12469.43592	3.11
667.5	-7969.9905	-7642.83844	-12829.09144	12479.54118	3.112
668.0	-7969.9905	-7642.83844	-12839.65603	12489.18712	3.114
668.5	-7969.9905	-7642.83844	-12850.22062	12499.29238	3.116
669.0	-7969.9905	-7642.83844	-12861.24455	12509.85697	3.12
669.5	-7969.9905	-7642.83844	-12871.80914	12519.96224	3.122
670.0	-7969.9905	-7642.83844	-12882.37373	12530.0675	3.124
670.5	-7969.9905	-7642.83844	-12893.39766	12540.17276	3.126
671.0	-7969.9905	-7642.83844	-12904.42158	12549.8187	3.13

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor *U* *μm/m*	Senzor *B* *μm/m*	Senzor *SU* *μm/m*	Senzor *SB* *μm/m*	
671.5	-7969.9905	-7642.83844	-12914.98618	12559.92396	3.132
672.0	-7969.9905	-7642.83844	-12926.0101	12570.02922	3.134
672.5	-7969.9905	-7642.83844	-12937.03402	12579.67516	3.136
673.0	-7969.9905	-7642.83844	-12948.05795	12589.78042	3.14
673.5	-7969.9905	-7642.83844	-12959.08187	12599.42635	3.142
674.0	-7969.9905	-7642.83844	-12970.1058	12609.07229	3.144
674.5	-7969.9905	-7642.83844	-12981.12972	12618.71822	3.146
675.0	-7969.9905	-7642.83844	-12991.69431	12627.44549	3.15
675.5	-7969.9905	-7642.83844	-13003.17757	14598.89055	3.152
676.0	-7969.9905	-7642.83844	-13014.20149	14598.89055	3.154
676.5	-7969.9905	-7642.83844	-13025.68475	14598.89055	3.156
677.0	-7969.9905	-7642.83844	-13036.70867	14598.89055	3.16
677.5	-7969.9905	-7642.83844	-13048.19192	14598.89055	3.162
678.0	-7969.9905	-7642.83844	-13059.21585	14598.89055	3.164
678.5	-7969.9905	-7642.83844	-13070.23977	14598.89055	3.166
679.0	-7969.9905	-7642.83844	-13081.2637	14598.89055	3.17
679.5	-7969.9905	-7642.83844	-13092.28762	14598.89055	3.172
680.0	-7969.9905	-7642.83844	-13103.31154	14598.89055	3.174
680.5	-7969.9905	-7642.83844	-13114.33547	14598.89055	3.176
681.0	-7969.9905	-7642.83844	-13124.90006	14598.89055	3.18
681.5	-7969.9905	-7642.83844	-13135.92398	14598.89055	3.182
682.0	-7969.9905	-7642.83844	-13146.48858	14598.89055	3.184
682.5	-7969.9905	-7642.83844	-13157.5125	14598.89055	3.186
683.0	-7969.9905	-7642.83844	-13168.0771	14598.89055	3.19
683.5	-7969.9905	-7642.83844	-13179.10102	14598.89055	3.192
684.0	-7969.9905	-7642.83844	-13189.66561	14598.89055	3.194
684.5	-7969.9905	-7642.83844	-13200.23021	14598.89055	3.196
685.0	-7969.9905	-7642.83844	-13210.33547	14598.89055	3.2
685.5	-7969.9905	-7642.83844	-13220.44073	14598.89055	3.202
686.0	-7969.9905	-7642.83844	-13230.08667	14598.89055	3.204
686.5	-7969.9905	-7642.83844	-13239.7326	14598.89055	3.206
687.0	-7969.9905	-7642.83844	-13248.9192	14598.89055	3.21
687.5	-7969.9905	-7642.83844	-13258.56514	14598.89055	3.212
688.0	-7969.9905	-7642.83844	-13267.75174	14598.89055	3.214
688.5	-7969.9905	-7642.83844	-13276.93834	14598.89055	3.218
689.0	-7969.9905	-7642.83844	-13286.12495	14598.89055	3.22
689.5	-7969.9905	-7642.83844	-13295.31155	14598.89055	3.222
690.0	-7969.9905	-7642.83844	-13304.03882	14598.89055	3.224
690.5	-7969.9905	-7642.83844	-13313.22543	14598.89055	3.228
691.0	-7969.9905	-7642.83844	-13322.41203	14598.89055	3.23
691.5	-7969.9905	-7642.83844	-13331.1393	14598.89055	3.232
692.0	-7969.9905	-7642.83844	-13340.32591	-15503.3116	3.234
692.5	-7969.9905	-7642.83844	-13349.97184	-15503.3116	3.238
693.0	-7969.9905	-7642.83844	-13359.15844	-15503.3116	3.24
693.5	-7969.9905	-7642.83844	-13368.34505	-15503.3116	3.242
694.0	-7969.9905	-7642.83844	-13377.99098	-15503.3116	3.244
694.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.248
695.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.25
695.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.252
696.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.254
696.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.256
697.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.26
697.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.262

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
698.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.264
698.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.266
699.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.27
699.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.272
700.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.274
700.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.276
701.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.28
701.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.282
702.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.284
702.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.286
703.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.29
703.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.292
704.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.294
704.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.296
705.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.298
705.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.302
706.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.304
706.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.306
707.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.308
707.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.312
708.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.314
708.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.316
709.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.318
709.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.322
710.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.324
710.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.326
711.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.328
711.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.33
712.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.334
712.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.336
713.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.338
713.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.34
714.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.342
714.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.346
715.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.348
715.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.35
716.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.352
716.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.356
717.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.358
717.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.36
718.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.362
718.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.366
719.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.368
719.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.37
720.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.372
720.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.374
721.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.378
721.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.38
722.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.382
722.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.384
723.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.386
723.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.388
724.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.392
724.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.394
725.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.396

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
725.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.398
726.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.4
726.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.404
727.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.406
727.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.408
728.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.41
728.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.412
729.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.416
729.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.418
730.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.42
730.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.422
731.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.424
731.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.426
732.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.43
732.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.432
733.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.434
733.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.436
734.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.438
734.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.442
735.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.444
735.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.446
736.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.448
736.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.452
737.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.454
737.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.456
738.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.458
738.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.46
739.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.464
739.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.466
740.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.468
740.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.47
741.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.474
741.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.476
742.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.478
742.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.48
743.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.484
743.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.486
744.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.488
744.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.49
745.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.492
745.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.496
746.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.498
746.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.5
747.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.502
747.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.506
748.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.508
748.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.51
749.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.512
749.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.516
750.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.518
750.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.52
751.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.522
751.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.524

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
752.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.528
752.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.53
753.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.532
753.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.534
754.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.538
754.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.54
755.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.542
755.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.544
756.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.546
756.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.548
757.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.55
757.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.552
758.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.554
758.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.556
759.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.558
759.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.56
760.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.562
760.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.564
761.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.566
761.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.568
762.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.57
762.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.572
763.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.574
763.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.576
764.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.58
764.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.582
765.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.584
765.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.586
766.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.588
766.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.59
767.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.592
767.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.594
768.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.596
768.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.6
769.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.602
769.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.604
770.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.606
770.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.608
771.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.61
771.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.614
772.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.616
772.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.618
773.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.62
773.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.622
774.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.624
774.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.626
775.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.628
775.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.63
776.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.632
776.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.634
777.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.636
777.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.638
778.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.64
778.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.642
779.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.644

Timp *s*	Deplasări				Forța *kN*
	Senzor ***U*** *μm/m*	Senzor ***B*** *μm/m*	Senzor ***SU*** *μm/m*	Senzor ***SB*** *μm/m*	
779.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.646
780.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.648
780.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.65
781.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.652
781.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.656
782.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.658
782.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.66
783.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.662
783.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.664
784.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.664
784.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.666
785.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.666
785.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.666
786.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.668
786.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.67
787.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.67
787.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.672
788.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.674
788.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.676
789.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.678
789.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.68
790.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.682
790.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.684
791.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.686
791.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.688
792.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.69
792.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.692
793.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.694
793.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.696
794.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.698
794.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.7
795.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.704
795.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.706
796.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.708
796.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.71
797.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.712
797.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.714
798.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.716
798.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.718
799.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.72
799.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.722
800.0	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.724
800.5	-7969.9905	-7642.83844	-14864.84272	-15503.3116	3.726

ANEXA 5

Rezultate obținute la încerc area de încovoiere în 4 puncte pentru epruveta D2 de la senzorii acustici

Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:		
s	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**
0	0	0	0	62.72	0	0	0	125.44	0	0	0
1.28	0	0	0	64	0	0	0	126.72	0	0	0
2.56	0	0	0	65.28	0	0	0	128	0	0	0
3.84	0	0	0	66.56	0	0	0	129.28	0	0	0
5.12	0	0	0	67.84	0	0	0	130.56	0	0	0
6.4	0	0	0	69.12	0	0	0	131.84	0	0	0
7.68	0	0	0	70.4	0	0	0	133.12	0	0	0
8.96	0	0	0	71.68	0	0	1	134.4	0	0	0
10.24	0	0	0	72.96	0	0	0	135.68	0	0	0
11.52	0	0	0	74.24	0	0	0	136.96	0	0	0
12.8	0	0	0	75.52	0	0	0	138.24	0	0	0
14.08	0	0	0	76.8	0	0	0	139.52	0	0	0
15.36	0	0	0	78.08	0	0	0	140.8	0	0	0
16.64	0	0	0	79.36	0	0	0	142.08	0	0	0
17.92	0	0	0	80.64	0	0	0	143.36	0	0	0
19.2	0	0	0	81.92	0	0	0	144.64	0	0	0
20.48	0	0	0	83.2	0	0	0	145.92	0	0	0
21.76	0	0	0	84.48	2	1	2	147.2	0	0	0
23.04	0	0	0	85.76	0	0	0	148.48	0	0	0
24.32	0	0	0	87.04	0	0	0	149.76	0	0	0
25.6	0	0	0	88.32	1	1	0	151.04	0	0	0
26.88	0	0	0	89.6	0	0	0	152.32	0	0	0
28.16	0	0	0	90.88	0	0	0	153.6	0	0	0
29.44	0	0	0	92.16	0	0	0	154.88	0	0	0
30.72	0	0	0	93.44	0	0	0	156.16	0	0	0
32	0	0	0	94.72	0	0	0	157.44	0	0	0
33.28	0	0	0	96	0	0	0	158.72	0	0	0
34.56	0	0	0	97.28	0	0	0	160	0	0	0
35.84	0	0	0	98.56	0	0	0	161.28	0	0	1
37.12	0	0	0	99.84	0	0	0	162.56	0	1	0
38.4	0	0	0	101.12	0	0	0	163.84	0	0	0
39.68	0	0	0	102.4	0	0	0	165.12	1	0	0
40.96	0	0	0	103.68	0	0	0	166.4	1	1	0
42.24	0	0	0	104.96	0	0	1	167.68	0	0	0
43.52	0	0	0	106.24	0	0	0	168.96	0	0	0
44.8	0	0	0	107.52	0	0	0	170.24	0	0	0
46.08	0	0	0	108.8	0	0	0	171.52	0	0	0
47.36	0	0	0	110.08	1	1	1	172.8	0	0	0
48.64	0	0	0	111.36	0	0	0	174.08	0	0	0
49.92	0	0	0	112.64	0	0	0	175.36	0	0	0
51.2	0	0	0	113.92	0	0	0	176.64	0	0	0
52.48	0	0	0	115.2	0	0	0	177.92	0	0	0
53.76	0	0	0	116.48	0	0	0	179.2	0	0	0
55.04	0	0	0	117.76	0	0	0	180.48	1	0	1
56.32	0	0	0	119.04	0	0	0	181.76	0	0	0
57.6	0	0	0	120.32	1	1	1	183.04	0	0	0
58.88	0	0	0	121.6	0	0	0	184.32	0	0	0
60.16	0	0	0	122.88	0	0	0	185.6	0	0	1
61.44	0	0	0	124.16	0	0	0	186.88	0	0	0

Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:		
s	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**
188.16	0	0	0	257.28	0	0	0	326.4	10	6	6
189.44	0	0	0	258.56	0	0	0	327.68	2	0	0
190.72	0	0	0	259.84	3	0	0	328.96	2	0	1
192	0	0	0	261.12	1	0	0	330.24	1	1	0
193.28	0	0	0	262.4	0	0	0	331.52	0	0	0
194.56	0	0	0	263.68	0	0	0	332.8	1	0	0
195.84	0	0	0	264.96	1	0	0	334.08	0	0	0
197.12	0	0	0	266.24	0	0	0	335.36	4	1	3
198.4	0	0	0	267.52	8	6	7	336.64	3	0	1
199.68	0	0	0	268.8	1	0	0	337.92	1	1	1
200.96	0	0	0	270.08	0	0	0	339.2	1	0	0
202.24	0	0	0	271.36	0	0	0	340.48	7	5	6
203.52	0	1	0	272.64	1	0	0	341.76	0	0	2
204.8	0	0	0	273.92	0	0	1	343.04	6	1	4
206.08	0	0	0	275.2	1	1	0	344.32	1	0	1
207.36	0	0	0	276.48	1	0	0	345.6	2	0	1
208.64	0	0	0	277.76	2	1	0	346.88	0	0	0
209.92	0	0	0	279.04	0	1	1	348.16	2	0	1
211.2	0	0	0	280.32	1	1	1	349.44	1	0	0
212.48	0	0	0	281.6	2	0	0	350.72	2	0	1
213.76	0	0	0	282.88	3	0	0	352	1	1	1
215.04	0	0	0	284.16	5	1	0	353.28	6	1	0
216.32	0	0	0	285.44	3	1	0	354.56	6	1	1
217.6	2	0	1	286.72	6	3	3	355.84	5	2	1
218.88	0	0	0	288	1	0	0	357.12	0	1	0
220.16	0	0	0	289.28	1	0	0	358.4	7	3	2
221.44	0	0	0	290.56	1	0	0	359.68	1	0	0
222.72	0	0	0	291.84	5	1	0	360.96	0	0	0
224	0	0	0	293.12	8	1	0	362.24	3	1	2
225.28	0	0	0	294.4	2	2	1	363.52	4	0	0
226.56	0	0	0	295.68	4	2	1	364.8	6	1	0
227.84	1	0	0	296.96	1	0	0	366.08	5	1	1
229.12	0	0	0	298.24	1	0	1	367.36	4	0	0
230.4	0	0	1	299.52	0	0	0	368.64	6	0	1
231.68	0	0	0	300.8	8	3	3	369.92	2	0	0
232.96	0	0	0	302.08	2	1	3	371.2	0	0	0
234.24	0	0	0	303.36	1	0	0	372.48	6	3	4
235.52	0	0	0	304.64	1	0	0	373.76	2	1	1
236.8	0	0	0	305.92	22	13	14	375.04	3	0	1
238.08	0	0	0	307.2	3	2	2	376.32	4	2	3
239.36	0	0	0	308.48	5	2	2	377.6	2	0	0
240.64	1	0	0	309.76	4	2	1	378.88	1	1	0
241.92	0	0	0	311.04	0	0	0	380.16	12	7	9
243.2	0	0	1	312.32	3	1	0	381.44	10	8	9
244.48	0	0	0	313.6	6	1	1	382.72	8	1	1
245.76	1	0	0	314.88	4	1	2	384	6	1	4
247.04	2	0	0	316.16	2	0	0	385.28	4	1	1
248.32	0	0	0	317.44	2	1	1	386.56	6	1	0
249.6	1	1	1	318.72	0	0	0	387.84	1	0	0
250.88	0	0	0	320	3	1	0	389.12	5	3	4
252.16	1	0	0	321.28	4	2	3	390.4	2	0	2
253.44	1	1	1	322.56	0	0	0	391.68	3	0	1
254.72	2	1	0	323.84	1	0	0	392.96	1	0	0
256	0	0	0	325.12	1	0	0	394.24	2	1	2

Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:		
s	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**
395.52	2	1	3	467.2	5	0	2	538.88	19	3	9
396.8	1	0	2	468.48	9	0	4	540.16	17	6	10
398.08	0	0	0	469.76	20	4	15	541.44	8	2	6
399.36	2	0	1	471.04	7	0	3	542.72	14	1	3
400.64	7	0	1	472.32	6	2	5	544	14	5	10
401.92	3	2	1	473.6	6	2	3	545.28	22	3	12
403.2	2	0	1	474.88	8	2	4	546.56	12	1	5
404.48	6	3	6	476.16	16	3	8	547.84	13	1	3
405.76	2	0	1	477.44	11	1	8	549.12	9	2	5
407.04	1	0	1	478.72	4	0	3	550.4	18	4	8
408.32	5	0	3	480	4	2	4	551.68	4	1	6
409.6	4	0	0	481.28	25	8	19	552.96	9	0	3
410.88	10	0	3	482.56	25	6	24	554.24	22	9	17
412.16	4	1	1	483.84	7	2	9	555.52	19	7	13
413.44	4	2	3	485.12	13	0	10	556.8	21	4	11
414.72	5	3	3	486.4	14	6	13	558.08	6	6	5
416	1	0	1	487.68	10	0	10	559.36	16	9	9
417.28	2	1	1	488.96	9	2	8	560.64	12	2	6
418.56	3	0	3	490.24	24	9	16	561.92	17	2	11
419.84	3	0	0	491.52	13	5	10	563.2	14	3	9
421.12	4	0	3	492.8	12	3	3	564.48	17	4	16
422.4	4	0	1	494.08	15	3	10	565.76	16	4	19
423.68	8	1	0	495.36	12	2	7	567.04	20	7	15
424.96	8	0	1	496.64	14	1	5	568.32	18	3	4
426.24	7	2	3	497.92	14	1	3	569.6	12	4	5
427.52	7	1	2	499.2	17	4	13	570.88	18	3	5
428.8	2	0	0	500.48	4	1	1	572.16	22	2	11
430.08	4	2	1	501.76	14	6	12	573.44	20	3	11
431.36	5	0	0	503.04	14	5	8	574.72	22	6	15
432.64	4	0	3	504.32	5	2	2	576	14	2	9
433.92	7	3	5	505.6	8	3	4	577.28	18	4	9
435.2	2	0	3	506.88	10	2	3	578.56	20	5	6
436.48	4	1	2	508.16	19	6	7	579.84	20	9	10
437.76	4	3	2	509.44	24	5	11	581.12	25	8	9
439.04	2	0	0	510.72	14	1	3	582.4	26	10	11
440.32	6	0	3	512	12	6	5	583.68	17	3	8
441.6	8	4	8	513.28	16	1	8	584.96	19	8	12
442.88	3	0	2	514.56	9	2	3	586.24	27	9	13
444.16	6	0	2	515.84	14	3	6	587.52	21	5	11
445.44	4	2	2	517.12	16	6	9	588.8	20	1	7
446.72	5	0	7	518.4	7	0	2	590.08	30	7	13
448	9	0	4	519.68	16	2	8	591.36	27	5	11
449.28	5	0	2	520.96	6	1	4	592.64	46	17	21
450.56	5	0	1	522.24	12	6	8	593.92	38	10	16
451.84	9	1	3	523.52	10	0	5	595.2	24	4	11
453.12	8	1	5	524.8	13	1	5	596.48	32	7	15
454.4	4	0	3	526.08	23	8	11	597.76	31	6	15
455.68	3	1	0	527.36	16	6	15	599.04	28	5	12
456.96	16	3	15	528.64	14	4	6	600.32	74	31	60
458.24	10	0	5	529.92	22	2	6	601.6	54	5	28
459.52	7	1	4	531.2	19	1	4	602.88	28	2	6
460.8	9	1	1	532.48	5	0	2	604.16	42	10	24
462.08	11	5	7	533.76	8	3	5	605.44	23	4	9
463.36	4	1	2	535.04	15	10	6	606.72	26	5	12
464.64	5	0	4	536.32	9	2	3	608	26	8	7
465.92	6	0	1	537.6	14	4	4	609.28	107	32	56

Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:			Timp	Semnal de la senzorul:		
s	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**	*s*	**S1**	**S2**	**S3**
610.56	54	5	24	679.68	48	8	20	748.8	113	35	73
611.84	69	22	64	680.96	59	12	28	750.08	105	31	61
613.12	36	7	11	682.24	66	18	29	751.36	107	38	74
614.4	41	11	15	683.52	55	11	22	752.64	91	33	70
615.68	23	2	10	684.8	59	13	30	753.92	265	141	117
616.96	25	4	11	686.08	56	19	31	755.2	151	63	87
618.24	28	11	13	687.36	108	28	62	756.48	118	43	67
619.52	27	7	9	688.64	176	48	100	757.76	148	76	103
620.8	24	3	13	689.92	59	11	25	759.04	300	130	214
622.08	46	17	28	691.2	64	17	36	760.32	263	95	170
623.36	26	3	10	692.48	75	23	55	761.6	160	41	104
624.64	71	15	49	693.76	56	22	42	762.88	184	61	140
625.92	48	11	22	695.04	67	19	38	764.16	206	80	154
627.2	48	12	18	696.32	139	34	68	765.44	131	44	90
628.48	26	2	6	697.6	224	69	150	766.72	141	39	85
629.76	37	6	21	698.88	105	27	74	768	245	99	148
631.04	29	3	9	700.16	94	37	60	769.28	151	54	89
632.32	30	3	12	701.44	91	19	47	770.56	131	54	77
633.6	58	22	36	702.72	88	20	40	771.84	103	40	63
634.88	40	8	18	704	109	17	46	773.12	149	43	97
636.16	24	5	15	705.28	101	26	49	774.4	141	47	92
637.44	32	12	17	706.56	134	37	78	775.68	119	44	82
638.72	30	4	14	707.84	63	19	39	776.96	130	58	80
640	31	7	14	709.12	67	18	37	778.24	125	52	74
641.28	77	28	34	710.4	75	20	48	779.52	157	54	73
642.56	41	7	16	711.68	75	19	43	780.8	111	43	57
643.84	52	11	22	712.96	70	23	39	782.08	147	52	88
645.12	32	11	20	714.24	66	28	48	783.36	198	95	133
646.4	53	28	39	715.52	82	39	45	784.64	194	57	113
647.68	54	13	20	716.8	107	31	95	785.92	167	77	100
648.96	62	15	29	718.08	126	36	92	787.2	288	168	139
650.24	54	14	25	719.36	106	34	82	788.48	164	73	108
651.52	49	8	20	720.64	95	25	60	789.76	151	87	94
652.8	30	6	11	721.92	195	70	153	791.04	114	37	62
654.08	36	4	17	723.2	146	39	118	792.32	128	40	73
655.36	48	12	27	724.48	215	53	170	793.6	119	41	80
656.64	41	10	16	725.76	146	52	111	794.88	148	58	106
657.92	89	49	72	727.04	112	29	71	796.16	161	53	114
659.2	100	32	86	728.32	207	77	176	797.44	145	53	92
660.48	87	24	58	729.6	164	47	138	798.72	182	68	125
661.76	60	12	30	730.88	478	208	439	800	261	139	168
663.04	63	18	45	732.16	204	77	188	801.28	224	78	124
664.32	51	12	26	733.44	173	68	131	802.56	267	97	137
665.6	93	20	67	734.72	117	36	93	803.84	186	71	120
666.88	59	7	17	736	117	39	125	805.12	183	81	109
668.16	92	18	33	737.28	102	35	81	806.4	186	64	94
669.44	186	52	82	738.56	82	22	64	807.68	250	88	155
670.72	94	24	52	739.84	109	42	70	808.96	171	48	75
672	75	25	42	741.12	77	26	58	810.24	161	60	104
673.28	74	16	33	742.4	94	36	61	811.52	213	81	164
674.56	116	35	71	743.68	105	45	85	812.8	175	66	103
675.84	72	18	44	744.96	156	70	118	814.08	174	78	136
677.12	52	8	22	746.24	363	184	311	815.36	319	196	410
678.4	51	12	30	747.52	182	72	132	816.64	125	64	167

ANEXA 6

Rezultate obținute la încerc area de încovoiere în 4 puncte pentru epruveta D2 de la mașina de încercări mecanice

Timp *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*
0.5	1.55141	0.000981276	24.51	105.082	0.40115	48.5	213.019	0.800966
1	3.7275	0.0092895	25	107.159	0.409289	49.01	215.042	0.809482
1.5	6.28986	0.0176427	25.5	109.366	0.417642	49.51	217.356	0.817801
2	8.30915	0.0259648	26	111.641	0.425975	50.01	219.578	0.82614
2.51	10.4814	0.0344669	26.5	113.997	0.43429	50.51	221.83	0.834455
3.01	12.5198	0.0428097	27.01	116.204	0.442806	51	224.075	0.842649
3.51	14.7571	0.0511318	27.51	118.414	0.451124	51.5	226.171	0.850975
4.01	16.9791	0.0594677	28.01	120.64	0.459478	52	228.573	0.85929
4.5	19.0022	0.0676305	28.51	122.766	0.46781	52.5	230.89	0.86764
5	21.1171	0.0759803	29	125.199	0.475966	53.01	233.441	0.876135
5.5	23.125	0.0842851	29.5	127.031	0.484298	53.51	235.369	0.884461
6	25.4081	0.092621	30	129.383	0.492634	54.01	237.526	0.892803
6.51	27.5651	0.10114	30.5	131.624	0.500984	54.51	240.05	0.901129
7.01	29.6303	0.109469	31.01	133.834	0.509452	55	242.409	0.909306
7.51	31.7758	0.117812	31.51	136.297	0.517794	55.5	244.593	0.917628
8.01	33.9557	0.126124	32.01	138.29	0.526148	56	246.941	0.925991
8.5	36.1586	0.134304	32.51	140.6	0.534466	56.5	249.11	0.934289
9	38.1702	0.142643	33	142.89	0.542643	57.01	251.722	0.942798
9.5	40.243	0.150962	33.5	145.097	0.550955	57.51	253.795	0.951148
10	42.3235	0.159312	34	147.243	0.559308	58.01	255.913	0.959466
10.5	44.5646	0.167627	34.5	149.35	0.567637	58.51	258.059	0.967809
11.01	46.7981	0.176132	35.01	151.851	0.576125	59	260.457	0.975955
11.51	48.8097	0.184475	35.51	153.954	0.584478	59.5	262.87	0.984312
12.01	50.8635	0.192797	36.01	156.203	0.592797	60	264.763	0.992637
12.51	52.833	0.201126	36.51	158.509	0.601129	60.5	267.157	1.00095
13	55.0474	0.2093	37	160.448	0.609303	61.01	269.513	1.00948
13.5	57.3458	0.217646	37.5	162.907	0.617635	61.51	272.045	1.0178
14	59.3345	0.225954	38	165.183	0.625964	62.01	274.305	1.02613
14.5	61.4953	0.2343	38.5	167.29	0.634296	62.51	276.512	1.03447
15.01	63.6676	0.242806	39.01	169.623	0.642816	63	278.627	1.04264
15.51	65.924	0.251125	39.51	171.906	0.651121	63.5	281.086	1.05097
16.01	67.9854	0.259474	40.01	174.354	0.659463	64	283.182	1.0593
16.51	70.0391	0.26779	40.51	176.339	0.667817	64.5	285.545	1.06765
17	72.242	0.275973	41	178.599	0.675969	65.01	287.886	1.07613
17.5	74.4028	0.284312	41.5	180.836	0.684305	65.51	290.176	1.08446
18	76.64	0.292628	42	183.173	0.69262	66.01	292.62	1.09281
18.5	78.6937	0.300977	42.5	185.384	0.700977	66.51	294.72	1.10113
19.01	80.8545	0.309462	43.01	187.697	0.709475	67	296.892	1.1093
19.51	83.176	0.317805	43.51	190.137	0.717787	67.5	299.168	1.11762
20.01	85.2565	0.326144	44.01	192.531	0.726144	68	301.596	1.12598
20.51	87.5511	0.33447	44.51	194.895	0.734462	68.5	303.7	1.1343
21	89.7387	0.342622	45.01	196.907	0.742798	69.01	306.013	1.14278
21.5	91.8	0.350962	45.51	199.086	0.751134	69.51	308.369	1.15114
22	94.1367	0.359315	46.01	201.53	0.75946	70.01	310.759	1.15947
22.5	96.3855	0.36762	46.51	203.909	0.767796	70.51	313.039	1.1678
23.01	98.5195	0.376129	47	206.077	0.775966	71	315.341	1.17596
23.51	100.677	0.384475	47.5	208.483	0.784322	71.5	317.555	1.18431
24.01	102.833	0.392794	48	210.518	0.79262	72	319.816	1.19265

Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*
72.5	322.191	1.20097	100.51	455.273	1.6678	127.51	587.647	2.11781
73.01	324.55	1.20949	101	457.636	1.67596	128.01	590.076	2.12612
73.51	326.833	1.21779	101.5	460.065	1.6843	128.51	592.615	2.13446
74.01	329.052	1.22614	102	462.264	1.69265	129.01	595.002	2.14281
74.51	331.369	1.23448	102.5	464.773	1.70096	129.5	597.465	2.15096
75	333.576	1.24264	103.01	467.454	1.70946	130	599.866	2.15932
75.5	335.886	1.25097	103.51	469.874	1.7178	130.5	602.245	2.16762
76	338.169	1.25929	104.01	472.444	1.72614	131	604.823	2.17597
76.5	340.678	1.26765	104.51	474.816	1.73447	131.51	607.072	2.18448
77.01	342.785	1.27614	105	477.076	1.74262	132.01	609.653	2.19279
77.51	345.172	1.28445	105.5	479.554	1.75097	132.51	612.089	2.20115
78.01	347.581	1.29281	106	482.04	1.75931	133.01	614.621	2.20947
78.51	350.159	1.30114	106.5	484.442	1.76763	133.5	617.03	2.21763
79	352.319	1.3093	107.01	486.95	1.77614	134	619.302	2.22597
79.5	354.549	1.31762	107.51	489.322	1.78446	134.5	622.006	2.2343
80	357.016	1.32597	108.01	491.811	1.7928	135	624.469	2.24262
80.5	359.418	1.33431	108.51	494.137	1.80115	135.51	626.939	2.25113
81.01	361.819	1.34279	109	496.699	1.8093	136.01	629.399	2.25949
82.51	368.829	1.36781	109.5	499.039	1.81762	136.51	631.785	2.26779
83	371.048	1.37598	110	501.713	1.82597	137.01	634.451	2.27613
83.5	373.499	1.3843	110.5	504.244	1.83431	137.5	636.608	2.28432
84	375.84	1.39263	111	506.772	1.84262	138	639.258	2.29263
84.5	378.268	1.40096	111.51	509.205	1.85113	138.5	641.683	2.30098
85.01	380.658	1.40948	112.01	511.515	1.85947	139	644.149	2.30929
85.51	382.915	1.4178	112.51	514.199	1.8678	139.51	646.685	2.31781
86.01	385.382	1.42612	113.01	516.582	1.87614	140.01	648.918	2.32615
86.51	387.63	1.43447	113.5	518.804	1.88429	140.51	651.55	2.33446
87	390.2	1.44263	114	521.286	1.89263	141.01	653.99	2.34281
87.5	392.648	1.45097	114.5	523.661	1.90098	141.5	656.127	2.35096
88	395.015	1.45929	115	526.464	1.9093	142	658.9	2.3593
88.5	397.463	1.46763	115.51	528.801	1.91781	142.5	661.447	2.36763
89.01	399.731	1.47614	116.01	531.126	1.92613	143	664.044	2.37596
89.51	402.301	1.48446	116.51	533.65	1.93447	143.51	666.423	2.38445
90.01	404.653	1.49282	117.01	536.152	1.94281	144.01	668.844	2.3928
90.51	406.798	1.50112	117.5	538.446	1.95097	144.51	671.417	2.40114
91	409.514	1.5093	118	540.913	1.95929	145.01	673.892	2.40945
91.5	411.659	1.51764	118.5	543.437	1.96763	145.51	676.213	2.4178
92	414.13	1.52596	119	545.98	1.97598	146.01	678.688	2.42615
92.5	416.573	1.5343	119.51	548.283	1.98446	146.51	681.193	2.43446
93.01	419.01	1.5428	120.01	550.879	1.99279	147.01	683.789	2.44282
93.51	421.362	1.55115	120.51	553.251	2.00114	147.5	686.008	2.45096
94.01	423.434	1.55947	121.01	555.962	2.00946	148	688.578	2.45931
94.51	426.169	1.56779	121.5	558.15	2.01765	148.5	690.998	2.46764
95.01	428.67	1.57614	122	560.555	2.02596	149	693.599	2.47596
95.51	431.156	1.58447	122.5	563.072	2.0343	149.51	695.913	2.48448
96.01	433.516	1.59281	123	565.508	2.04265	150.01	698.445	2.4928
96.51	435.841	1.60113	123.51	568.063	2.05113	150.51	700.969	2.50113
97	438.311	1.60929	124.01	570.411	2.05948	151.01	703.397	2.50947
97.5	440.637	1.61765	124.51	572.858	2.0678	151.5	705.929	2.51763
98	443.279	1.62596	125.01	575.405	2.07614	152	708.258	2.52597
98.5	445.436	1.63431	125.5	577.574	2.08431	152.5	710.943	2.5343
99.01	447.98	1.64279	126	580.304	2.09264	153	713.295	2.54265
99.51	450.504	1.65113	126.5	582.718	2.10096	153.51	715.716	2.55112
100.01	452.779	1.65948	127	585.372	2.1093	154.01	718.343	2.55946

Timp *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*
154.51	720.687	2.56781	182.01	858.137	3.02615	209.5	994.856	3.4843
155.01	723.158	2.57613	182.51	860.416	3.03447	210	997.338	3.49264
155.5	725.682	2.58431	183.01	862.864	3.04278	210.5	999.74	3.50096
156	727.942	2.59262	183.5	865.166	3.05097	211	1002.29	3.5093
156.5	730.673	2.60098	184	867.866	3.0593	211.5	1004.73	3.51765
157	733.128	2.60931	184.5	870.26	3.06764	212.01	1007.41	3.52613
157.51	735.541	2.61779	185	872.597	3.07596	212.51	1009.74	3.53449
158.01	738.035	2.62615	185.51	875.366	3.08447	213.01	1012.22	3.5428
158.51	740.639	2.63446	186.01	877.71	3.0928	213.51	1014.95	3.55113
159.01	743.255	2.64281	186.51	880.288	3.10114	214	1017.26	3.55931
159.5	745.55	2.65097	187.01	882.541	3.10949	214.5	1019.91	3.56764
160	748.086	2.6593	187.5	884.965	3.11762	215	1022.2	3.57597
160.5	750.575	2.66764	188	887.619	3.12596	215.5	1024.78	3.5843
161	753.199	2.67596	188.5	890.059	3.13431	216.01	1027.38	3.59281
161.51	755.65	2.68449	189	892.346	3.14263	216.51	1029.92	3.60113
162.01	757.868	2.69279	189.51	894.874	3.15113	217.01	1032.45	3.60946
162.51	760.641	2.70113	190.01	897.72	3.15946	217.51	1035	3.6178
163.01	762.978	2.70948	190.51	900.079	3.16782	218	1037.27	3.62597
163.5	765.372	2.71764	191.01	902.42	3.17614	218.5	1039.71	3.63432
164	767.823	2.72597	191.5	904.967	3.18429	219	1042.1	3.64262
164.5	770.367	2.73429	192	907.61	3.19264	219.5	1044.88	3.65096
165	773.002	2.74265	192.5	909.935	3.20097	220.01	1047.29	3.65948
165.51	775.285	2.75114	193	912.417	3.20931	220.51	1049.63	3.66779
166.01	778.122	2.75945	193.51	914.933	3.21779	221.01	1052.29	3.67614
166.51	780.666	2.76781	194.01	917.786	3.22614	221.51	1054.88	3.68446
167.01	783.052	2.77614	194.51	919.867	3.23447	222	1057.39	3.69264
167.5	785.488	2.7843	195.01	922.334	3.24279	222.5	1059.83	3.70098
168	788.02	2.79263	195.51	924.862	3.25115	223	1062.54	3.70931
168.5	790.651	2.80096	196.01	927.413	3.25946	223.5	1064.97	3.71763
169	792.912	2.80931	196.51	929.883	3.2678	224.01	1067.56	3.72613
169.51	795.6	2.8178	197.01	932.086	3.27615	224.51	1070.18	3.73448
170.01	798.101	2.82615	197.5	934.683	3.2843	225.01	1072.56	3.74279
170.51	800.66	2.83446	198	937.337	3.29264	225.51	1075.24	3.75113
171.01	802.977	2.8428	198.5	939.872	3.30096	226	1077.52	3.75931
171.5	805.268	2.85098	199	942.27	3.30931	226.5	1079.96	3.76763
172	807.819	2.8593	199.51	944.699	3.3178	227	1082.55	3.77598
172.5	810.332	2.86764	200.01	947.468	3.32612	227.5	1085.01	3.78429
173	812.875	2.87596	200.51	949.69	3.33447	228.01	1087.45	3.7928
173.51	815.476	2.88448	201.01	952.436	3.34281	228.51	1089.86	3.80115
174.01	818.103	2.8928	201.5	954.684	3.35098	229.01	1092.75	3.80946
174.51	820.933	2.90112	202	957.289	3.35929	229.51	1095.22	3.81781
175.01	822.998	2.90948	202.5	959.668	3.36763	230	1097.47	3.82596
175.5	825.759	2.91764	203	962.054	3.37598	230.5	1100.1	3.8343
176	828.031	2.92597	203.51	964.727	3.38446	231	1102.56	3.84264
176.5	830.662	2.9343	204.01	967.152	3.39281	231.5	1105.19	3.85097
177	833.19	2.94264	204.51	969.516	3.40113	232.01	1107.54	3.85946
177.51	835.592	2.95114	205.01	972.128	3.40947	232.51	1110.27	3.86779
178.01	838.097	2.95946	205.5	974.709	3.41764	233.01	1112.76	3.87614
178.51	840.69	2.96782	206	977.52	3.42597	233.51	1115.28	3.88445
179.01	842.916	2.97612	206.5	979.715	3.4343	234	1117.63	3.89263
179.5	845.497	2.9843	207	982.354	3.44263	234.5	1120.13	3.90098
180	847.933	2.99265	207.51	984.825	3.45114	235	1122.74	3.90929
180.5	850.637	3.00097	208.01	987.425	3.45946	235.5	1125.28	3.91765
181	852.787	3.0093	208.51	989.812	3.46779	236.01	1127.73	3.92612
181.51	855.33	3.01779	209.01	992.359	3.47613	236.51	1130.62	3.93446

Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*
237.01	1133.26	3.94281	264	1270.03	4.39263	291.01	1407.63	4.8428
237.51	1135.79	3.95113	264.5	1272.46	4.40096	291.51	1409.98	4.85114
238	1138.09	3.95931	265	1274.84	4.4093	292	1412.52	4.8593
238.5	1140.68	3.96763	265.5	1277.6	4.41763	292.5	1415.04	4.86765
239	1143.43	3.97597	266.01	1280.2	4.42613	293	1417.58	4.87595
239.5	1145.69	3.98431	266.51	1282.62	4.43447	293.5	1420.14	4.8843
240.01	1148.45	3.9928	267.01	1285.26	4.44282	294.01	1422.6	4.89281
240.51	1150.87	4.00112	267.51	1287.88	4.45112	294.51	1425.38	4.90114
241.01	1153.63	4.00946	268	1290.5	4.4593	295.01	1427.93	4.90947
241.51	1156	4.01781	268.5	1292.87	4.46765	295.51	1430.34	4.91778
242	1158.32	4.02595	269	1295.44	4.47596	296.01	1433.04	4.92614
242.5	1161.02	4.0343	269.5	1297.99	4.4843	296.51	1435.49	4.93447
243	1163.57	4.04264	270.01	1300.58	4.49279	297.01	1438.16	4.94278
243.5	1166.04	4.05096	270.51	1303	4.50114	297.51	1440.7	4.95113
244.01	1168.54	4.05948	271.01	1305.52	4.50947	298	1443.42	4.95929
244.51	1171.16	4.06779	271.51	1308.05	4.51779	298.5	1446.2	4.96764
245.01	1173.78	4.07613	272	1310.7	4.52597	299	1448.59	4.97596
245.51	1176.11	4.08448	272.5	1313.18	4.5343	299.5	1451.08	4.9843
246.01	1178.8	4.0928	273	1315.69	4.54262	300.01	1453.53	4.99281
246.51	1181.14	4.10115	273.5	1318.2	4.55097	300.51	1456.44	5.00112
247.11	1184.3	4.11112	274.01	1320.85	4.55946	301.01	1458.81	5.00948
247.51	1186.26	4.1178	274.51	1323.3	4.5678	301.51	1461.5	5.01779
248	1188.79	4.12597	275.01	1325.91	4.57613	302	1463.83	5.02596
248.5	1191.51	4.1343	275.51	1328.56	4.58448	302.5	1466.66	5.03431
249	1193.88	4.14262	276	1330.98	4.59263	303	1468.98	5.04263
249.5	1196.32	4.15096	276.5	1333.54	4.60096	303.5	1471.54	5.05096
250.01	1198.84	4.15947	277	1335.92	4.60931	304.01	1474.15	5.05945
250.51	1201.46	4.16778	277.5	1338.77	4.61764	304.51	1476.92	5.06781
251.01	1204.02	4.17612	278.01	1341.15	4.62615	305.01	1479.23	5.07614
251.51	1206.39	4.18448	278.51	1343.62	4.63445	305.51	1481.89	5.08445
252	1209.1	4.19263	279.01	1346.37	4.64281	306	1484.5	5.09264
252.5	1211.7	4.20098	279.51	1348.81	4.65113	306.5	1487.3	5.10097
253	1214.05	4.20929	280	1351.28	4.65928	307	1489.47	5.1093
253.5	1216.75	4.21764	280.5	1353.72	4.66764	307.5	1492.11	5.11762
254.01	1219.21	4.22614	281	1356.32	4.67596	308.01	1495.08	5.12613
254.51	1222	4.23445	281.5	1358.84	4.6843	308.51	1497.5	5.13447
255.01	1224.21	4.24281	282.01	1361.45	4.6928	309.01	1500	5.1428
255.51	1226.98	4.25113	282.51	1364.09	4.70113	309.51	1502.59	5.15116
256	1229.53	4.2593	283.01	1366.6	4.70947	310	1505.22	5.15929
256.5	1231.95	4.26763	283.51	1369.23	4.7178	310.5	1507.67	5.16763
257	1234.54	4.27597	284	1371.62	4.72599	311	1510.23	5.17598
257.5	1236.82	4.2843	284.5	1374.17	4.73429	311.5	1512.99	5.1843
258.01	1239.57	4.2928	285	1376.85	4.74263	312	1515.53	5.19263
258.51	1242.19	4.30115	285.5	1379.34	4.75097	312.51	1517.98	5.20112
259.01	1244.55	4.30945	286.01	1381.94	4.75946	313.01	1520.65	5.20948
259.51	1247.28	4.3178	286.51	1384.33	4.7678	313.51	1523.18	5.2178
260	1249.78	4.32598	287.01	1387.04	4.77612	314.01	1526.03	5.22612
260.5	1252.34	4.33429	287.51	1389.77	4.78448	314.5	1528.33	5.2343
261	1254.65	4.34264	288	1391.91	4.79264	315	1530.86	5.24263
261.5	1257.09	4.35095	288.5	1394.66	4.80095	315.5	1533.72	5.25098
262.01	1259.87	4.35947	289	1397.26	4.8093	316	1536.06	5.25929
262.51	1262.29	4.36781	289.5	1399.72	4.81764	316.51	1538.91	5.2678
263.01	1264.87	4.37612	290.01	1402.42	4.82612	317.01	1541.25	5.27614
263.51	1267.32	4.38447	290.51	1404.8	4.83446	317.51	1544.18	5.28446

Timp *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*
318.01	1546.55	5.29281	345.51	1687.9	5.75113	373	1828.96	6.20929
318.5	1549.01	5.30096	346.01	1690.62	5.75946	373.5	1831.3	6.21762
319	1551.7	5.3093	346.51	1693.1	5.7678	374	1833.78	6.22597
319.5	1554.32	5.31765	347.01	1695.75	5.77614	374.51	1836.52	6.23447
320	1556.84	5.32596	347.51	1698.14	5.78445	375.01	1839.15	6.24282
320.51	1559.32	5.33447	348.01	1700.89	5.7928	375.51	1841.53	6.25112
321.01	1561.94	5.34279	348.5	1703.28	5.80098	376.01	1844.05	6.25948
321.51	1564.78	5.35115	349	1705.78	5.8093	376.5	1846.68	6.26764
322.01	1567.21	5.35947	349.5	1708.34	5.81765	377	1849.28	6.27595
322.5	1569.87	5.36763	350	1710.92	5.82596	377.5	1851.6	6.28431
323	1572.29	5.37597	350.51	1713.49	5.83447	378	1854.19	6.29263
323.5	1575.02	5.38429	351.01	1715.76	5.84282	378.51	1856.91	6.30113
324	1577.65	5.39264	351.51	1718.69	5.85112	379.01	1859.22	6.30947
324.51	1580.29	5.40112	352.01	1721.22	5.85947	379.51	1861.86	6.3178
325.01	1582.88	5.40946	352.5	1723.69	5.86763	380.01	1864.4	6.32613
325.51	1585.28	5.41781	353	1726.24	5.87598	380.5	1867.03	6.3343
326.01	1587.81	5.42612	353.5	1728.83	5.88431	381	1869.48	6.34265
326.5	1590.31	5.43431	354	1731.48	5.89264	381.5	1871.91	6.35096
327	1592.9	5.44263	354.51	1733.96	5.90113	382	1874.56	6.3593
327.5	1595.53	5.45096	355.01	1736.64	5.90946	382.51	1877.3	6.36782
328	1598	5.45931	355.51	1739.15	5.91781	383.01	1879.69	6.37613
328.51	1600.86	5.4678	356.01	1741.48	5.92612	383.51	1882.28	6.38448
329.01	1603.55	5.47613	356.5	1744.12	5.9343	384.01	1884.89	6.39279
329.51	1606.13	5.48446	357	1746.48	5.94265	384.5	1887.52	6.40098
330.01	1608.68	5.49281	357.5	1749.31	5.95096	385	1889.86	6.40931
330.5	1611.1	5.50096	358	1751.7	5.95931	385.5	1892.47	6.41762
331	1613.99	5.5093	358.51	1754.33	5.96779	386	1894.91	6.42598
331.5	1616.31	5.51764	359.01	1757.25	5.97614	386.51	1897.75	6.43446
332	1618.97	5.52596	359.51	1759.79	5.98448	387.01	1900.06	6.44279
332.51	1621.43	5.53448	360.01	1762.37	5.9928	387.51	1902.54	6.45113
333.01	1624.16	5.54279	360.5	1764.76	6.00097	388.01	1905.31	6.45947
333.51	1626.47	5.55113	361	1767.41	6.0093	388.5	1907.74	6.46764
334.01	1629.06	5.55948	361.5	1770.14	6.01763	389	1910.18	6.47596
334.5	1631.73	5.56763	362	1772.44	6.02597	389.5	1912.87	6.48432
335	1634.26	5.57598	362.51	1775.15	6.03447	390	1915.55	6.49262
335.5	1636.5	5.58429	363.01	1777.81	6.04278	390.51	1918.28	6.50113
336	1639.22	5.59263	363.51	1780.38	6.05114	391.01	1920.65	6.50948
336.51	1641.88	5.60114	364.01	1782.78	6.05948	391.51	1923.25	6.5178
337.01	1644.47	5.60947	364.5	1785.11	6.06763	392.01	1925.76	6.52614
337.51	1647.08	5.6178	365	1787.93	6.07596	392.5	1928.26	6.53429
338.01	1649.49	5.62613	365.5	1790.47	6.08431	393	1930.85	6.54265
338.5	1652.09	5.63431	366	1792.95	6.09263	393.5	1933.28	6.55097
339	1654.56	5.64263	366.51	1795.62	6.10114	394	1936.09	6.55929
339.5	1657.43	5.65096	367.01	1798.32	6.10946	394.51	1938.55	6.5678
340	1659.59	5.65931	367.51	1800.87	6.11781	395.01	1941.1	6.57613
340.51	1662.63	5.66779	368.01	1803.3	6.12614	395.51	1943.64	6.58446
341.01	1664.84	5.67614	368.5	1805.88	6.13429	396.01	1946.24	6.59281
341.51	1667.36	5.68445	369	1808.39	6.14263	396.51	1948.69	6.60113
342.01	1670.06	5.6928	369.5	1810.88	6.15097	397.01	1951.17	6.60947
342.5	1672.48	5.70098	370	1813.45	6.1593	397.51	1953.92	6.6178
343	1674.93	5.7093	370.51	1816.04	6.16781	398.01	1956.63	6.62615
343.5	1677.4	5.71765	371.01	1818.79	6.17613	398.5	1958.93	6.63429
344	1680.16	5.72597	371.51	1821.14	6.18446	399	1961.49	6.64263
344.51	1682.92	5.73447	372.01	1823.7	6.1928	399.5	1964.06	6.65098
345.01	1685.28	5.74281	372.5	1826.28	6.20098			

Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*
400	1966.71	6.6593	427	2104.56	7.10931	454.5	2244.71	7.56762
400.51	1969.18	6.6678	427.5	2106.78	7.11763	455.01	2247.23	7.57614
401.01	1971.64	6.67612	428	2109.5	7.12596	455.51	2249.74	7.58445
401.51	1974.35	6.68448	428.5	2112.29	7.1343	456.01	2252.19	7.5928
402.01	1976.87	6.69281	429.01	2114.67	7.14281	456.51	2254.69	7.60115
402.5	1979.38	6.70095	429.51	2117.28	7.15114	457	2257.31	7.6093
403	1981.82	6.7093	430.01	2119.72	7.15946	457.5	2259.83	7.61765
403.5	1984.54	6.71763	430.51	2122.67	7.1678	458	2262.23	7.62596
404	1986.94	6.72598	431	2124.8	7.17598	458.5	2264.74	7.63431
404.51	1989.44	6.73446	431.5	2127.66	7.18429	459.01	2267.35	7.64281
405.01	1992.26	6.7428	432	2130.11	7.19265	459.51	2270.2	7.65113
405.51	1994.69	6.75114	432.5	2132.68	7.20096	460.01	2272.63	7.65946
406.01	1997.15	6.75946	433.01	2135.09	7.20947	460.51	2275.03	7.6678
406.5	1999.78	6.76765	434.01	2140.28	7.22613	461	2277.73	7.67599
407	2002.29	6.77596	434.51	2142.83	7.23447	461.5	2280.2	7.68429
407.5	2004.94	6.7843	435	2145.17	7.24263	462	2282.85	7.69263
408	2007.31	6.79265	435.5	2147.77	7.25098	462.5	2285.22	7.70098
408.51	2010.05	6.80113	436	2150.34	7.25929	463.01	2287.95	7.70946
409.01	2012.51	6.80947	436.5	2153.21	7.26762	463.51	2290.32	7.71781
409.51	2015.26	6.81779	437.01	2155.4	7.27614	464.01	2292.77	7.72612
410.01	2017.74	6.82615	437.51	2158	7.28447	464.51	2295.37	7.73446
410.5	2020.1	6.8343	438.01	2160.71	7.29281	465	2297.91	7.74265
411	2022.79	6.84262	438.51	2163.1	7.30112	465.5	2300.55	7.75096
411.5	2025.29	6.85097	439	2165.81	7.3093	466	2302.74	7.7593
412	2027.75	6.8593	439.5	2168.1	7.31765	466.5	2305.49	7.76763
412.5	2030.22	6.86764	440	2170.84	7.32596	467.01	2308.38	7.77614
413.01	2033.03	6.87613	440.5	2173.16	7.33432	467.51	2310.62	7.78448
413.51	2035.68	6.88447	441.01	2175.7	7.34279	468.01	2313.39	7.7928
414.01	2038.03	6.89281	441.51	2178.45	7.35114	468.51	2315.75	7.80113
414.51	2040.75	6.90113	442.01	2181.07	7.35948	469	2318.3	7.8093
415	2043.22	6.90931	442.51	2183.47	7.3678	469.5	2320.87	7.81765
415.5	2045.58	6.91762	443	2185.78	7.37596	470	2323.39	7.82596
416	2048.17	6.92597	443.5	2188.55	7.3843	470.5	2326.01	7.83429
416.5	2050.72	6.93431	444	2191.33	7.39265	471.01	2328.51	7.84281
417.01	2053.45	6.9428	444.5	2193.74	7.40095	471.51	2330.95	7.85114
417.51	2055.86	6.95114	445.01	2196.42	7.40946	472.01	2333.57	7.85949
418.01	2058.35	6.95945	445.51	2198.92	7.4178	472.51	2336.1	7.86779
418.51	2060.98	6.96781	446.01	2201.54	7.42612	473	2338.75	7.87598
419	2063.39	6.97597	446.51	2203.98	7.43448	473.5	2340.84	7.88431
419.5	2065.9	6.9843	447.01	2206.56	7.44279	474	2343.64	7.89263
420	2068.47	6.99264	447.51	2209.22	7.45113	474.5	2346.23	7.90098
420.5	2071.38	7.00097	448.01	2211.65	7.45948	475.01	2348.89	7.90946
421.01	2074.17	7.00947	448.51	2214.02	7.46779	475.51	2351.52	7.9178
421.51	2076.39	7.0178	449	2216.53	7.47597	476.01	2353.83	7.92613
422.01	2079.05	7.02613	449.5	2219.21	7.4843	476.51	2356.59	7.93447
422.51	2081.61	7.03448	450	2221.77	7.49265	477	2358.81	7.94263
423	2084.31	7.04262	450.5	2224.09	7.50098	477.5	2361.52	7.95097
423.5	2086.79	7.05098	451.01	2226.79	7.50947	478	2363.98	7.95931
424	2089.22	7.05929	451.51	2229.42	7.5178	478.5	2366.51	7.96762
424.5	2092.09	7.06763	452.01	2232.02	7.52613	479.01	2369.21	7.97614
425.01	2094.34	7.07615	452.53	2234.66	7.53481	479.51	2371.51	7.98448
425.51	2096.86	7.08447	453	2236.9	7.54262	480.01	2374.02	7.99279
426.01	2099.41	7.0928	453.5	2239.64	7.55096	480.51	2376.71	8.00115
426.51	2102.12	7.10113	454	2241.92	7.55931	481	2379.05	8.00929

Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*
481.5	2381.68	8.01764	509.01	2520.88	8.47614	536.5	2657.94	8.93431
482	2384.27	8.02597	509.51	2523.51	8.48446	537	2660.62	8.94263
482.5	2387.15	8.0343	510.01	2525.87	8.4928	537.51	2663.18	8.95115
483.01	2389.47	8.04281	510.51	2528.18	8.50113	538.01	2665.58	8.95947
483.51	2392.01	8.05113	511	2530.35	8.50931	538.51	2668.05	8.9678
484.01	2394.66	8.05947	511.5	2533.14	8.51763	539.01	2670.47	8.97615
484.51	2396.88	8.06781	512	2535.65	8.52598	539.5	2672.98	8.9843
485	2399.45	8.07597	512.5	2538.25	8.53429	540	2675.5	8.99263
485.5	2401.66	8.0843	513	2540.84	8.54263	540.5	2677.81	9.00097
486	2404.43	8.09263	513.51	2543.35	8.55114	541	2680.56	9.00932
486.5	2406.96	8.10099	514.01	2545.88	8.55947	541.51	2682.81	9.0178
487.01	2409.47	8.10946	514.51	2548.3	8.5678	542.01	2685.55	9.02613
487.51	2412.12	8.1178	515.01	2550.85	8.57613	542.51	2687.87	9.03447
488.01	2414.65	8.12615	515.5	2553.54	8.58431	543.01	2690.48	9.0428
488.51	2417.26	8.13447	516	2555.71	8.59264	543.5	2692.8	9.05098
489	2419.57	8.14264	516.5	2558.39	8.60096	544	2695.33	9.05929
489.5	2422.19	8.15095	517	2560.87	8.60931	544.5	2698.25	9.06764
490	2424.88	8.15931	517.51	2563.48	8.6178	545	2700.68	9.07598
490.5	2427.26	8.16764	518.01	2566	8.62613	545.51	2703.17	9.08446
491.01	2429.9	8.17612	518.51	2568.39	8.63447	546.01	2705.77	9.09281
491.51	2432.32	8.18447	519.01	2571.03	8.6428	546.51	2708.14	9.10112
492.01	2435.07	8.1928	519.5	2573.27	8.65097	547.01	2710.85	9.10947
492.51	2437.6	8.20113	520	2575.87	8.6593	547.51	2713.08	9.11782
493	2439.74	8.20931	520.5	2578.45	8.66765	548.01	2715.94	9.12613
493.5	2442.5	8.21764	521	2580.74	8.67596	548.51	2718.01	9.13447
494	2445.04	8.22597	521.51	2583.57	8.68447	549.01	2720.67	9.1428
494.5	2447.57	8.2343	522.01	2585.81	8.69281	549.5	2722.88	9.15098
495.01	2450.01	8.24282	522.51	2588.4	8.70114	550	2725.19	9.1593
495.51	2452.46	8.25113	523.01	2590.9	8.70947	550.5	2727.93	9.16763
496.01	2455.28	8.25946	523.5	2593.44	8.71762	551	2730.29	9.17598
496.51	2457.44	8.26781	524	2595.83	8.72598	551.51	2732.79	9.18447
497.01	2460.14	8.27613	524.5	2598.13	8.7343	552.01	2735.26	9.19281
497.51	2462.61	8.28448	525	2601.04	8.74262	552.51	2737.7	9.20112
498.01	2465.2	8.29279	525.51	2603.44	8.75114	553.01	2740.4	9.20946
498.51	2467.81	8.30115	526.01	2605.75	8.75947	553.5	2742.55	9.21765
499	2470.05	8.30931	526.51	2608.3	8.76781	554	2745.16	9.22596
499.5	2472.82	8.31762	527.01	2610.87	8.77613	554.5	2747.67	9.23431
500	2475.38	8.32597	527.5	2613.51	8.7843	555	2750.17	9.24263
500.5	2477.92	8.3343	528	2615.57	8.79264	555.51	2752.84	9.25114
501.01	2480.39	8.34279	528.5	2618.32	8.80096	556.01	2755.17	9.25948
501.51	2482.93	8.35113	529	2620.94	8.80931	556.51	2757.91	9.2678
502.01	2485.66	8.35947	529.51	2623.3	8.81779	557.01	2760.23	9.27613
502.51	2487.91	8.3678	530.01	2625.92	8.82613	557.5	2762.45	9.2843
503	2490.47	8.37597	530.51	2628.37	8.83448	558	2765.12	9.29265
503.5	2493.05	8.38432	531.01	2631.15	8.8428	558.5	2767.38	9.30096
504	2495.5	8.39263	531.5	2633.33	8.85097	559	2770.03	9.3093
504.5	2498.04	8.40097	532	2635.81	8.8593	559.51	2772.33	9.31781
505.01	2500.57	8.40948	532.5	2638.45	8.86765	560.01	2774.84	9.32613
505.51	2503.28	8.4178	533	2640.82	8.87596	560.51	2777.52	9.33448
506.01	2505.73	8.42614	533.51	2643.27	8.88446	561.01	2779.9	9.34279
506.51	2508.19	8.43446	534.01	2645.68	8.89281	561.5	2782.37	9.35097
507	2510.75	8.44265	534.51	2648.35	8.90114	562	2784.73	9.35932
507.5	2513.32	8.45097	535.01	2650.84	8.90947	562.5	2787.53	9.36763
508	2515.89	8.45929	535.5	2653.06	8.91762	563	2789.72	9.37598
508.5	2518.23	8.46764	536	2655.56	8.92597	563.51	2792.33	9.38446

Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*
564.01	2794.96	9.3928	591	2929.38	9.84263	618.01	3063.46	10.2928
564.51	2797.3	9.40114	591.51	2932.26	9.85114	618.51	3066.21	10.3011
565.01	2800.02	9.40947	592.01	2935.01	9.85948	619.01	3068.23	10.3095
565.5	2802.23	9.41763	592.51	2937.11	9.86779	619.51	3070.96	10.3178
566	2804.65	9.42597	593.01	2939.97	9.87612	620	3073.38	10.326
566.5	2807.59	9.43432	593.5	2942.2	9.88431	620.5	3075.88	10.3343
567	2809.69	9.44262	594	2944.95	9.89264	621	3078.56	10.3426
567.51	2812.31	9.45113	594.5	2946.14	9.90098	621.5	3080.79	10.351
568.01	2814.59	9.45947	595	2948.43	9.90928	622.01	3083.49	10.3594
568.51	2817.44	9.4678	595.51	2951.2	9.91781	622.51	3085.92	10.3678
569.01	2819.72	9.47615	596.01	2953.46	9.92614	623.01	3088.39	10.3761
569.5	2822.18	9.4843	596.51	2956.17	9.93446	623.51	3091.19	10.3845
570	2824.79	9.49264	597.01	2958.64	9.94281	624	3093.52	10.3926
570.5	2827.4	9.50098	597.51	2961	9.95113	624.5	3096.26	10.401
571	2829.9	9.5093	598.01	2963.77	9.95946	625	3098.5	10.4093
571.51	2832.45	9.51781	598.51	2965.94	9.9678	625.5	3101.28	10.4176
572.01	2834.83	9.52613	599.01	2968.58	9.97613	626.01	3103.78	10.4262
572.51	2837.53	9.53447	599.5	2970.97	9.9843	626.51	3106.13	10.4345
573.01	2839.8	9.54281	600	2973.84	9.99263	627.01	3108.66	10.4428
573.5	2842.35	9.55097	600.5	2976.28	10.001	627.51	3110.77	10.4511
574	2844.81	9.55929	601	2978.7	10.0093	628	3113.44	10.4593
574.5	2847.39	9.56763	601.51	2981.45	10.0178	628.5	3115.86	10.4676
575	2849.93	9.57598	602.01	2983.93	10.0262	629	3118.31	10.476
575.51	2852.2	9.58445	602.51	2986.35	10.0345	629.5	3121.11	10.4843
576.01	2855.21	9.5928	603.01	2988.92	10.0428	630.01	3123.44	10.4928
576.51	2857.48	9.60114	603.5	2990.67	10.051	630.51	3126.02	10.5011
577.01	2859.94	9.60946	604	2993.32	10.0593	631.01	3128.46	10.5095
577.5	2862.32	9.61765	604.5	2995.41	10.0676	631.51	3131.2	10.5178
578	2864.81	9.62595	605	2998.15	10.0759	632	3133.7	10.526
578.5	2867.59	9.63431	605.51	3000.39	10.0845	632.5	3136	10.5343
579	2869.7	9.64264	606.01	3003.02	10.0928	633	3138.86	10.5426
579.51	2872.37	9.65113	606.51	3005.46	10.1011	633.5	3141.15	10.551
580.01	2874.81	9.65948	607.01	3007.98	10.1095	634.01	3143.85	10.5595
580.51	2877.34	9.6678	607.5	3010.84	10.1176	634.51	3146.23	10.5678
581.01	2879.78	9.67614	608	3013.22	10.126	635.01	3148.71	10.5761
581.5	2882.04	9.68431	608.5	3015.76	10.1343	635.51	3151.22	10.5845
582	2884.76	9.69264	609	3018.28	10.1427	636	3153.3	10.5926
582.5	2887.12	9.70096	609.51	3020.66	10.1511	636.5	3155.87	10.601
583	2889.71	9.70929	610.01	3023.66	10.1595	637	3158.25	10.6093
583.51	2892.17	9.71781	610.51	3025.68	10.1678	637.5	3160.86	10.6176
584.01	2894.73	9.72612	611.01	3028.32	10.1761	638.01	3163.45	10.6261
584.51	2897.52	9.73446	611.5	3031.07	10.1843	638.51	3165.66	10.6345
585.01	2899.73	9.74281	612	3033.53	10.1926	639.01	3168.55	10.6428
585.5	2902.41	9.75096	612.5	3035.93	10.201	639.51	3170.81	10.6511
586	2904.98	9.75931	613	3038.23	10.2093	640	3172.89	10.6593
586.5	2907.08	9.76762	613.5	3041	10.2176	640.5	3175.29	10.6676
587	2909.8	9.77597	614.01	3043.66	10.2261	641	3177.72	10.676
587.51	2912.18	9.78448	614.51	3045.91	10.2345	641.5	3180.56	10.6843
588.01	2914.96	9.79279	615.01	3048.66	10.2428	642.01	3182.63	10.6928
588.51	2917.22	9.80114	615.51	3050.99	10.2511	642.51	3185.35	10.7011
589.01	2919.62	9.80946	616	3053.67	10.2593	643.01	3187.99	10.7095
589.5	2922.08	9.81762	616.5	3055.92	10.2676	643.51	3190.31	10.7178
590	2924.49	9.82597	617	3058.67	10.276	644	3192.9	10.726
590.5	2927.16	9.8343	617.5	3061.17	10.2843	644.5	3195.18	10.7343

Timp *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*	**Timp** *s*	**Forță** *N*	**Deplsare** *mm*
645	3198.09	10.7426	672.51	3332.77	11.2011	700	3466.94	11.6593
645.5	3200.45	10.751	673.01	3335.51	11.2095	700.5	3469.28	11.6676
646.01	3202.88	10.7595	673.51	3337.92	11.2178	701	3472.07	11.676
646.51	3205.63	10.7678	674	3340.61	11.226	701.5	3474.4	11.6843
647.01	3208.14	10.7761	674.5	3343	11.2343	702.01	3476.68	11.6928
647.51	3210.93	10.7845	675	3345.46	11.2426	702.51	3479.35	11.7011
648.01	3213.12	10.7928	675.5	3348.18	11.251	703.01	3481.93	11.7095
648.51	3215.59	10.8011	676.01	3350.36	11.2595	703.51	3484.61	11.7178
649.01	3218.51	10.8095	676.51	3352.97	11.2678	704	3486.69	11.726
649.51	3220.63	10.8178	677.01	3355.59	11.2761	704.5	3489.33	11.7343
650	3223.45	10.826	677.51	3357.87	11.2845	705	3491.82	11.7426
650.5	3225.73	10.8343	678	3360.42	11.2926	705.5	3494.18	11.751
651	3228.65	10.8426	678.5	3362.68	11.301	706.01	3496.9	11.7595
651.5	3230.83	10.851	679	3365.77	11.3093	706.51	3499.09	11.7678
652.01	3232.11	10.8595	679.5	3367.84	11.3176	707.01	3501.81	11.7761
652.51	3234.52	10.8678	680.01	3370.24	11.3261	707.51	3504.03	11.7845
653.01	3236.48	10.8761	680.51	3373.06	11.3345	708	3506.47	11.7926
653.51	3239.11	10.8845	681.01	3375.39	11.3428	708.5	3508.95	11.801
654	3241.41	10.8926	681.51	3378.08	11.3511	709	3511.32	11.8093
654.5	3243.83	10.901	682	3380.33	11.3593	709.5	3513.99	11.8177
655	3246.57	10.9093	682.5	3382.8	11.3676	710.01	3516.11	11.8261
655.5	3248.77	10.9176	683	3385.51	11.376	710.51	3517.61	11.8345
656.01	3251.46	10.9261	683.5	3387.57	11.3843	711.01	3520.36	11.8428
656.51	3253.54	10.9345	684.01	3390.44	11.3928	711.51	3522.81	11.8511
657.01	3256.41	10.9428	684.51	3392.63	11.4011	712	3525.29	11.8593
657.51	3258.94	10.9511	685.01	3395.58	11.4095	712.5	3527.44	11.8676
658	3261.05	10.9593	685.51	3397.7	11.4178	713	3530.28	11.876
658.5	3263.88	10.9676	686	3400.07	11.426	713.5	3532.52	11.8843
659	3266.22	10.976	686.5	3402.88	11.4343	714	3534.95	11.8926
659.5	3268.71	10.9843	687	3405.18	11.4426	714.51	3537.62	11.9011
660.01	3270.99	10.9928	687.5	3407.61	11.451	715.01	3539.49	11.9095
660.51	3273.4	11.0011	688.01	3410.08	11.4595	715.51	3542.11	11.9178
661.01	3276.22	11.0095	688.51	3412.55	11.4678	716.01	3543.6	11.9261
661.51	3278.45	11.0178	689.01	3415.05	11.4761	716.5	3545.71	11.9343
662	3280.99	11.026	689.51	3417.01	11.4845	717	3548	11.9426
662.5	3283.34	11.0343	690	3419.77	11.4926	717.5	3550.23	11.951
663	3285.87	11.0426	690.5	3421.85	11.501	718	3552.71	11.9593
663.5	3288.18	11.051	691	3424.21	11.5093	718.51	3554.4	11.9678
664.01	3290.44	11.0595	691.5	3426.02	11.5177	719.01	3556.71	11.9761
664.51	3293.1	11.0678	692.01	3428.05	11.5261	719.51	3559.16	11.9845
665.01	3295.46	11.0761	692.51	3430.82	11.5345	720.01	3561.7	11.9928
665.51	3297.9	11.0845	693.01	3433.13	11.5428	720.5	3563.96	12.001
666	3300.17	11.0926	693.51	3435.67	11.5511	721	3566	12.0093
666.5	3302.56	11.101	694	3437.76	11.5593	721.5	3568.72	12.0176
667	3305.42	11.1093	694.5	3440.02	11.5676	722	3567.89	12.026
667.5	3307.64	11.1176	695	3442.88	11.576	722.51	3570.06	12.0345
668.01	3310.32	11.1261	695.5	3445.16	11.5843	723.01	3572.39	12.0428
668.51	3312.51	11.1345	696.01	3447.81	11.5928	723.51	3574.25	12.0511
669.01	3314.97	11.1428	696.51	3449.94	11.6011	724.01	3576.12	12.0595
669.51	3317.59	11.1511	697.01	3452.59	11.6095	724.5	3573.05	12.0676
670	3319.81	11.1593	697.51	3455.18	11.6178	725	3567.23	12.076
670.5	3322.59	11.1676	698.01	3457.26	11.6261	725.5	3569.07	12.0843
671	3325.44	11.176	698.51	3460.25	11.6345	726	3570.94	12.0926
671.5	3327.94	11.1843	699.01	3462.4	11.6428	726.51	3573.06	12.1011
672.01	3330.47	11.1928	699.51	3464.92	11.6511	727.01	3575	12.1095

Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*	Timp *s*	Forță *N*	Deplsare *mm*
727.51	3577.43	12.1178	754.5	3684.64	12.5676	781.51	3783.51	13.0178
728.01	3579	12.1261	755	3684.59	12.576	782.01	3785.72	13.0261
728.5	3581.46	12.1343	755.5	3685.95	12.5843	782.5	3787.84	13.0343
729	3583.84	12.1426	756	3688	12.5926	783	3789.9	13.0426
729.5	3585.67	12.151	756.51	3685.93	12.6011	783.5	3792.51	13.051
730	3588.39	12.1593	757.01	3684.33	12.6095	784	3794.28	13.0593
730.51	3590.66	12.1678	757.51	3686.03	12.6178	784.51	3797.14	13.0678
731.01	3593.12	12.1761	758.01	3688.37	12.6261	785.01	3799.11	13.0761
731.51	3595.32	12.1845	758.5	3690.05	12.6343	785.51	3801.22	13.0845
732.01	3597.55	12.1928	759	3692.41	12.6426	786.01	3803.67	13.0928
732.5	3600.57	12.201	759.5	3694.43	12.651	786.5	3805.6	13.101
733	3602.38	12.2093	760	3696.46	12.6593	787	3808.09	13.1093
733.5	3604.93	12.2176	760.51	3699.21	12.6678	787.5	3810.05	13.1176
734	3607.3	12.226	761.01	3699.32	12.6761	788	3812.34	13.126
734.51	3609.71	12.2345	761.51	3699.79	12.6845	788.51	3814.92	13.1345
735.01	3612.15	12.2428	762.01	3701.35	12.6928	789.01	3816.94	13.1428
735.51	3614.36	12.2511	762.5	3703.5	12.701	789.51	3819.27	13.1511
736.01	3616.92	12.2595	763	3705.92	12.7093	790.01	3821.07	13.1595
736.5	3618.95	12.2676	763.5	3707.75	12.7176	790.5	3823.56	13.1676
737	3621.07	12.276	764	3710.34	12.726	791	3825.78	13.176
737.5	3623.2	12.2843	764.51	3712.1	12.7345	791.5	3827.64	13.1843
738	3624.56	12.2926	765.01	3714.41	12.7428	792	3829.15	13.1926
738.51	3626.71	12.3011	765.51	3716.79	12.7511	792.51	3830.89	13.2011
739.01	3627.41	12.3095	766.01	3718.82	12.7595	793.01	3833.4	13.2095
739.51	3627.19	12.3178	766.5	3721.15	12.7676	793.51	3833.61	13.2178
740.01	3628.59	12.3262	767	3722.97	12.776	794.01	3835.21	13.2261
740.5	3630.01	12.3343	767.5	3725.25	12.7843	794.5	3837.1	13.2343
741	3632.22	12.3426	768	3727.31	12.7926	795	3838.71	13.2426
741.5	3633.84	12.351	768.51	3729.45	12.8011	795.5	3841.21	13.251
742	3636.14	12.3593	769.01	3731.79	12.8095	796	3843.03	13.2593
742.51	3638.31	12.3678	769.51	3733.54	12.8178	796.51	3845.28	13.2678
743.01	3640.36	12.3761	770.01	3736.09	12.8261	797.01	3847.58	13.2761
743.51	3642.51	12.3845	770.5	3738.17	12.8343	797.51	3849.15	13.2845
744.01	3644.45	12.3928	771	3740.43	12.8426	798.01	3851.59	13.2928
744.5	3646.82	12.401	771.5	3742.68	12.851	798.51	3853.36	13.3011
745	3648.77	12.4093	772	3744.49	12.8593	799.01	3855.64	13.3095
745.5	3650.84	12.4176	772.51	3747.14	12.8678	799.51	3857.53	13.3178
746	3653.16	12.426	773.01	3749.1	12.8761	800.01	3859.45	13.3261
746.51	3655.03	12.4345	773.51	3751.33	12.8845	800.5	3861.9	13.3343
747.01	3657.48	12.4428	774.01	3753.79	12.8928	801	3863.53	13.3426
747.51	3658.09	12.4511	774.5	3755.92	12.901	801.5	3865.48	13.351
748.01	3660.22	12.4595	775	3758.27	12.9093	802	3867.34	13.3593
748.51	3662.36	12.4678	775.5	3759.98	12.9176	802.51	3869.33	13.3678
749.01	3664.15	12.4761	776	3762.4	12.926	803.01	3871.96	13.3761
749.51	3666.64	12.4845	776.51	3764.46	12.9345	803.51	3873.56	13.3844
750.01	3668.54	12.4928	777.01	3765.28	12.9428	804.01	3876.18	13.3928
750.5	3670.92	12.501	777.51	3767.75	12.9511	804.5	3877.89	13.401
751	3672.99	12.5093	778.01	3769.36	12.9595	805	3880.21	13.4093
751.5	3675	12.5176	778.5	3771.8	12.9676	805.5	3882.33	13.4176
752	3677.43	12.526	779	3773.78	12.976	806	3884.2	13.426
752.51	3679.26	12.5345	779.5	3776	12.9843	806.51	3886.82	13.4345
753.01	3681.07	12.5428	780	3778.38	12.9926	807.01	3888.54	13.4428
753.51	3681.76	12.5511	780.51	3779.54	13.0011	807.51	3890.93	13.4511
754.01	3682.5	12.5595	781.01	3781.56	13.0095	808.01	3893	13.4595

ANEXA 7

Rezultate obținute la încercarea de tracțiune pentru epruveta D3 de la mașina de încercări mecanice

C:\ZWICK\TESTXPERT II\DATA\TP_MX1_ L0-80.zs2
Data/ora 08/10/2014 15:47:13
Viteza de incercare 1 mm/min
Latime epruveta 9,7 mm
Grosime epruveta 1,9 mm

Timp *s*	**Alungire** *mm*	**Forță** *N*	**Timp** *s*	**Alungire** *mm*	**Forță** *N*	**Timp** *s*	**Alungire** *mm*	**Forță** *N*
1.90E+00	-2.56E-05	-1.87E+01	4.33E+01	6.71E-01	1.79E+03	8.54E+01	1.37E+00	3.88E+03
2.20E+00	-2.56E-05	-1.87E+01	4.43E+01	6.88E-01	1.84E+03	8.64E+01	1.39E+00	3.92E+03
3.20E+00	4.27E-03	-9.48E+00	4.53E+01	7.05E-01	1.90E+03	8.74E+01	1.41E+00	3.96E+03
4.20E+00	2.03E-02	-1.00E+00	4.63E+01	7.22E-01	1.96E+03	8.84E+01	1.42E+00	4.01E+03
5.20E+00	3.70E-02	4.76E+00	4.73E+01	7.38E-01	2.01E+03	8.94E+01	1.44E+00	4.05E+03
6.20E+00	5.36E-02	7.78E+00	4.83E+01	7.55E-01	2.07E+03	9.04E+01	1.46E+00	4.09E+03
7.20E+00	7.03E-02	9.51E+00	4.93E+01	7.72E-01	2.12E+03	9.14E+01	1.47E+00	4.13E+03
8.20E+00	8.70E-02	1.67E+01	5.03E+01	7.88E-01	2.17E+03	9.24E+01	1.49E+00	4.17E+03
9.20E+00	1.04E-01	1.80E+01	5.13E+01	8.05E-01	2.23E+03	9.34E+01	1.51E+00	4.21E+03
1.02E+01	1.20E-01	3.46E+01	5.23E+01	8.22E-01	2.28E+03	9.44E+01	1.52E+00	4.25E+03
1.12E+01	1.37E-01	6.16E+01	5.33E+01	8.38E-01	2.34E+03	9.54E+01	1.54E+00	4.29E+03
1.22E+01	1.54E-01	9.56E+01	5.43E+01	8.55E-01	2.39E+03	9.64E+01	1.56E+00	4.33E+03
1.32E+01	1.70E-01	1.36E+02	5.53E+01	8.72E-01	2.44E+03	9.74E+01	1.57E+00	4.37E+03
1.42E+01	1.87E-01	1.81E+02	5.63E+01	8.89E-01	2.49E+03	9.84E+01	1.59E+00	4.41E+03
1.52E+01	2.04E-01	2.27E+02	5.73E+01	9.05E-01	2.55E+03	9.94E+01	1.61E+00	4.45E+03
1.62E+01	2.21E-01	2.75E+02	5.83E+01	9.22E-01	2.60E+03	1.00E+02	1.62E+00	4.49E+03
1.72E+01	2.37E-01	3.25E+02	5.93E+01	9.39E-01	2.65E+03	1.01E+02	1.64E+00	4.53E+03
1.82E+01	2.54E-01	3.77E+02	6.03E+01	9.55E-01	2.70E+03	1.02E+02	1.66E+00	4.57E+03
1.92E+01	2.71E-01	4.30E+02	6.13E+01	9.72E-01	2.76E+03	1.03E+02	1.67E+00	4.61E+03
2.02E+01	2.87E-01	4.85E+02	6.23E+01	9.89E-01	2.81E+03	1.04E+02	1.69E+00	4.65E+03
2.12E+01	3.04E-01	5.40E+02	6.33E+01	1.01E+00	2.86E+03	1.05E+02	1.71E+00	4.69E+03
2.22E+01	3.21E-01	5.95E+02	6.43E+01	1.02E+00	2.91E+03	1.06E+02	1.72E+00	4.72E+03
2.32E+01	3.37E-01	6.51E+02	6.53E+01	1.04E+00	2.96E+03	1.07E+02	1.74E+00	4.76E+03
2.42E+01	3.54E-01	7.08E+02	6.63E+01	1.06E+00	3.01E+03	1.08E+02	1.76E+00	4.80E+03
2.52E+01	3.71E-01	7.65E+02	6.73E+01	1.07E+00	3.06E+03	1.09E+02	1.77E+00	4.84E+03
2.62E+01	3.88E-01	8.22E+02	6.83E+01	1.09E+00	3.11E+03	1.10E+02	1.79E+00	4.87E+03
2.72E+01	4.04E-01	8.79E+02	6.93E+01	1.11E+00	3.16E+03	1.11E+02	1.81E+00	4.91E+03
2.82E+01	4.21E-01	9.36E+02	7.03E+01	1.12E+00	3.21E+03	1.12E+02	1.82E+00	4.95E+03
2.92E+01	4.38E-01	9.93E+02	7.13E+01	1.14E+00	3.25E+03	1.13E+02	1.84E+00	4.98E+03
3.02E+01	4.54E-01	1.05E+03	7.23E+01	1.16E+00	3.30E+03	1.14E+02	1.86E+00	5.02E+03
3.12E+01	4.71E-01	1.11E+03	7.33E+01	1.17E+00	3.35E+03	1.15E+02	1.87E+00	5.05E+03
3.22E+01	4.88E-01	1.17E+03	7.43E+01	1.19E+00	3.39E+03	1.16E+02	1.89E+00	5.09E+03
3.32E+01	5.04E-01	1.22E+03	7.53E+01	1.21E+00	3.44E+03	1.17E+02	1.91E+00	5.12E+03
3.42E+01	5.21E-01	1.28E+03	7.63E+01	1.22E+00	3.49E+03	1.18E+02	1.92E+00	5.16E+03
3.53E+01	5.38E-01	1.34E+03	7.73E+01	1.24E+00	3.53E+03	1.19E+02	1.94E+00	5.19E+03
3.63E+01	5.55E-01	1.39E+03	7.83E+01	1.26E+00	3.58E+03	1.20E+02	1.96E+00	5.23E+03
3.73E+01	5.71E-01	1.45E+03	7.93E+01	1.27E+00	3.62E+03	1.21E+02	1.97E+00	5.26E+03
3.83E+01	5.88E-01	1.51E+03	8.03E+01	1.29E+00	3.67E+03	1.22E+02	1.99E+00	5.30E+03
3.93E+01	6.05E-01	1.56E+03	8.13E+01	1.31E+00	3.71E+03	1.23E+02	2.01E+00	5.33E+03
4.03E+01	6.21E-01	1.62E+03	8.23E+01	1.32E+00	3.75E+03	1.24E+02	2.02E+00	5.36E+03
4.13E+01	6.38E-01	1.68E+03	8.33E+01	1.34E+00	3.80E+03	1.25E+02	2.04E+00	5.40E+03
4.23E+01	6.55E-01	1.73E+03	8.43E+01	1.36E+00	3.84E+03	1.26E+02	2.06E+00	5.43E+03

Timp *s*	**Alungire** *mm*	**Forță** *N*	**Timp** *s*	**Alungire** *mm*	**Forță** *N*	**Timp** *s*	**Alungire** *mm*	**Forță** *N*
1.27E+02	2.07E+00	5.46E+03	1.34E+02	2.19E+00	5.69E+03	1.41E+02	2.31E+00	5.90E+03
1.28E+02	2.09E+00	5.50E+03	1.35E+02	2.21E+00	5.72E+03	1.42E+02	2.32E+00	5.92E+03
1.29E+02	2.11E+00	5.53E+03	1.36E+02	2.22E+00	5.75E+03	1.43E+02	2.34E+00	5.95E+03
1.30E+02	2.12E+00	5.56E+03	1.37E+02	2.24E+00	5.78E+03	1.44E+02	2.36E+00	5.98E+03
1.31E+02	2.14E+00	5.59E+03	1.38E+02	2.26E+00	5.81E+03	1.45E+02	2.37E+00	6.00E+03
1.32E+02	2.16E+00	5.63E+03	1.39E+02	2.27E+00	5.84E+03	1.45E+02	2.37E+00	6.00E+03
1.33E+02	2.17E+00	5.66E+03	1.40E+02	2.29E+00	5.87E+03	1.45E+02	2.37E+00	6.00E+03

ANEXA 8

Rezultate obținute la încercarea la încovoiere pentru epruveta D3 de la sistemul de achiziție SPIDER8

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
0	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
0.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
1	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
1.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
2	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
2.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
3	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
3.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
4	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
4.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
5.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
6	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
6.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
7	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
7.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
8	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
8.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
9	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
9.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
10	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
10.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
11	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
11.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
12	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
12.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
13	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
13.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
14	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
14.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
15	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
15.5	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
16	-42.35294	19.29412	-3.93216	-3.93216
16.5	-41.88235	18.82353	-3.93216	-3.93216
17	-40.47059	18.35294	-3.93216	-3.93216
17.5	-36.23529	17.41177	-3.93216	-3.93216
18	-30.58824	16	-3.93216	-3.93216
18.5	-23.52941	15.05882	-3.93216	-3.93216
19	-16	14.11765	-3.93216	-3.93216
19.5	-8.47059	13.17647	-3.93216	-3.93216
20	-1.41176	12.23529	-3.93216	-3.93216
20.5	4.70588	11.29412	-3.93216	-3.93216
21	9.88235	10.35294	-3.93216	-3.93216
21.5	14.58824	9.41176	-3.93216	-3.93216
22	18.82353	8	-3.93216	-3.93216
22.5	23.05882	6.58824	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
23	26.82353	5.17647	-3.93216	-3.93216
23.5	31.05882	3.29412	-3.93216	-3.93216
24	37.64706	0.47059	-3.93216	-3.93216
24.5	47.52941	-3.29412	-3.93216	-3.93216
25	61.17647	-8.47059	-3.93216	-3.93216
25.5	78.58824	-15.52941	-3.93216	-3.93216
26	99.76471	-24	-3.93216	-3.93216
26.5	123.76471	-33.88235	-3.93216	-3.93216
27	151.52941	-45.17647	-3.93216	-3.93216
27.5	183.05883	-57.88235	-3.93216	-3.93216
28	216.94118	-71.52941	-3.93216	-3.93216
28.5	253.64706	-86.11765	-3.93216	-3.93216
29	292.70589	-101.64706	-3.93216	-3.93216
29.5	332.70589	-117.64706	-3.93216	-3.93216
30	374.58824	-134.11765	-3.93216	-3.93216
30.5	417.88236	-151.05883	-3.93216	-3.93216
31	462.58824	-168.47059	-3.93216	-3.93216
31.5	507.76472	-186.35294	-3.93216	-3.93216
32	554.82354	-204.70589	-3.93216	-3.93216
32.5	602.35295	-223.05883	-3.93216	-3.93216
33	650.82354	-241.88236	-3.93216	-3.93216
33.5	700.23531	-261.17648	-3.93216	-3.93216
34	750.58825	-280.47059	-3.93216	-3.93216
34.5	800.94119	-300.2353	-3.93216	-3.93216
35	852.23531	-320.00001	-3.93216	-3.93216
35.5	904.00002	-339.76471	-3.93216	-3.93216
36	956.23531	-360.00001	-3.93216	-3.93216
36.5	1008.9412	-380.2353	-3.93216	-3.93216
37	1061.64708	-400.4706	-3.93216	-3.93216
37.5	1114.82355	-421.17648	-3.93216	-3.93216
38	1168.00002	-441.41177	-3.93216	-3.93216
38.5	1221.17649	-462.11766	-3.93216	-3.93216
39	1274.82355	-482.82354	-3.93216	-3.93216
39.5	1328.9412	-504.00001	-3.93216	-3.93216
40	1382.58826	-524.70589	-3.93216	-3.93216
40.5	1436.23532	-545.41177	-3.93216	-3.93216
41	1490.35297	-566.11766	-3.93216	-3.93216
41.5	1544.47062	-587.29413	-3.93216	-3.93216
42	1598.11768	-608.00001	-3.93216	-3.93216
42.5	1651.76474	-628.70589	-3.93216	-3.93216
43	1705.88238	-649.88237	-3.93216	-3.93216
43.5	1759.52944	-670.58825	-3.93216	-3.93216
44	1813.1765	-691.29413	-3.93216	-3.93216
44.5	1866.82356	-712.4706	-3.93216	-3.93216
45	1920.94121	-733.17648	-3.93216	-3.93216
45.5	1974.58827	-754.35296	-3.93216	-3.93216
46	2028.23533	-775.05884	-3.93216	-3.93216
46.5	2082.35298	-796.23531	-3.93216	-3.93216
47	2136.00004	-816.94119	-3.93216	-3.93216
47.5	2189.6471	-838.11766	-3.93216	-3.93216
48	2243.29416	-858.82355	-3.93216	-3.93216
48.5	2296.47063	-880.00002	-3.93216	-3.93216
49	2350.11769	-900.7059	-3.93216	-3.93216

Timp	Deplasări			
	Senzor *L*	Senzor *T*	Senzor *SU*	Senzor *SB*
s	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*
49.5	2403.29416	-921.41178	-3.93216	-3.93216
50	2456.00005	-942.11766	-3.93216	-3.93216
50.5	2508.70593	-962.82355	-3.93216	-3.93216
51	2561.41181	-983.52943	-3.93216	-3.93216
51.5	2614.1177	-1004.23531	-3.93216	-3.93216
52	2666.82358	-1024.9412	-3.93216	-3.93216
52.5	2719.52946	-1045.17649	-3.93216	-3.93216
53	2771.76476	-1065.88237	-3.93216	-3.93216
53.5	2824.00005	-1086.58826	-3.93216	-3.93216
54	2876.23535	-1107.29414	-3.93216	-3.93216
54.5	2928.47064	-1127.52943	-3.93216	-3.93216
55	2980.23535	-1148.23532	-3.93216	-3.93216
55.5	3032.47064	-1168.47061	-3.93216	-3.93216
56	3084.23535	-1189.17649	-3.93216	-3.93216
56.5	3136.00006	-1209.41179	-3.93216	-3.93216
57	3187.76477	-1230.11767	-3.93216	-3.93216
57.5	3239.05888	-1250.35296	-3.93216	-3.93216
58	3290.82359	-1270.58826	-3.93216	-3.93216
58.5	3342.11771	-1291.29414	-3.93216	-3.93216
59	3393.41183	-1311.52944	-3.93216	-3.93216
59.5	3444.23536	-1331.76473	-3.93216	-3.93216
60	3495.52948	-1352.00003	-3.93216	-3.93216
60.5	3546.35301	-1372.23532	-3.93216	-3.93216
61	3596.70595	-1392.47061	-3.93216	-3.93216
61.5	3647.52948	-1412.23532	-3.93216	-3.93216
62	3697.88242	-1432.47062	-3.93216	-3.93216
62.5	3748.23536	-1452.70591	-3.93216	-3.93216
63	3798.11772	-1472.47062	-3.93216	-3.93216
63.5	3848.47066	-1492.70591	-3.93216	-3.93216
64	3897.88243	-1512.47062	-3.93216	-3.93216
64.5	3947.76478	-1532.23532	-3.93216	-3.93216
65	3997.17655	-1552.00003	-3.93216	-3.93216
65.5	4046.58831	-1571.76474	-3.93216	-3.93216
66	4095.52949	-1591.52944	-3.93216	-3.93216
66.5	4144.47067	-1611.29415	-3.93216	-3.93216
67	4193.41184	-1630.58827	-3.93216	-3.93216
67.5	4242.35302	-1650.35297	-3.93216	-3.93216
68	4290.82361	-1669.64709	-3.93216	-3.93216
68.5	4339.2942	-1689.4118	-3.93216	-3.93216
69	4387.76479	-1708.70591	-3.93216	-3.93216
69.5	4435.76479	-1728.00003	-3.93216	-3.93216
70	4483.76479	-1747.29415	-3.93216	-3.93216
70.5	4531.76479	-1766.58827	-3.93216	-3.93216
71	4579.76479	-1785.88239	-3.93216	-3.93216
71.5	4627.2942	-1805.1765	-3.93216	-3.93216
72	4675.29421	-1824.47062	-3.93216	-3.93216
72.5	4722.82362	-1843.76474	-3.93216	-3.93216
73	4769.88244	-1863.05886	-3.93216	-3.93216
73.5	4817.41185	-1881.88239	-3.93216	-3.93216
74	4864.47068	-1901.17651	-3.93216	-3.93216
74.5	4912.00009	-1920.47062	-3.93216	-3.93216
75	4958.58833	-1939.29415	-3.93216	-3.93216
75.5	5005.64715	-1958.58827	-3.93216	-3.93216
76	5052.70598	-1977.4118	-3.93216	-3.93216
76.5	5099.29421	-1996.23533	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
77	5145.41186	-2015.52945	-3.93216	-3.93216
77.5	5192.0001	-2034.35298	-3.93216	-3.93216
78	5238.11775	-2053.17651	-3.93216	-3.93216
78.5	5284.23539	-2072.00004	-3.93216	-3.93216
79	5330.35304	-2090.82357	-3.93216	-3.93216
79.5	5376.0001	-2109.17651	-3.93216	-3.93216
80	5422.11775	-2128.00004	-3.93216	-3.93216
80.5	5467.76481	-2146.82357	-3.93216	-3.93216
81	5513.41187	-2165.17651	-3.93216	-3.93216
81.5	5558.58834	-2183.52945	-3.93216	-3.93216
82	5603.76481	-2201.88239	-3.93216	-3.93216
82.5	5648.47069	-2220.23534	-3.93216	-3.93216
83	5693.17658	-2238.58828	-3.93216	-3.93216
83.5	5737.88246	-2256.94122	-3.93216	-3.93216
84	5782.11776	-2274.82357	-3.93216	-3.93216
84.5	5825.88246	-2293.17651	-3.93216	-3.93216
85	5869.64717	-2311.05887	-3.93216	-3.93216
85.5	5913.41188	-2328.94122	-3.93216	-3.93216
86	5956.70599	-2346.82357	-3.93216	-3.93216
86.5	6000.00011	-2364.70593	-3.93216	-3.93216
87	6042.82364	-2382.11769	-3.93216	-3.93216
87.5	6085.64717	-2400.00004	-3.93216	-3.93216
88	6128.4707	-2417.41181	-3.93216	-3.93216
88.5	6170.82364	-2434.82357	-3.93216	-3.93216
89	6212.706	-2452.23534	-3.93216	-3.93216
89.5	6254.58835	-2469.64711	-3.93216	-3.93216
90	6296.47071	-2487.05887	-3.93216	-3.93216
90.5	6338.35306	-2504.00005	-3.93216	-3.93216
91	6379.76483	-2520.94122	-3.93216	-3.93216
91.5	6420.706	-2538.35299	-3.93216	-3.93216
92	6462.11777	-2555.29417	-3.93216	-3.93216
92.5	6502.58836	-2572.23534	-3.93216	-3.93216
93	6543.52953	-2588.70593	-3.93216	-3.93216
93.5	6584.00012	-2605.64711	-3.93216	-3.93216
94	6624.47071	-2622.58828	-3.93216	-3.93216
94.5	6664.47071	-2639.05887	-3.93216	-3.93216
95	6704.47071	-2655.52946	-3.93216	-3.93216
95.5	6744.47071	-2672.00005	-3.93216	-3.93216
96	6784.00013	-2688.47064	-3.93216	-3.93216
96.5	6823.52954	-2704.94123	-3.93216	-3.93216
97	6862.58836	-2721.41182	-3.93216	-3.93216
97.5	6902.11778	-2737.8824	-3.93216	-3.93216
98	6940.70601	-2753.8824	-3.93216	-3.93216
98.5	6979.29425	-2769.8824	-3.93216	-3.93216
99	7017.88248	-2786.35299	-3.93216	-3.93216
99.5	7056.47072	-2802.35299	-3.93216	-3.93216
100	7095.05896	-2818.35299	-3.93216	-3.93216
100.5	7133.1766	-2834.35299	-3.93216	-3.93216
101	7171.76484	-2850.35299	-3.93216	-3.93216
101.5	7209.88249	-2866.35299	-3.93216	-3.93216
102	7247.52955	-2881.88241	-3.93216	-3.93216
102.5	7285.6472	-2897.88241	-3.93216	-3.93216
103	7323.29425	-2913.88241	-3.93216	-3.93216

Timp	Deplasări			
	Senzor *L*	Senzor *T*	Senzor *SU*	Senzor *SB*
s	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*
103.5	7360.94131	-2929.41182	-3.93216	-3.93216
104	7398.58837	-2945.41182	-3.93216	-3.93216
104.5	7436.23543	-2960.94123	-3.93216	-3.93216
105	7473.4119	-2976.94123	-3.93216	-3.93216
105.50001	7510.58838	-2992.47064	-3.93216	-3.93216
106.00001	7547.76485	-3008.00006	-3.93216	-3.93216
106.50001	7584.47073	-3023.52947	-3.93216	-3.93216
107.00001	7621.17661	-3039.05888	-3.93216	-3.93216
107.50001	7657.8825	-3054.58829	-3.93216	-3.93216
108.00001	7694.58838	-3070.1177	-3.93216	-3.93216
108.50001	7730.82367	-3085.64712	-3.93216	-3.93216
109.00001	7767.52956	-3100.70594	-3.93216	-3.93216
109.50001	7803.76485	-3116.23535	-3.93216	-3.93216
110.00001	7840.00015	-3131.29418	-3.93216	-3.93216
110.50001	7876.23544	-3146.82359	-3.93216	-3.93216
111.00001	7912.47074	-3161.88241	-3.93216	-3.93216
111.50001	7948.70603	-3176.94124	-3.93216	-3.93216
112.00001	7984.47074	-3192.47065	-3.93216	-3.93216
112.50001	8020.23544	-3207.52947	-3.93216	-3.93216
113.00001	8056.00015	-3222.5883	-3.93216	-3.93216
113.50001	8092.23545	-3237.64712	-3.93216	-3.93216
114.00001	8128.00015	-3252.70594	-3.93216	-3.93216
114.50001	8163.29427	-3267.76477	-3.93216	-3.93216
115.00001	8199.05898	-3282.82359	-3.93216	-3.93216
115.50001	8234.82368	-3297.88241	-3.93216	-3.93216
116.00001	8270.1178	-3312.94124	-3.93216	-3.93216
116.50001	8305.88251	-3328.00006	-3.93216	-3.93216
117.00001	8341.17663	-3343.05889	-3.93216	-3.93216
117.50001	8376.47074	-3358.11771	-3.93216	-3.93216
118.00001	8411.29427	-3372.70595	-3.93216	-3.93216
118.50001	8446.58839	-3387.76477	-3.93216	-3.93216
119.00001	8481.41192	-3402.353	-3.93216	-3.93216
119.50001	8516.23545	-3416.94124	-3.93216	-3.93216
120.00001	8550.5884	-3432.00006	-3.93216	-3.93216
120.50001	8585.41193	-3446.5883	-3.93216	-3.93216
121.00001	8619.76487	-3461.17654	-3.93216	-3.93216
121.50001	8654.11781	-3475.76477	-3.93216	-3.93216
122.00001	8688.47075	-3490.35301	-3.93216	-3.93216
122.50001	8722.82369	-3504.94124	-3.93216	-3.93216
123.00001	8756.70605	-3519.05889	-3.93216	-3.93216
123.50001	8790.5884	-3533.64712	-3.93216	-3.93216
124.00001	8824.47075	-3547.76477	-3.93216	-3.93216
124.50001	8857.88252	-3562.35301	-3.93216	-3.93216
125.00001	8891.29428	-3576.47066	-3.93216	-3.93216
125.50001	8924.70605	-3590.5883	-3.93216	-3.93216
126.00001	8957.64723	-3604.70595	-3.93216	-3.93216
126.50001	8990.5884	-3618.8236	-3.93216	-3.93216
127.00001	9023.52958	-3632.47066	-3.93216	-3.93216
127.50001	9056.00017	-3646.5883	-3.93216	-3.93216
128.00001	9088.47076	-3660.23536	-3.93216	-3.93216
128.50001	9120.94135	-3674.35301	-3.93216	-3.93216
129.00001	9153.41194	-3688.00007	-3.93216	-3.93216
129.50001	9185.88252	-3702.11772	-3.93216	-3.93216
130.00001	9217.88253	-3715.76478	-3.93216	-3.93216
130.50001	9250.35311	-3729.41183	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
131.00001	9282.35311	-3743.05889	-3.93216	-3.93216
131.50001	9314.35312	-3756.70595	-3.93216	-3.93216
132.00001	9346.35312	-3770.35301	-3.93216	-3.93216
132.50001	9377.88253	-3784.00007	-3.93216	-3.93216
133.00001	9409.41194	-3797.17654	-3.93216	-3.93216
133.50001	9440.94135	-3810.8236	-3.93216	-3.93216
134.00001	9472.47077	-3824.00007	-3.93216	-3.93216
134.50001	9503.52959	-3837.64713	-3.93216	-3.93216
135.00001	9535.059	-3850.8236	-3.93216	-3.93216
135.50001	9566.11783	-3864.00007	-3.93216	-3.93216
136.00001	9597.17665	-3877.64713	-3.93216	-3.93216
136.50001	9628.23547	-3890.8236	-3.93216	-3.93216
137.00001	9659.2943	-3904.47066	-3.93216	-3.93216
137.50001	9690.35312	-3917.64713	-3.93216	-3.93216
138.00001	9720.94136	-3930.8236	-3.93216	-3.93216
138.50001	9751.52959	-3944.00007	-3.93216	-3.93216
139.00001	9782.11783	-3956.70596	-3.93216	-3.93216
139.50001	9812.23548	-3969.88243	-3.93216	-3.93216
140.00001	9841.88254	-3982.58831	-3.93216	-3.93216
140.50001	9872.00018	-3995.29419	-3.93216	-3.93216
141.00001	9901.64724	-4008.47066	-3.93216	-3.93216
141.50001	9931.2943	-4021.17655	-3.93216	-3.93216
142.00001	9961.41195	-4033.88243	-3.93216	-3.93216
142.50001	9991.05901	-4046.58831	-3.93216	-3.93216
143.00001	10020.70607	-4059.29419	-3.93216	-3.93216
143.50001	10050.35313	-4072.00008	-3.93216	-3.93216
144.00001	10080.00019	-4084.70596	-3.93216	-3.93216
144.50001	10109.64725	-4097.41184	-3.93216	-3.93216
145.00001	10138.82372	-4110.11772	-3.93216	-3.93216
145.50001	10168.00019	-4122.82361	-3.93216	-3.93216
146.00001	10197.64725	-4135.0589	-3.93216	-3.93216
146.50001	10226.82372	-4147.76478	-3.93216	-3.93216
147.00001	10256.47078	-4160.00008	-3.93216	-3.93216
147.50001	10285.64725	-4172.23537	-3.93216	-3.93216
148.00001	10314.35313	-4184.94125	-3.93216	-3.93216
148.50001	10343.52961	-4197.17655	-3.93216	-3.93216
149.00001	10372.23549	-4209.41184	-3.93216	-3.93216
149.50001	10400.94137	-4221.64714	-3.93216	-3.93216
150.00001	10429.17667	-4233.88243	-3.93216	-3.93216
150.50001	10457.41196	-4245.64714	-3.93216	-3.93216
151.00001	10485.17667	-4257.88243	-3.93216	-3.93216
151.50001	10513.41196	-4269.64714	-3.93216	-3.93216
152.00001	10540.70608	-4281.41184	-3.93216	-3.93216
152.50001	10568.0002	-4293.17655	-3.93216	-3.93216
153.00001	10595.29432	-4304.47067	-3.93216	-3.93216
153.50001	10622.11785	-4316.23537	-3.93216	-3.93216
154.00001	10648.94138	-4327.52949	-3.93216	-3.93216
154.50001	10675.29432	-4339.2942	-3.93216	-3.93216
155.00001	10701.64726	-4350.11773	-3.93216	-3.93216
155.50001	10728.47079	-4361.41185	-3.93216	-3.93216
156.00001	10754.82373	-4372.70596	-3.93216	-3.93216
156.50001	10780.70608	-4383.52949	-3.93216	-3.93216
157.00001	10806.58844	-4394.82361	-3.93216	-3.93216

Timp	Deplasări			
	Senzor *L*	Senzor *T*	Senzor *SU*	Senzor *SB*
s	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*
157.50001	10832.47079	-4405.64714	-3.93216	-3.93216
158.00001	10857.88256	-4416.47067	-3.93216	-3.93216
158.50001	10883.29432	-4427.2942	-3.93216	-3.93216
159.00001	10908.2355	-4438.11773	-3.93216	-3.93216
159.50001	10929.41197	-4447.05891	-3.93216	-3.93216
160.00001	10943.52962	-4453.17655	-3.93216	-3.93216
160.50001	10948.2355	-4455.5295	-3.93216	-3.93216
161.00001	10945.41197	-4455.05891	-3.93216	-3.93216
161.50001	10936.47079	-4451.2942	-3.93216	-3.93216
162.00001	10924.2355	-4446.58832	-3.93216	-3.93216
162.50001	10910.11785	-4440.94126	-3.93216	-3.93216
163.00001	10895.52962	-4435.2942	-3.93216	-3.93216
163.50001	10880.94138	-4429.17655	-3.93216	-3.93216
164.00001	10866.35314	-4423.52949	-3.93216	-3.93216
164.50001	10852.2355	-4417.88244	-3.93216	-3.93216
165.00001	10838.58844	-4412.23538	-3.93216	-3.93216
165.50001	10825.41197	-4407.05891	-3.93216	-3.93216
166.00001	10812.70608	-4402.35302	-3.93216	-3.93216
166.50001	10800.94138	-4397.17655	-3.93216	-3.93216
167.00001	10789.64726	-4392.47067	-3.93216	-3.93216
167.50001	10778.35314	-4388.23538	-3.93216	-3.93216
168.00001	10768.0002	-4384.00008	-3.93216	-3.93216
168.50001	10758.11785	-4379.76479	-3.93216	-3.93216
169.00001	10748.2355	-4376.00008	-3.93216	-3.93216
169.50001	10738.82373	-4372.23538	-3.93216	-3.93216
170.00001	10729.88255	-4368.47067	-3.93216	-3.93216
170.50001	10721.41197	-4365.17655	-3.93216	-3.93216
171.00001	10712.94138	-4361.88243	-3.93216	-3.93216
171.50001	10704.94138	-4358.58832	-3.93216	-3.93216
172.00001	10697.41196	-4355.2942	-3.93216	-3.93216
172.50001	10689.88255	-4352.47067	-3.93216	-3.93216
173.00001	10682.35314	-4349.17655	-3.93216	-3.93216
173.50001	10675.29432	-4346.35302	-3.93216	-3.93216
174.00001	10668.70608	-4343.52949	-3.93216	-3.93216
174.50001	10662.11785	-4341.17655	-3.93216	-3.93216
175.00001	10655.52961	-4338.35302	-3.93216	-3.93216
175.50001	10649.41196	-4336.00008	-3.93216	-3.93216
176.00001	10643.29432	-4333.64714	-3.93216	-3.93216
176.50001	10637.17667	-4330.82361	-3.93216	-3.93216
177.00001	10631.52961	-4328.47067	-3.93216	-3.93216
177.50001	10625.88255	-4326.11773	-3.93216	-3.93216
178.00001	10620.23549	-4324.23537	-3.93216	-3.93216
178.50001	10615.05902	-4321.88243	-3.93216	-3.93216
179.00001	10609.41196	-4319.52949	-3.93216	-3.93216
179.50001	10604.23549	-4317.64714	-3.93216	-3.93216
180.00001	10599.52961	-4315.76479	-3.93216	-3.93216
180.50001	10594.35314	-4313.41185	-3.93216	-3.93216
181.00001	10589.64726	-4311.52949	-3.93216	-3.93216
181.50001	10584.94137	-4309.64714	-3.93216	-3.93216
182.00001	10580.23549	-4307.76479	-3.93216	-3.93216
182.50001	10576.0002	-4305.88243	-3.93216	-3.93216
183.00001	10571.29432	-4304.00008	-3.93216	-3.93216
183.50001	10567.05902	-4302.58832	-3.93216	-3.93216
184.00001	10562.82373	-4300.70596	-3.93216	-3.93216
184.50001	10558.58843	-4298.82361	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
185.00001	10554.35314	-4297.41185	-3.93216	-3.93216
185.50001	10550.58843	-4295.52949	-3.93216	-3.93216
186.00001	10546.35314	-4294.11773	-3.93216	-3.93216
186.50001	10542.58843	-4292.70596	-3.93216	-3.93216
187.00001	10538.82373	-4290.82361	-3.93216	-3.93216
187.50001	10535.05902	-4289.41184	-3.93216	-3.93216
188.00001	10531.29431	-4288.00008	-3.93216	-3.93216
188.50001	10527.52961	-4286.58832	-3.93216	-3.93216
189.00001	10524.23549	-4284.70596	-3.93216	-3.93216
189.50001	10520.47078	-4283.2942	-3.93216	-3.93216
190.00001	10517.17667	-4281.88243	-3.93216	-3.93216
190.50001	10513.41196	-4280.47067	-3.93216	-3.93216
191.00001	10510.11784	-4279.0589	-3.93216	-3.93216
191.50001	10506.82373	-4277.64714	-3.93216	-3.93216
192.00001	10503.52961	-4276.70596	-3.93216	-3.93216
192.50001	10500.23549	-4275.2942	-3.93216	-3.93216
193.00001	10497.41196	-4273.88243	-3.93216	-3.93216
193.50001	10494.11784	-4272.47067	-3.93216	-3.93216
194.00001	10490.82373	-4271.52949	-3.93216	-3.93216
194.50001	10488.0002	-4270.11773	-3.93216	-3.93216
195.00001	10484.70608	-4268.70596	-3.93216	-3.93216
195.50001	10481.88255	-4267.76479	-3.93216	-3.93216
196.00001	10479.05902	-4266.35302	-3.93216	-3.93216
196.50001	10476.23549	-4265.41184	-3.93216	-3.93216
197.00001	10473.41196	-4264.00008	-3.93216	-3.93216
197.50001	10470.58843	-4263.0589	-3.93216	-3.93216
198.00001	10467.7649	-4261.64714	-3.93216	-3.93216
198.50001	10464.94137	-4260.70596	-3.93216	-3.93216
199.00001	10462.11784	-4259.2942	-3.93216	-3.93216
199.50001	10459.7649	-4258.35302	-3.93216	-3.93216
200.00001	10456.94137	-4257.41184	-3.93216	-3.93216
200.50001	10454.11784	-4256.47067	-3.93216	-3.93216
201.00001	10451.7649	-4255.0589	-3.93216	-3.93216
201.50001	10448.94137	-4254.11773	-3.93216	-3.93216
202.00001	10446.58843	-4253.17655	-3.93216	-3.93216
202.50001	10444.23549	-4252.23537	-3.93216	-3.93216
203.00001	10441.41196	-4251.2942	-3.93216	-3.93216
203.50001	10439.05902	-4249.88243	-3.93216	-3.93216
204.00001	10436.70608	-4248.94126	-3.93216	-3.93216
204.50001	10434.35314	-4248.00008	-3.93216	-3.93216
205.00001	10432.0002	-4247.0589	-3.93216	-3.93216
205.50001	10429.64725	-4246.11773	-3.93216	-3.93216
206.00001	10427.29431	-4245.17655	-3.93216	-3.93216
206.50001	10424.94137	-4244.23537	-3.93216	-3.93216
207.00001	10422.58843	-4243.2942	-3.93216	-3.93216
207.50001	10420.70608	-4242.82361	-3.93216	-3.93216
208.00001	10418.35314	-4241.88243	-3.93216	-3.93216
208.50001	10416.00019	-4240.94126	-3.93216	-3.93216
209.00001	10414.11784	-4240.00008	-3.93216	-3.93216
209.50001	10411.7649	-4239.0589	-3.93216	-3.93216
210.00001	10409.41196	-4238.11773	-3.93216	-3.93216
210.50001	10407.52961	-4237.17655	-3.93216	-3.93216
211.00001	10405.17667	-4236.23537	-3.93216	-3.93216

Timp	Deplasări			
	Senzor *L*	Senzor *T*	Senzor *SU*	Senzor *SB*
s	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*
211.50001	10403.29431	-4235.76479	-3.93216	-3.93216
212.00001	10400.94137	-4234.82361	-3.93216	-3.93216
212.50001	10399.05902	-4233.88243	-3.93216	-3.93216
213.00001	10397.17667	-4232.94126	-3.93216	-3.93216
213.50001	10395.29431	-4232.47067	-3.93216	-3.93216
214.00001	10392.94137	-4231.52949	-3.93216	-3.93216
214.50001	10391.05902	-4230.58831	-3.93216	-3.93216
215.00001	10389.17666	-4230.11773	-3.93216	-3.93216
215.50001	10387.29431	-4229.17655	-3.93216	-3.93216
216.00001	10385.41196	-4228.23537	-3.93216	-3.93216
216.50001	10383.52961	-4227.76478	-3.93216	-3.93216
217.00001	10381.64725	-4226.82361	-3.93216	-3.93216
217.50001	10379.7649	-4225.88243	-3.93216	-3.93216
218.00001	10377.88255	-4225.41184	-3.93216	-3.93216
218.50001	10376.00019	-4224.47067	-3.93216	-3.93216
219.00001	10374.11784	-4224.00008	-3.93216	-3.93216
219.50001	10372.23549	-4223.0589	-3.93216	-3.93216
220.00001	10370.35314	-4222.58831	-3.93216	-3.93216
220.50001	10368.94137	-4221.64714	-3.93216	-3.93216
221.00001	10367.05902	-4221.17655	-3.93216	-3.93216
221.50001	10365.17666	-4220.23537	-3.93216	-3.93216
222.00001	10363.29431	-4219.76478	-3.93216	-3.93216
222.50001	10361.88255	-4218.82361	-3.93216	-3.93216
223.00001	10360.00019	-4218.35302	-3.93216	-3.93216
223.50001	10358.11784	-4217.41184	-3.93216	-3.93216
224.00001	10356.70608	-4216.94126	-3.93216	-3.93216
224.50001	10354.82372	-4216.00008	-3.93216	-3.93216
225.00001	10353.41196	-4215.52949	-3.93216	-3.93216
225.50001	10351.52961	-4215.0589	-3.93216	-3.93216
226.00001	10350.11784	-4214.11773	-3.93216	-3.93216
226.50001	10348.23549	-4213.64714	-3.93216	-3.93216
227.00001	10346.82372	-4212.70596	-3.93216	-3.93216
227.50001	10345.41196	-4212.23537	-3.93216	-3.93216
228.00001	10343.52961	-4211.76478	-3.93216	-3.93216
228.50001	10342.11784	-4210.82361	-3.93216	-3.93216
229.00001	10340.70608	-4210.35302	-3.93216	-3.93216
229.50001	10338.82372	-4209.88243	-3.93216	-3.93216
230.00001	10337.41196	-4209.41184	-3.93216	-3.93216
230.50001	10336.00019	-4208.47067	-3.93216	-3.93216
231.00001	10334.11784	-4208.00008	-3.93216	-3.93216
231.50001	10332.70608	-4207.52949	-3.93216	-3.93216
232.00001	10331.29431	-4207.0589	-3.93216	-3.93216
232.50001	10329.88255	-4206.11773	-3.93216	-3.93216
233.00001	10328.47078	-4205.64714	-3.93216	-3.93216
233.50001	10327.05902	-4205.17655	-3.93216	-3.93216
234.00001	10325.17666	-4204.70596	-3.93216	-3.93216
234.50001	10323.7649	-4203.76478	-3.93216	-3.93216
235.00001	10322.35313	-4203.2942	-3.93216	-3.93216
235.50001	10320.94137	-4202.82361	-3.93216	-3.93216
236.00001	10319.5296	-4202.35302	-3.93216	-3.93216
236.50001	10318.11784	-4201.41184	-3.93216	-3.93216
237.00001	10316.70608	-4200.94126	-3.93216	-3.93216
237.50001	10315.29431	-4200.47067	-3.93216	-3.93216
238.00001	10313.88255	-4200.00008	-3.93216	-3.93216
238.50001	10312.47078	-4199.52949	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
239.00001	10311.05902	-4198.58831	-3.93216	-3.93216
239.50001	10310.11784	-4198.11773	-3.93216	-3.93216
240.00001	10308.70608	-4197.64714	-3.93216	-3.93216
240.50001	10307.29431	-4197.17655	-3.93216	-3.93216
241.00001	10305.88255	-4196.70596	-3.93216	-3.93216
241.50001	10304.47078	-4196.23537	-3.93216	-3.93216
242.00001	10303.5296	-4195.76478	-3.93216	-3.93216
242.50001	10302.11784	-4195.2942	-3.93216	-3.93216
243.00001	10300.70607	-4194.82361	-3.93216	-3.93216
243.50001	10299.29431	-4194.35302	-3.93216	-3.93216
244.00001	10297.88255	-4193.88243	-3.93216	-3.93216
244.50001	10296.94137	-4192.94125	-3.93216	-3.93216
245.00001	10295.5296	-4192.47067	-3.93216	-3.93216
245.50001	10294.11784	-4192.00008	-3.93216	-3.93216
246.00001	10292.70607	-4191.52949	-3.93216	-3.93216
246.50001	10291.7649	-4191.0589	-3.93216	-3.93216
247.00001	10290.35313	-4190.58831	-3.93216	-3.93216
247.50001	10288.94137	-4190.11773	-3.93216	-3.93216
248.00001	10288.00019	-4189.64714	-3.93216	-3.93216
248.50001	10286.58843	-4189.17655	-3.93216	-3.93216
249.00001	10285.64725	-4188.70596	-3.93216	-3.93216
249.50001	10281.88255	-4187.2942	-3.93216	-3.93216
250.00001	10253.17666	-4175.52949	-3.93216	-3.93216
250.50001	10176.94137	-4144.00008	-3.93216	-3.93216
251.00001	10049.88254	-4091.76478	-3.93216	-3.93216
251.50001	9876.70607	-4020.70596	-3.93216	-3.93216
252.00001	9660.23547	-3931.76478	-3.93216	-3.93216
252.50001	9401.88253	-3825.41184	-3.93216	-3.93216
253.00001	9138.35311	-3717.64713	-3.93216	-3.93216
253.50001	8876.70605	-3610.35301	-3.93216	-3.93216
254.00001	8602.82369	-3497.88242	-3.93216	-3.93216
254.50001	8330.3531	-3386.353	-3.93216	-3.93216
255.00001	8030.58839	-3263.52947	-3.93216	-3.93216
255.50001	7690.35308	-3124.70594	-3.93216	-3.93216
256.00001	7288.94131	-2960.47064	-3.93216	-3.93216
256.50001	6718.58836	-2728.00005	-3.93216	-3.93216
257.00001	6002.35305	-2436.23534	-3.93216	-3.93216
257.50001	5295.05892	-2147.76475	-3.93216	-3.93216
258.00001	4714.82362	-1910.58827	-3.93216	-3.93216
258.50001	4277.64714	-1731.76474	-3.93216	-3.93216
259.00001	3919.0589	-1585.41179	-3.93216	-3.93216
259.50001	3605.17654	-1458.35297	-3.93216	-3.93216
260.00001	3347.29418	-1353.41179	-3.93216	-3.93216
260.50001	3153.88241	-1274.82355	-3.93216	-3.93216
261.00001	3020.70594	-1220.70591	-3.93216	-3.93216
261.50001	2927.05888	-1182.58826	-3.93216	-3.93216
262.00001	2830.58829	-1143.05884	-3.93216	-3.93216
262.50001	2713.41182	-1096.00002	-3.93216	-3.93216
263.00001	2595.29417	-1048.47061	-3.93216	-3.93216
263.50001	2480.47063	-1002.35296	-3.93216	-3.93216
264.00001	2350.11769	-950.11766	-3.93216	-3.93216
264.50001	2212.23534	-895.05884	-3.93216	-3.93216
265.00001	2089.88239	-846.11766	-3.93216	-3.93216

Timp	Deplasări			
	Senzor *L*	Senzor *T*	Senzor *SU*	Senzor *SB*
s	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*	*μm/m*
265.50001	1975.52945	-800.00001	-3.93216	-3.93216
266.00001	1839.05886	-745.88237	-3.93216	-3.93216
266.50001	1689.4118	-685.64707	-3.93216	-3.93216
267.00001	1553.88238	-631.52942	-3.93216	-3.93216
267.50001	1449.88238	-589.64707	-3.93216	-3.93216
268.00001	1378.35297	-560.4706	-3.93216	-3.93216
268.50001	1325.1765	-538.82354	-3.93216	-3.93216
269.00001	1273.41179	-518.11766	-3.93216	-3.93216
269.50001	1222.58826	-497.41177	-3.93216	-3.93216
270.00001	1178.82355	-479.52942	-3.93216	-3.93216
270.50001	1134.58826	-461.64707	-3.93216	-3.93216
271.00001	1071.52943	-436.2353	-3.93216	-3.93216
271.50001	992.9412	-404.70589	-3.93216	-3.93216
272.00001	903.05884	-368.4706	-3.93216	-3.93216
272.50001	810.82354	-331.29412	-3.93216	-3.93216
273.00001	729.41178	-298.35295	-3.93216	-3.93216
273.50001	659.76472	-270.11765	-3.93216	-3.93216
274.00001	594.35295	-242.82353	-3.93216	-3.93216
274.50001	535.05883	-218.35295	-3.93216	-3.93216
275.00001	488.4706	-198.58824	-3.93216	-3.93216
275.50001	453.17648	-183.52942	-3.93216	-3.93216
276.00001	425.41177	-171.76471	-3.93216	-3.93216
276.50001	402.82354	-162.35294	-3.93216	-3.93216
277.00001	386.35295	-155.76471	-3.93216	-3.93216
277.50001	375.05883	-151.05883	-3.93216	-3.93216
278.00001	368.4706	-147.76471	-3.93216	-3.93216
278.50001	363.29412	-145.41177	-3.93216	-3.93216
279.00001	358.11765	-143.05883	-3.93216	-3.93216
279.50001	352.47059	-141.17647	-3.93216	-3.93216
280.00001	348.70589	-139.29412	-3.93216	-3.93216
280.50001	346.35295	-138.35294	-3.93216	-3.93216
281.00001	345.88236	-137.88236	-3.93216	-3.93216
281.50001	345.88236	-137.88236	-3.93216	-3.93216
282.00001	346.82354	-137.88236	-3.93216	-3.93216
282.50001	347.29412	-137.88236	-3.93216	-3.93216
283.00001	347.76471	-137.88236	-3.93216	-3.93216
283.50001	347.76471	-137.88236	-3.93216	-3.93216
284.00001	347.76471	-137.88236	-3.93216	-3.93216
284.50001	347.76471	-137.41177	-3.93216	-3.93216
285.00001	347.76471	-137.41177	-3.93216	-3.93216
285.50001	346.82354	-136.94118	-3.93216	-3.93216
286.00001	345.41177	-136.47059	-3.93216	-3.93216
286.50001	343.52942	-136.94118	-3.93216	-3.93216
287.00001	339.76471	-140.2353	-3.93216	-3.93216
287.50001	318.11765	-138.35294	-3.93216	-3.93216
288.00001	271.52942	-127.05883	-3.93216	-3.93216
288.50001	214.58824	-111.05883	-3.93216	-3.93216
289.00001	164.2353	-96	-3.93216	-3.93216
289.50001	127.05883	-84.70588	-3.93216	-3.93216
290.00001	101.64706	-76.70588	-3.93216	-3.93216
290.50001	85.17647	-71.52941	-3.93216	-3.93216
291.00001	74.82353	-68.2353	-3.93216	-3.93216
291.50001	69.64706	-66.82353	-3.93216	-3.93216
292.00001	66.82353	-65.88235	-3.93216	-3.93216
292.50001	64.94118	-65.88235	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
293.00001	64	-65.41177	-3.93216	-3.93216
293.50001	63.52941	-65.41177	-3.93216	-3.93216
294.00001	62.58824	-64.94118	-3.93216	-3.93216
294.50001	62.11765	-64.47059	-3.93216	-3.93216
295.00001	61.64706	-64.47059	-3.93216	-3.93216
295.50001	61.17647	-64	-3.93216	-3.93216
296.00001	60.70588	-64	-3.93216	-3.93216
296.50001	60.2353	-63.52941	-3.93216	-3.93216
297.00001	59.76471	-63.52941	-3.93216	-3.93216
297.50001	59.76471	-63.05882	-3.93216	-3.93216
298.00001	59.29412	-63.05882	-3.93216	-3.93216
298.50001	58.82353	-62.58824	-3.93216	-3.93216
299.00001	58.35294	-62.58824	-3.93216	-3.93216
299.50001	58.35294	-62.11765	-3.93216	-3.93216
300.00001	57.88235	-62.11765	-3.93216	-3.93216
300.50001	57.41177	-62.11765	-3.93216	-3.93216
301.00001	57.41177	-61.64706	-3.93216	-3.93216
301.50001	56.94118	-61.64706	-3.93216	-3.93216
302.00001	56.47059	-61.17647	-3.93216	-3.93216
302.50001	56.47059	-61.17647	-3.93216	-3.93216
303.00001	56	-60.70588	-3.93216	-3.93216
303.50001	55.52941	-60.70588	-3.93216	-3.93216
304.00001	55.52941	-60.70588	-3.93216	-3.93216
304.50001	55.05882	-60.2353	-3.93216	-3.93216
305.00001	55.05882	-60.2353	-3.93216	-3.93216
305.50001	54.58824	-60.2353	-3.93216	-3.93216
306.00001	54.11765	-59.76471	-3.93216	-3.93216
306.50001	54.11765	-59.76471	-3.93216	-3.93216
307.00001	53.64706	-59.76471	-3.93216	-3.93216
307.50001	53.64706	-59.29412	-3.93216	-3.93216
308.00001	53.17647	-59.29412	-3.93216	-3.93216
308.50001	52.70588	-59.29412	-3.93216	-3.93216
309.00001	52.70588	-59.29412	-3.93216	-3.93216
309.50001	52.2353	-58.82353	-3.93216	-3.93216
310.00001	52.2353	-58.82353	-3.93216	-3.93216
310.50001	51.76471	-58.82353	-3.93216	-3.93216
311.00001	51.76471	-58.82353	-3.93216	-3.93216
311.50001	51.29412	-58.35294	-3.93216	-3.93216
312.00001	49.88235	-58.35294	-3.93216	-3.93216
312.50001	47.05882	-57.88235	-3.93216	-3.93216
313.00001	43.29412	-57.41177	-3.93216	-3.93216
313.50001	40.47059	-56.94118	-3.93216	-3.93216
314.00001	40.47059	-56.94118	-3.93216	-3.93216
314.50001	41.41177	-56.94118	-3.93216	-3.93216
315.00001	42.82353	-57.41177	-3.93216	-3.93216
315.50001	44.23529	-57.41177	-3.93216	-3.93216
316.00002	43.29412	-56.94118	-3.93216	-3.93216
316.50002	41.88235	-56.94118	-3.93216	-3.93216
317.00002	40.94118	-56.94118	-3.93216	-3.93216
317.50002	41.88235	-56.94118	-3.93216	-3.93216
318.00002	43.29412	-57.41177	-3.93216	-3.93216
318.50002	45.17647	-57.88235	-3.93216	-3.93216
319.00002	46.11765	-57.88235	-3.93216	-3.93216

Timp *s*	Deplasări			
	Senzor *L* *μm/m*	**Senzor *T*** *μm/m*	**Senzor *SU*** *μm/m*	**Senzor *SB*** *μm/m*
319.50002	47.05882	-57.88235	-3.93216	-3.93216
320.00002	47.52941	-57.88235	-3.93216	-3.93216
320.50002	47.52941	-57.88235	-3.93216	-3.93216
321.00002	47.52941	-57.88235	-3.93216	-3.93216
321.50002	47.52941	-57.88235	-3.93216	-3.93216
322.00002	47.52941	-57.88235	-3.93216	-3.93216
322.50002	47.52941	-57.41177	-3.93216	-3.93216
323.00002	47.05882	-57.41177	-3.93216	-3.93216
323.50002	47.05882	-57.41177	-3.93216	-3.93216
324.00002	46.58824	-57.41177	-3.93216	-3.93216
324.50002	46.11765	-57.41177	-3.93216	-3.93216
325.00002	45.64706	-56.94118	-3.93216	-3.93216
325.50002	45.17647	-56.94118	-3.93216	-3.93216
326.00002	45.17647	-56.94118	-3.93216	-3.93216
326.50002	44.70588	-56.94118	-3.93216	-3.93216
327.00002	44.70588	-56.94118	-3.93216	-3.93216
327.50002	44.23529	-56.94118	-3.93216	-3.93216
328.00002	44.23529	-56.94118	-3.93216	-3.93216

Curriculum Vitae

INFORMAŢII PERSONALE

Cazangiu Diana Cătălina

G-ral Mociulschi, 5, Brașov, 500146, România

+40 368447229 +40 727337857

diana.cazangiu75@gmail.com

Skype diana.cazangiu

Sexul Femeie | Data naşterii 06/06/1975 | Naţionalitatea română

STUDIILE PENTRU CARE SE CANDIDEAZĂ

INGINER MECATRONIST

EXPERIENŢA PROFESIONALĂ

2000 - 2015

Tehnician

Universitatea Transilvania din Brașov, Brașov, Eroilor 29, 500036, www.unitbv.ro

- Asistarea profesorilor la orele de laborator;
- Elaborarea documentelor necesare pentru cercetare și activitatea de predare.

Tipul sau sectorul de activitate Educatie

01.03.2012 – 31.05.2012

Inginer stagiar

LMS International, Leuven, Belgia

- Stagiu de cercetare pentru proiectul de disertație;
- Tema de cercetare: ”*Investigarea MSBE pentru proiectarea rețelei electrice a unui avion*”

Tipul sau sectorul de activitate: Cercetare

EDUCAŢIE ŞI FORMARE

2012 – în prezent

Inginer doctorand

Universitatea Transilvania din Brașov, România

Facultatea de Design de Produs și Mediu

Domeniul general de cercetare: Inginerie Mecanică

- Tema de cercetare: “*Studii și cercetări privind detectarea defectelor la structuri*”;
- Domeniul de cercetare specific: Monitorizarea sănătății structurilor din Industria aerospațială;
- Activități specifice realizate: modelarea CAD a unei pale de elicopter, analiza structurală (cu elemente finite) a palei utilizând două cicluri mari de solicitare (cazul zbor la punct fix, cazul de zbor cu înaintare).
- Activități complementare realizate: Predarea orelor de laborator la disciplina “Programarea calculatoarelor și limbaje de programare – C++”.
- Activități specifice propuse: proiectarea și implementarea unui algoritm care să poată fi utilizat la sistemele de monitorizare a sănătății structurilor (Structural Health Monitoring). Acest algoritm ar trebui să detecteze apariția microfisurii, să o localizeze și să calculeze timpul rămas până la cedarea completă a structurii/epruvetei.

2010 - 2012

Diplomă de absolvire a ciclului de Master în Sisteme Mecatronice

Universitatea Transilvania din Brașov, România

Facultatea de Design de Produs și Mediu

Specializarea: Sisteme mecatronice în industrie și medicină

- Principalele materii studiate: analiza cu element finit, Achiziția și procesarea semnalelor și instrumentație virtuală

2006 - 2010

Diploma de absolvire a ciclului de licență în Mecatronică

Universitatea Transilvania din Brașov, România

Facultatea de Inginerie mecanică

Specializarea: Mecatronică

- Principalele discipline studiate : Analiza și procesarea semnalelor, Microcontrolere, Senzori si traductoare, mecatronica automobilului, Programarea calculatoarelor și limbaje de programare

COMPETENTE PERSONALE

Limba(i) maternă(e): Română

Alte limbi străine cunoscute

	INTELEGERE		VORBIRE		SCRIERE
	Ascultare	Citire	Participare la conversaţie	Discurs oral	
• Engleză	B2	B2	B2	B2	B2
	• Scrieţi denumirea certificatului. Scrieţi nivelul, dacă îl cunoaşteţi.				
• Franceză	A1	A1	A1	A1	A1
	• Scrieţi denumirea certificatului. Scrieţi nivelul, dacă îl cunoaşteţi.				

- Niveluri: A1/2: Utilizator elementar - B1/2: Utilizator independent - C1/2: Utilizator experimentat
- Cadrul european comun de referinţă pentru limbi străine

Competenţe de comunicare

- bune competenţe de comunicare

Competenţe organizaţionale/manageriale

- Munca în echipă și colaborare, Inițiativă și proactivitate.

Competenţe informatice

- Abilități excelente de operare în Windows și Linux;
- Bune abilități în operarea cu uneltele Microsoft Office™ ;
- Bune abilități în proiectarea sistemelor electrice în: AMESym, Eagle, Proteus, Multisim, SysDM and System Synthesis;
- Bune abilități și experiență în programarea grafică: LabVIEW;
- Abilități bune în operarea cu Matlab – Simulink;
- CAD și analiză cu element finit: Catia v5 R18, v5 R19, Ansys;
- Elemente de C++ (Codelite, CodeBlocks).

Permis de conducere: Nu

Curriculum Vitae

PERSONAL INFORMATION Diana Catalina CAZANGIU

5, G-ral Mociulschi, Brasov, 500146, Romania

+40 368447229 +40 727337857

diana.cazangiu75@gmail.com

Skype diana.cazangiu

Sex Female | Date of birth 06/06/1975 | Nationality Romanian

STUDIES APPLIED FOR Studies applied for Engineer in Mechatronics

WORK EXPERIENCE

2000 - 2015

Technician

Transilvania University of Brasov

- The assisting to the professors at the laboratory classes;
- The elaboration of the documents necessary for the research and teaching activity.

Business or sector Education

01.03.2012 – 31.05.2012

Trainee Engineer

LMS International – Leuven, Belgium (actual Siemens Industry Software)

- Research stage for master thesis;
- Research topic: "Investigate MBSE for the design of an aircraft electrical network"

Business or sector Research Company

EDUCATION AND TRAINING

2012 – at present

PhD student

Transilvania University of Brasov, Country: Romania, City: Brasov

Faculty of Product Design and Environment

General Research Area: Mechanical Engineering

- Research Topic: "Studies and Researches regarding to the Damages Detection at Structures";
- Specific Research Area: Structural Health Monitoring in Aerospace Engineering;
- Teaching of laboratory classes at the discipline "The computers programming and programming languages – C++".

2010 - 2012

Engineer degree in Mechatronics Systems (Master)

Transilvania University of Brasov, Country: Romania, City: Brasov

Faculty of Product Design and Environment

Specialization: Mechatronics Systems in Engineering and Medicine

- The principal subjects covered: Finite Element Analysis, Signal Acquisition and Processing and Virtual Instrumentation, Advanced Systems of Car Mechatronics, Sensors and Transducers

2006 - 2010

Engineer degree in Mechatronics

Transilvania University of Brasov, Country: Romania, City: Brasov

Faculty of Mechanical Engineering

Specialization: Mechatronics

- The principal subjects covered : Signal Processing and Analysing, Microcontrollers, Sensors and Transducers, Car Mechatronics, C++ language programming

PERSONAL SKILLS

Mother tongue(s) Romanian

Other language(s)

	UNDERSTANDING		SPEAKING		WRITING
	Listening	Reading	Spoken interaction	Spoken production	
• English	B2	B2	B2	B2	B2
• Spanish	A2	A2	A2	A2	A2
• French	A1	A1	A1	A1	A1

1. Levels: A1/2: Basic user - B1/2: Independent user - C1/2 Proficient user
2. Common European Framework of Reference for Languages

Communication skills
- good communication skills

Organisational / managerial skills
- Teamwork and Collaboration, Initiative and Proactivity, Achievement Orientation

Computer skills
- Working on Windows and Linux;
- good command of Microsoft Office™ tools;
- good command of Electrical Engineering Design: AMESym, Eagle, Proteus, Multisim, SysDM and System Synthesis;
- good command and experience of graphical programming: LabVIEW;
- good command of Matlab – Simulink;
- CAD and Finite Elements Analysis: Catia v5 R18, v5 R19, Ansys;
- C++ language programming.

Driving licence
- No

UNIVERSITE TRANSYLVANIA
ROUMANIE

UNIVERSITE DE LIMOGES
FRANCE

Diana Cătălina CAZANGIU

CARACTERISATION DES PROCESSUS D'ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE FIBRES DE CARBONE

- Résumé de la thèse -

Directeur de thèse de l'Université Transilvania Brașov, Roumanie :

Prof. Ileana-Constanța ROȘCA

Directeurs de thèse de l'Université de Limoges, France :

M.d.C. Hdr Ioan Octavian POP

2015

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu avoir lieu sans aide et soutien de nombreuses personnes ; la liste est longue et j'espère ne pas en oublier trop.

Je tiens à exprimer premièrement ma gratitude au Professeur Ileana Rosca et au M.d.C. Hdr Ioan Octavian POP, mes directeurs de thèse. Je les remercie pour leur soutien, aussi bien sur le plan scientifique que personnel, ainsi que pour le temps qu'ils m'ont consacré pendant la durée de la thèse.

Je remercie aux Professeurs Luciana Cristea, Sorin Zamfira, aux lecteurs Barbu Braun et Cornel Drugă de Département DPMM, Université Transilvania de Brasov, ainsi qu'aux enseignants – chercheurs et aux personnel technique de l'Université de Limoges pour l'accueil, leur soutien et l'aide valeureux fourni pendant mon stage de thèse.

Je souhaite aussi remercier aux professeurs qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de cette thèse et à tous les membres de m'avoir fait l'honneur d'accepter de siéger au jury de soutenance.

Je suis en particulier reconnaissante au dr. Cotfas Petru du Département d'Electronique et ordinateurs pour son aide dans le domaine spécifique tout au long de la recherche.

Un grand merci également au personnel des Ecoles doctorales de l'université Transilvania de Brasov et de Limoges pour le support et pour le financement de mes études.

J'exprime enfin ma plus grande reconnaissance à ma famille qui a toujours été d'un grand soutien moral tout au long de ces années d'études.

Je souhaite remercier aussi à tous ceux qui m'ont soutenu dans cette période difficile et à tous qui, directement ou indirectement, m'ont aidé pendant mon activité de thèse.

SOMMAIRE

Sommaire 1

Cap. **1. Introduction** 3

Cap. **2. Étude bibliographique concernant le dépistage des défauts dans les structures** 4

Cap. **3. Objectifs de la thèse** 5

Cap. **4. Contributions à la modélisation et à la simulation des structures** 7

4.1. Choix des structures pour les applications 7

4.2. Modélisation des structures 8

4.3. Simulation des réponses des structures analysées 8

4.4. Résultats. Discutions 11

4.4.1. Résultats FEM pour le régime de vol stationnaire (hovering–grounding) 11

4.4.2. Résultats de l'analyse FEM pour le régime de vol avec avancement (v=220 km/h) 12

4.4.3. Résultats de l'analyse FEM pour la pale reculant α=0,51° (F = 3800 N) 12

4.4.4. Résultats de l'analyse FEM pour la pale en avance α = 2,34° (F=3800 N) 13

4.4.5. Résultats de l'analyse FEM pour le cas pale-rotor arrêtés (chargement propre poids) 13

4.4.6. Résultats de l'analyse comparative pour les cas de sollicitation appliqués 13

4.4.7. Résultats pour le cas de simulation de la sollicitation de l'éprouvette de fléchissement en quatre points 17

Cap. **5. Contributions expérimentales** 18

5.1. Introduction 18

5.2. Conception de l'expérimentation 18

5.2.1. Choix de la structure 18

5.2.2. Choix de la méthode expérimentale 19

5.2.3. Description de l'installation expérimentale 19

5.2.4. Conditions ambiantes 21

5.3. Acquisition des données expérimentales 21

5.3.1. Tests de fléchissement en quatre points par des jauges électriques résistives 21

5.3.2. Tests de fléchissement en quatre points par des transducteurs acoustiques 24

5.3.3. Tests de tractions avec des jauges électriques résistives 25

5.4. Traitement des données 26

5.4.1. Traitement des données obtenues par tests de fléchissement en quatre points avec des jauges électriques résistives 26

5.4.2. Traitement des données obtenues par tests de fléchissement en quatre points avec des transducteurs acoustiques 26

5.4.3. Traitement des données obtenues par tests de traction 29

5.5. Résultats. Discutions. Conclusions 30

5.5.1. Résultats des tests de fléchissement en quatre points avec des jauges électriques résistives 30
5.5.2. Résultats des tests de fléchissement en quatre points avec des transducteurs acoustiques 31
5.5.3. Résultats des tests de traction 31
5.5.4. Analyse des résultats des tests par thermographie infrarouge 32
5.6. Analyse multicritères à base des solutions sélectionnées pour la comparaison des trois systèmes sélectionnés de détection des défauts 33
5.6.1. Établissement des critères 34
5.6.2. Détermination du poids de chaque critère 34
5.6.3. Identifications de toutes variantes 34
5.6.4. Allocation des qualificatifs 35
5.6.5. Calcul des produits entre les qualificatifs *N* et les coefficients de poids 35
5.6.6. Discutions 36
Cap. **6. Conclusions finales. Contributions originelles. Valorisation des résultats. Directions de développement de la recherche** 39
6.1. Conclusions finales 39
6.2. Contributions personnelles et originelles 42
6.3. Valorisation des résultats 43
6.4. Directions de développement de la recherche 44
Bibliographie sélective 45

CHAPITRE **1**

INTRODUCTION

La détection et l'évaluation des défauts est un processus utilisé afin d'estimer la durée de vie restante d'une structure dont la performance doit persister au-delà du temps établi au début. Le concept de *Surveillance de l'Intégrité des Structures* (Structural Health Monitoring – SHM) concerne le diagnostic de l'état d'intégrité des matériaux constituantes d'une structure. Cet état peut être altéré en temps par des multiples facteurs comme : l'usure de la structure due à la fatigue des matériaux, l'action des paramètres de l'environnement, ainsi que l'apparition des évènements accidentelles.

Partant de ces considérations, la thèse doctorale intitulée *Caractérisation des processus d'endommagement des matériaux composites à base de fibres de carbone* propose de développer une étude originelle, avec du potentiel dans la création d'un système optimale pour la détection des défauts des matériaux composites depuis la phase initiale. Le travail suit systématiquement un parcours de recherche théorique et expérimentale. Il débute de la générale – l'étude des méthodes de dépistage des défauts connues et utilisées en présent il continue par l'étude des senseurs et des systèmes de senseurs pouvant être intégrés dans les matériaux composites, principallement de ceux utilisés en industrie. Les expérimentations effectuées utilisent trois méthodes differentes de détection des défauts et, finalement, est élaborée une analyse multicritères pour identifier la méthode optimale de détection des défauts qui pourrait être utilisée pour le contrôle et, aussi, pour la suivi en temps réel.

Le mémoire de recherche est structuré en **six chapitres**, débutant avec une introduction dans le sujet abordé et se finalise par la présentation systémique des conclusions générales et la description des contributions originales de l'auteur.

Dans le premier chapitre, *Introduction*, est présentée l'importance et l'actualité de la recherche pour l'industrie. Le deuxième chapitre – *Etude bibliographique dans le domaine de recherche* est dédié aux méthodes de détection des défauts et d'analyse de la qualité du fonctionnement et à la description détaillée du concept de Surveillance de l'Intégrité des Structures.

Les *Objectifs de la recherche doctorale,* ainsi que la motivation du thème de recherche sont présentés dans le chapitre trois.

Le quatrième chapitre, *Contributions à la modélisation et à la simulation des structures*, contient sept sous chapitres et contient les suivantes phases de recherche théorique :

- analyse des plaques stratifiées composites planes rectangulaires;
- simulation du comportement du matériau composite stratifié armé avec fibre carbone sous conditions de chargement en fléchissement en quatre points ;
- comportement mécanique d'une pale d'hélicoptère léger dans des différents scenarios de simulation du vol (stationnaire, en avancement, sous le propre poids).

Le cinquième chapitre – *Contributions expérimentales* est divisé en trois sous-chapitres dont le deuxième est dédié à la conception de l'expérimentation afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du composite stratifié armé aux fibres carbone sous deux sollicitations : fléchissement en quatre points et traction, par trois méthodes - tensométrie électro résistive, acoustique et thermographie infrarouge. Tous les essayes ont été effectuées sur les installations du *Groupe d'Etude de Matériaux Hétérogènes* appartenant au département *Génie Civil d'Egletons* de l'université de Limoges.

Les conclusions de la recherche théorique et expérimentale, les éléments d'originalité et les contributions de l'auteur de la thèse doctorale se retrouvent dans le chapitre six. Dans le même chapitre sont mises en évidence les publications dans les documents des manifestations scientifiques et dans des revues de spécialité élaborées par l'auteur dans le domaine de la thèse.

Août, 2015 Auteur

CHAPITRE **2**

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT LE DEPISTAGE DES DEFAUTS DANS LES STRUCTURES

Depuis toujours, les scientifiques envisagent de développer des instruments et des systèmes complexes, capables de surveiller et d'évaluer une structure à grand risque sans lui affecter la construction ou son fonctionnement.

A base des recherches théoriques et/ou expérimentales dans le processus de surveillance de la qualité des structures (Structural Health Monitoring – SHM) se retrouvent le savoir-faire et l'expertise dans le domaine du comportement mécanique et thermique des structures industrielles.

Le défaut est la principale cause d'endommagement structurale qui se manifeste souvent dans l'intérieur des structures. Les dernières décennies, une attention particulière a été accordée à la conception des technologies qui assure l'intégrité des composantes en utilisant la détection des défauts des structures dès leur début. En plus, la technologie SHM basée sur le contrôle des vibrations des structures a fait l'objet des recherches du monde entier afin de concevoir des équipements efficaces, d'une grande importance dans l'industrie aéronautique, ainsi qu'en ingénierie mécanique. Premièrement, presque dans chaque domaine industriel, ont été effectués des essayes pour la détection des défauts dans les structures, la plus précoce possible. Une série de motivations comme la sécurité en fonctionnement des structures et la réduction des coûts de maintenance ont déterminé l'implémentation des systèmes SHM dans les applications de l'ingénierie aéronautique et civile.

Même si le développement d'un système SHM optimal a rencontré des certains problèmes, globalement, c'est à signaler des différentes méthodes d'intégration des systèmes sensoriels dans les composantes des avions, ces expérimentations étant encore d'actualité dans l'industrie aérospatiale. Le développement signifiant de ces technologies met ensemble des résultats multidisciplinaires : la dynamique structurelle, traitement du signal, systèmes sensoriels avancés, dispositifs hardware, télémétrie, matériaux avancés et, aussi, la reconnaissance statistique des caractéristiques spécifiques. De plus, sont connus des efforts de corréler tous ces technologies afin de développer une solution complète, intégrée de système SHM.

Dans l'aéronautique, un système SHM est seulement un concept et il implique de détecter automatique les défauts, diagnostiquer, prévoir, ainsi que l'atténuation des certaines évènement adverse qui pourraient apparaître du à la dysfonction des composantes d'un navire. Ceci peut être réalisé par l'acquisition des données en temps réel d'un réseau de senseurs et par l'utilisation des algorithmes avancés de prédiction, implémentés dans les logiciels de l'avion. Globalement, le problème de la conception des systèmes SHM est considérablement complexe et nécessite l'existence des systèmes sensoriels très efficaces et durables qui pourraient être intégrés dans la structure dès sa conception.

Les systèmes SHM sont utilisés également dans les structures mécaniques, éléctriques, hydraulique etc. La surveillance du fonctionnement des structures fait référence aux aspects de l'intégrité fonctionnelle mais, aussi, à la suivi en temps réel de la propagation des défauts et à l'évaluation de la durrée de vie restante de la structure.

CHAPITRE 3

OBIECTIFS DE LA THESE

La recherche cette thèse doctorale a été proposée et initiée du à l'importance de l'identification des défauts internes des matériaux composites par des méthodes modernes, avec le but de créer des matériaux nouveaux qui pourraient intégrer technologie sensorielle. La thèse s'est proposé une synthèse des méthodes utilisées à présent dans le dépistage des défauts, basée sur des références de spécialité et sur l'identification d'une méthode optimale susceptible d'être appliquée aux matériaux composites dans l'industrie. L'évaluation et la connaissance en temps réel de l'intégrité des structures est un objectif très important pour l'industrie.

Le thème de recherche se retrouve dans les tendances actuelles en ce qui concerne le développement des systèmes performantes pour le dépistage des défauts structurels qui peuvent identifier et localiser le défaut depuis son début et, ainsi, arrêtant sa propagation dans le matériau.

Comme a été montré déjà dans le chapitre précédent, une des raisons d'approche des recherches pour l'identification d'un système optimal de surveillance de l'intégrité structurale est l'amélioration de la sécurité des structures. L'identification d'un défaut à son début peut mener à la sauvegarde de la structure même et, aussi, de la vie des personnes. Une autre raison importante est soutenue par la motivation économique. De la figure 3.1 on peut observer, pour les structures avec des systèmes intégrés de dépistage des défauts, les coûts d'entretien et la fiabilité sont maintenus constants, alors que pour les structures classiques, les coûts d'entretien augmentent et la fiabilité décroît.

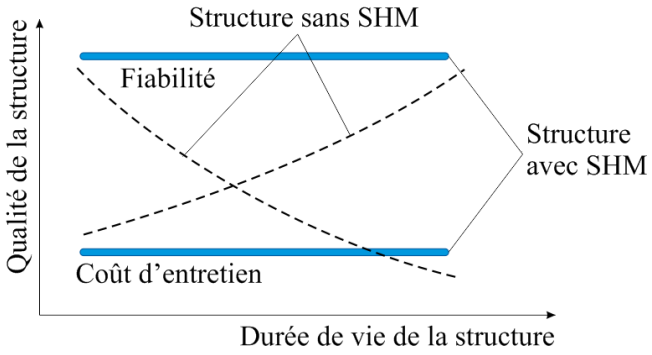


Fig. 3.1. Motivation économique de l'intégration des systèmes modèrnes dedépistage des défauts.

Le but principal de la recherche doctorale envisage le développement d'un système intégré de détection des défauts internes basé sur les méthodes sensorielles modernes. Pour atteindre ce but, ont été établis quatre objectifs majeurs.

Le premier objectif consiste à effectuer une étude systémique des méthodes d'analyse de la qualité et de l'intégrité des structures, connues jusqu'à présent ; par trois directions de recherche :

- l'étude des méthodes actuelles de dépistage des défauts dans l'industrie ;
- l'étude des méthodes d'analyse des structures utilisées dans les grandes corporations industrielles ;
- l'étude du concept de surveillance de l'intégrité des structures (Structural Health Monitoring – SHM) implémenté en présent spécialement dans l'industrie aérospatiale.

Le deuxième objectif consiste en l'élaboration d'une méthode théorique d'analyse du comportement des matériaux composites stratifiés armés avec des fibres carbone dans la structure d'une pale d'hélicoptère léger. Afin d'atteindre cet objectif, s'impose les activités suivantes :

- l'étude des phénomènes aérodynamiques du vol d'un hélicoptère ;

- la modélisation géométrique de la pale d'hélicoptère en fonction de la documentation spécifique ;
- la simulation du comportement de la pale d'hélicoptère en utilisant des différents scénarios de vol : stationnaire, avec avancement etc. :
- la simulation du comportement mécanique d'une éprouvette en matériau composite stratifié armé avec des fibres carbon sous la sollicitation de fléchissement en quatre points.

Le troisième objectif consiste en l'élaboration d'une stratégie expérimentale pour étudier le comportement mécanique sous les sollicitations de traction et de fléchissement en utilisant trois méthodes connues de dépistage des défauts. Pour résoudre cet objectif, ont été envisagées les suivantes activités :

- des tests de fléchissement d'une éprouvette en matériau composite stratifié armé avec fibres carbone par l'application des jauges afin de déterminer les déformations ;
- des tests de fléchissement d'une éprouvette en matériau composite stratifié armé avec fibres carbone par des senseurs acoustiques afin de déterminer les défauts intérieurs ;
- destests de fléchissement d'une éprouvette en matériau composite stratifié armé avec fibres carbone par thermographie infrarouge afin de détecter le champ de température à la surface de l'éprouvette ;
- l'analyse et l'interprétation statistique des résultats.

Le quatrième objectif a été d'identifier une méthode optimale de dépistage du défaut dans le matériau composite par l'analyse multi critère avancée pour les trois méthodes de dépistage étudiées.

CHAPITRE 4

CONTRIBUTIONS A LA MODELISATION ET A LA SIMULATION DES STRUCTURES

4.1. CHOIX DES STRUCTURES POUR LES APPLICATIONS

Compte tenu du fait qu'un des objectifs de cette thèse est de déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux composites stratifiés à base de fibre de carbone, dans la première phase a été analysée une éprouvette en matériau composite stratifié sous la sollicitation de fléchissement en quatre points.

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de ce matériau composite stratifié, a été conçu le modèle géométrique d'une éprouvette en dix couches de fibre carbone avec l'épaisseur de 0,87 mm, orientés unidirectionnel, sous un angle de 45° (-45°). Les dimensions de gabarit des éprouvettes sont : l = 248,62 mm, b = 20,29 mm et h = 8,79 mm, leur forme étant représenté schématiquement dans la figure 4.1.

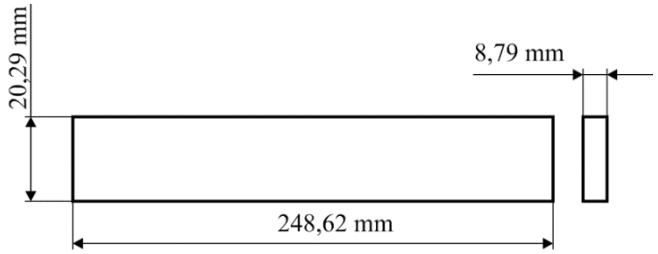


Fig. 4.1. Dimensions principales de l'éprouvette en matériau composite.

Pour déterminer le comportement mécanique des applications dans l'aérospatiale, en différentes conditions de sollicitation, l'option était pour la modélisation et pour l'analyse structurelle d'une pale d'hélicoptère léger.

Les données sur la forme constructive et pour la géométrie de la pale ont été extraites des standards techniques de spécialité [EDH, 1976]. Pour le cas d'espèce, la longueur de la pale a été de 6648 mm. La figure 4.2 illustre la géométrie et, aussi, les dimensions principales de la pale d'hélicoptère.

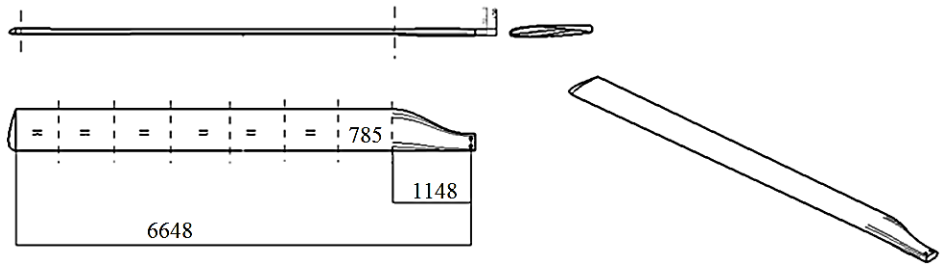


Fig. 4.2. Géométrie et dimensions de la pale d'hélicoptère.

On a considéré que la pale est formée, constructivement, de quatre composantes principales : longeron (élément de support), mousse (élément de remplissage), couverture et cylindre. Les matériaux et leurs caractéristiques ont été extraits des standards techniques de spécialité [EDH, 1976] et [CMH, 2002].

4.2. MODELISATION DES STRUCTURES

Prenant comme base les caractéristiques de matériau présentées dans la section précédente, le modèle géométrique de l'éprouvette a été élaboré directement dans le logiciel d'analyse avec élément finie Hypermesh/Hyperworks. Le matériau a été considéré comme stratifié et symétrique. La structure de l'éprouvette en matériau composite laminé est présentée dans la figure 4.3.

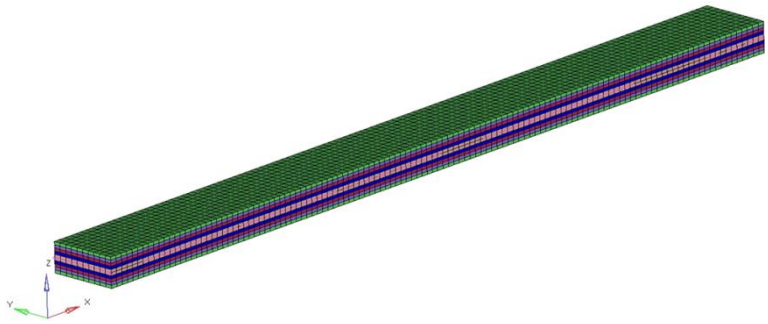


Fig. 4.3. Le modèle géométrique de l'éprouvette en fibre de carbone.

Dû au fait que la pale d'hélicoptère est une structure complexe, avec des profils difficilement à représenter par les commandes usuelles de conception assistée, sa modélisation géométrique a été réalisée par le logiciel spécialisé de conception assistée Catia V5R19, en utilisant le module *Surfaces* pour ses surfaces. A la fin, après la transformation de la structure en surface en corps solide, le modèle géométrique 3D de la pale a été obtenu, comme celui de la figure 4.4.

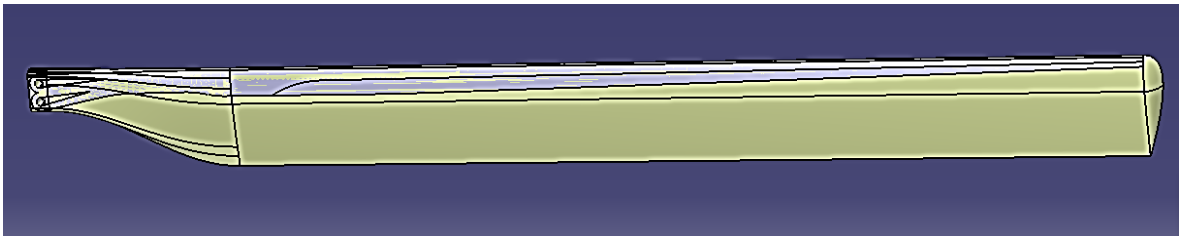


Fig. 4.4. Modèle 3D de la pale d'hélicoptère.

4.3. SIMULATION DES REPONSES DES STRUCTURES ANALYSEES

Dans la partie introductive a été précisé que l'étape de prétraitement de l'analyse avec élément fini consiste en trois opérations principales :

- ✓ discrétisation de la structure;
- ✓ établissement des conditions limite (introduction des encastrements dans le système);
- ✓ précision des chargements sur la structure.

Dans ce cas, pour l'analyse avec élément fini, ont été utilisés les logiciels spécifiques HyperMesh & Radioss.

Pour le cas de l'éprouvette considérée, celle-ci a été discrétisée en 66 éléments de type *shell*. La force de chargement était la force réelle (obtenue par des tests physiques de fléchissement des différentes éprouvettes), appliquée sur les 66 nœuds, en résultant une force de 59,8 N sur chacun d'eux (fig. 4.5).

La simulation du comportement de l'éprouvette en matériau composite stratifié s'est réalisée en considérant le cas classique du fléchissement en quatre points.

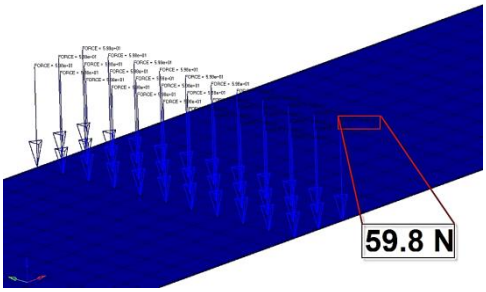


Fig. 4.5. Application de la force distribuée sur les nœuds.

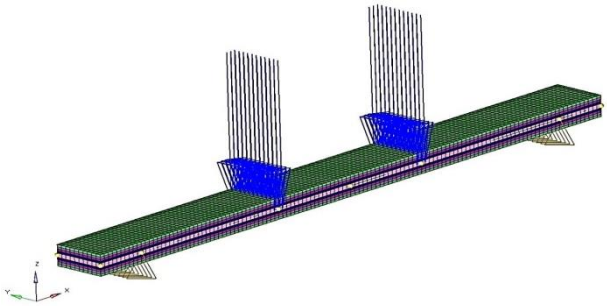


Fig. 4.6. Application des chargements et établissement des conditions limite.

Dans la figure 4.6 sont illustrées les étapes d'introduction des chargements, ainsi que l'établissement des conditions limite nécessaires pour toute analyse avec des éléments finis. On a considéré que l'éprouvette est sollicitée par deux forces concentrées.

L'introduction des contraintes géométriques/mécaniques a été réalisée d'après le modèle présenté dans la figure 4.7 :

- ✓ dans les points de support *A* et *B* ont été bloquées les translations sur l'axe *OY* et aussi sur l'axe *OZ*;
- ✓ dans les points de support *A* et *B* ont été bloquées les rotations autour l'axe *OY* et autour de l'axe *OZ*.

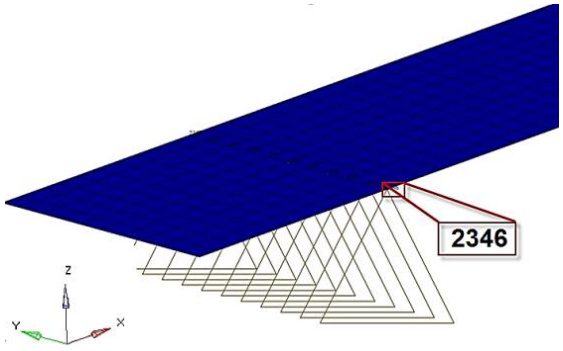


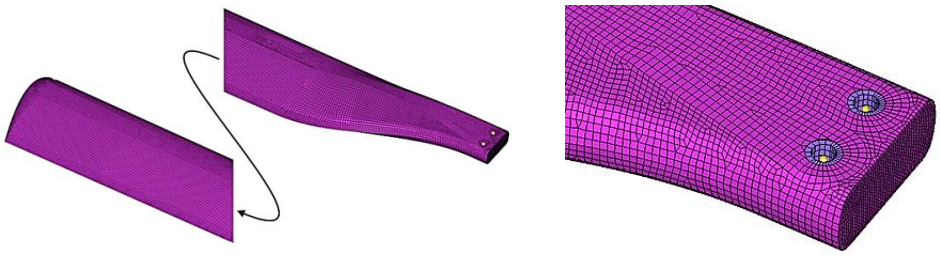
Fig. 4.7. L'établissement des conditions de liaison (introduction des contraintes géométriques/mécaniques dans le système).

Parce qu'il s'agit d'un système complexe, pour la discrétisation de la pale d'hélicoptère a été utilisée une combinaison entre des éléments de type QUAD (shell) – pour la couverture et des types HEXA et TETRA (solide) pour le longeron et la mousse. Les dimensions choisies des éléments étaient de 12 mm. Pour la modélisation de la couverture ont été aussi utilisés 16 couches de 0,16 mm chacune.

Dans la figure 4.8 est présenté le modèle discrétisé de la pale étudiée sur toute sa longueur (a) et aussi en détail dans la zone d'encastrement du longeron (b).

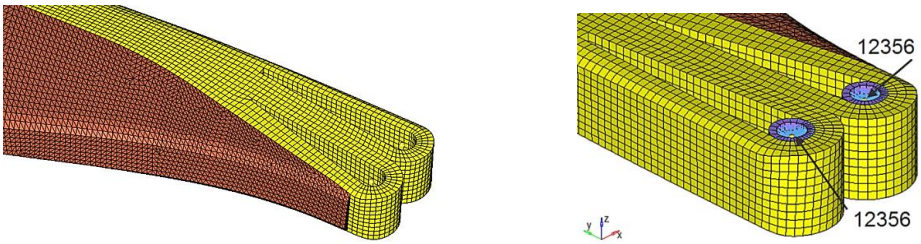
L'établissement des conditions limite a supposé l'introduction des contraintes géométriques/mécaniques dans la structure de la pale d'hélicoptère. Ainsi, on a considéré que la pale sera encastrée dans la zone des cylindres (où elle est accrochée au rotor), l'autre but restant libre.

Dans la figure 4.9 est représenté le mode d'introduction des contraintes géométriques/mécaniques dans la zone des cylindres.



a) b)

Fig. 4.8. Discrétisation de la pale d'hélicoptère : sur toute sa longueur (a); dans la zone d'encastrement du longeron (b).



a) b)

Fig. 4.9. Introduction des contraintes géométriques/mécaniques pour la zone d'encastrement : profile de la zone d'encastrement (a); contraintes introduites dans le longeron dans la zone des cylindres.

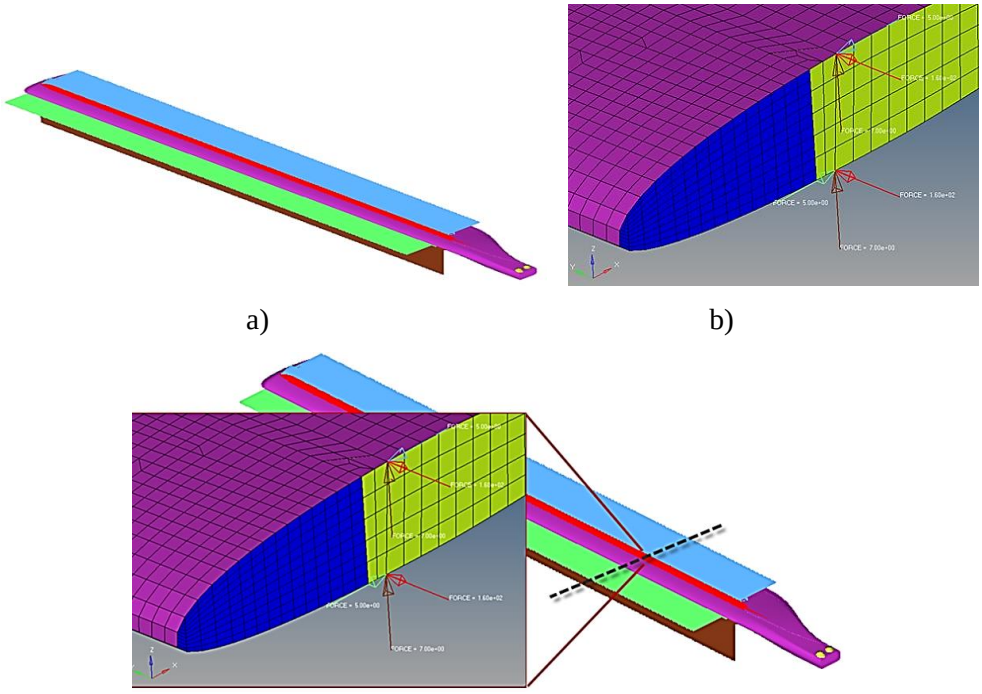
Les contraintes dans les deux cylindres ont été réalisés par l'intermédiaire des éléments rigides de type RBE2 (Rigid body elements), comme dans la figure 4.9, b. la rotation autour de l'axe *OX* est restée libre. L'introduction des chargements dans le système a consisté en l'identification des types de forces et couples qui agissent sur la pale dans un cas réel, leur calcul et leur application sur le modèle 3D de la structure de la pale. Les caractéristiques aérodynamiques nécessaires aux calcules ont été extraites de la documentation technique spécifique [EDH, 1976]. A base des formules aérodynamiques de la littérature [Postelnicu et al. 2001], la distribution des vitesses et des forces sur chaque élément ont été calculés.

Pour le cas de l'analyse structurelle, la portance, la résistance à l'avancement et la force centrifuge ont été appliquées comme des forces distribuées sur le nombre des nœuds de chaque segment de la pale sur l'extrados et aussi sur intrados (la distance par rapport au bord d'attaque étant considérée égale à 25 % de la longueur de la corde), comme dans la figure 4.10, a. Le couple aérodynamique, représenté par un couple mécanique de forces, a été appliqué sur les mêmes nœuds que les autres chargements, conformément à la figure 4.10, b.

Les cas de calcul final a été considéré comme la combinaison de tous les chargements (la portance plus la force centrifuge, plus le couple aérodynamique), comme on peut observer dans la figure 4.10, c.

Dans l'analyse structurelle de la pale d'hélicoptère ont été considérés deux cas :

- ✓ premier cas pour le régime stationnaire – *Hovering – Grounding* durant lequel l'hélicoptère se maintient dans un point fixe (il plane) ; le vol étant sans avancement et caractérisé par $v = 0$;
- ✓ deuxième cas pour le vol avec avancement - *pale en avance, pale reculant*, durant lequel l'hélicoptère vole avec une vitesse de v = 220 km/h et les pales ont un mouvement de rotation en plan horizontal.



a) b)

c)

Fig. 4.10. Les chargements appliquées sur la pale d'hélicoptère : les directions de chargements (a) ; les chargements appliquées sur la pale (couple aérodynamique) (b) ; détail avec tous les chargements (la portance plus la force centrifuge, plus le couple aérodynamique) appliquées sur la pale (c).

4.4. RESULTATS. DISCUTIONS

4.4.1. Résultats FEM pour le régime de vol stationnaire (hovering–grounding)

Dans la figure 4.11 est illustré la distribution des valeurs des déplacements maximales totales au long de la pale. On peut observer que le déplacement maximale est positionné à l'extrémité libre de la pale et ayant une valeur de 226 mm. Conformément à la même figure, à l'extrémité encastrée n'existe pas de déplacement.

D'habitude, pendant un cycle de sollicitation à la fatigue, apparaissent non seulement des déplacements mais aussi des déformations et différentes contraintes.

Dans ce sens, la figure 4.12 présent schématiquement, la distribution des valeurs de la déformation locale sur le longeron – l'élément qui a les plus grandes déformations. Comme on peut observer, la zone de déformation maximale apparaît dans la partie intérieure latérale de la région d'encastrement.

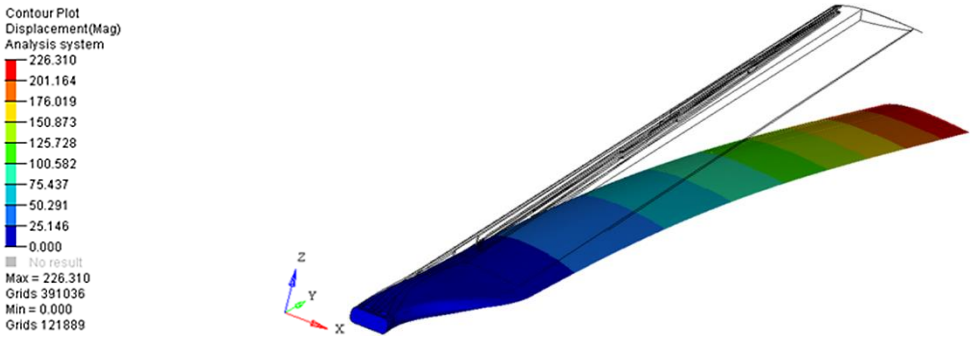


Fig. 4.11. Déplacement maximale totale δ = 226 mm (déplacement scalée).

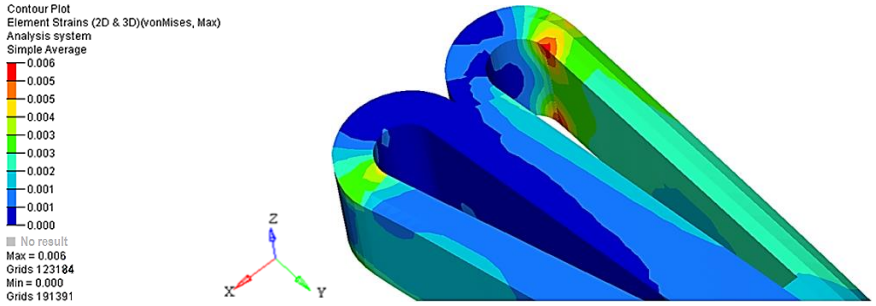


Fig. 4.12. Déformation locale sur le longeron (ε = 0,006%).

La carte de la distribution von Misses est illustrée dans la figure 4.13 et on observe que la valeur maximale de la contrainte est de 78 N/mm^2, ce qui signifie que la structure présente une bomme rigidité.

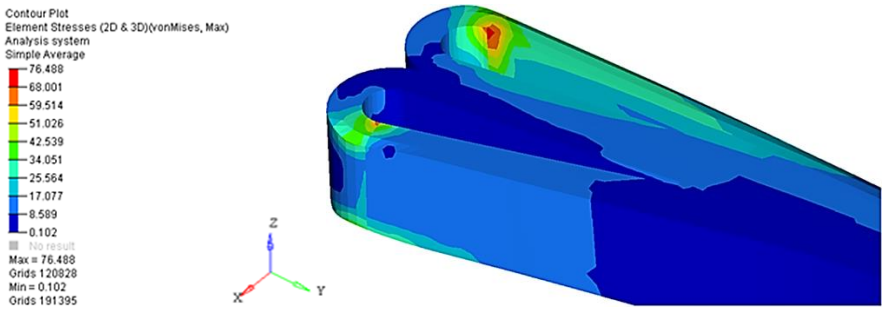


Fig. 4.13. Contrainte von Mises maximale sur le longeron (σ = 78 N/mm^2).

4.4.2. Résultats de l'analyse FEM pour le régime de vol avec avancement (vitesse *v*=220 km/h)

Par vol avec avancement est, généralement accepté ce régime de vol qui implique une translation de l'appareil entier. Dans le cas de l'analyse linéaire-élastique de la pale, la suivante hypothèse de calcul a été considéré : afin d'obtenir l'équilibre des forces agissant sur la pale en avance et aussi sur celle reculant, des différents valeurs, positives et négatives, du pas angulaire ont été calculées. Les calculs ont été effectués en utilisant les formules extraites de la documentation de spécialité.

4.4.3. Résultats de l'analyse FEM pour la pale reculant α=0,51° (F = 3800 N)

Dans le cas de l'analyse linéaire-élastique de la pale, les simulations ont été effectuées sur la pale en avance et aussi sur celle reculant avec un chargement maximale de 3800 N. Ainsi, la carte des contraintes von Misses maximales est celle illustrée dans la figure 4.14. Il est observable sur l'image qu'on peut identifier une très petite zone de contraintes critiques sur le latéral intérieure du longeron.

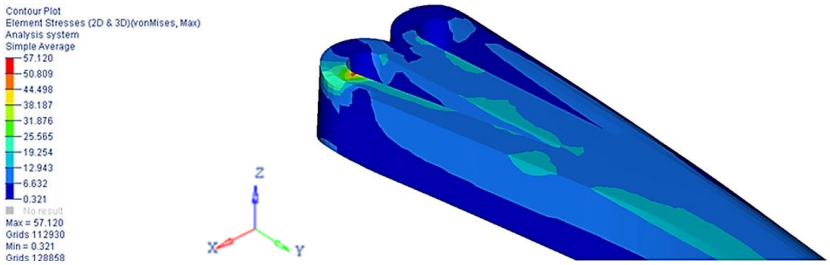


Fig. 4.14. Les contraintes von Misses maximales sur le longeron (σ = 57 N/mm^2).

4.4.4. Résultats de l'analyse FEM pour la pale en avance α=2,34° (F = 3800 N)

Dans le cas de la pale en avance, les résultats concernant les valeurs des contraintes sont plus grands d'une manière signifiante. La figure 4.15 illustre la distribution des contraintes von Misses maximales sur le longeron, à l'extrémité d'encastrement. La zone critique est aussi positionnée sur le côté latéral intérieur du longeron, alors que la contrainte maximale atteint la valeur de 198 N/mm^2.

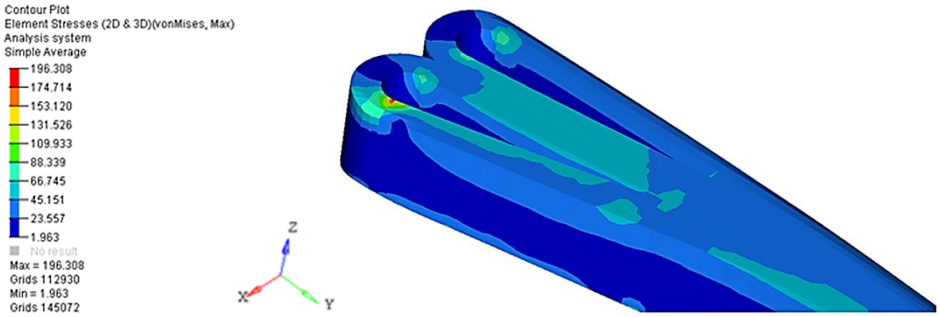


Fig. 4.15. Contrainte von Misses maximale sur le longeron (σ = 198 N/mm^2).

4.4.5. Résultats de l'analyse FEM pour le cas pale-rotor arrêtés (chargement du propre poids)

Une simulation du comportement de la pale d'hélicoptère pour les cas où elle est chargée seulement par le propre poids a été réalisée et les résultats ne sont pas critiques, les contraintes maximales apparaissent seulement dans la zone des cylindres (la zone d'accrochage sur le rotor).

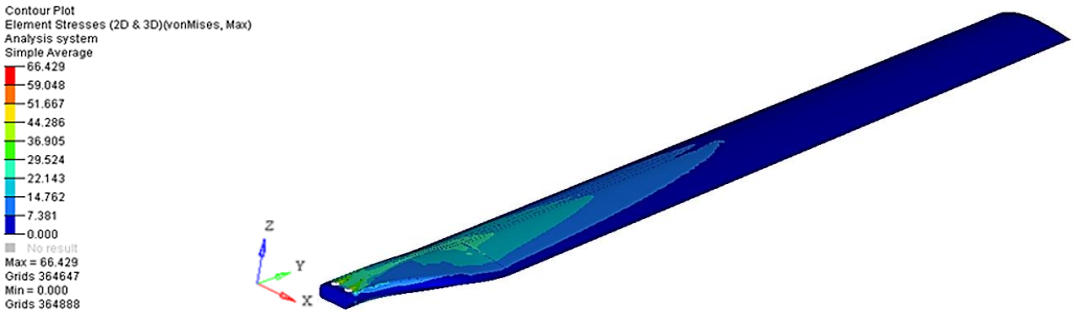


Fig. 4.16. Contrainte maximale sur la pale σ = 66 N/mm^2.;

4.4.6. Résultats de l'analyse comparative pour les cas de sollicitation appliqués

A la suite de l'analyse FEM pour les deux régimes de vol –stationnaire et avec avancement, ont été obtenues des séries des résultats numériques des contraintes maximales qui sont réunies dans le Tableau 4.1. Sur ces résultats a été effectuée une analyse comparative pour les quatre cas étudiés : stationnaire, sous le chargement de la masse propre, pour la pale en avance et pour la pale reculant. A base des valeurs du Tableau 4.1 a résulté le graphique de représentation comparative de la variation de la contrainte équivalente maximale pour les quatre cas de sollicitation : 01 - vol stationnaire, 02 - sous le chargement du propre poids, 03 - pour la pale en avance et 04 - pour la pale reculant. La représentation graphique est réalisée par le logiciel spécifique aux calculs MATLAB (MATrix LABoratory), en utilisant des routines spécifiques (fig. 4.17). En analysant le graphique on observe que sur la couverture (marquée en

rouge) se développent des contraintes beaucoup plus grandes que celle au niveau du longeron (couleur bleu), les valeurs maximales se manifestant dans le cas de la pâle en avance.

Tableau 4.1. Valeurs de la contrainte équivalente pour les quatre cas étudiés.

CAS	Contrainte maximales sur :	
	la ***couverture*** *MPa*	le ***longeron*** *MPa*
01. Vol stationnaire	387	76
02. Sous le chargement du propre poids	66	10
03. Pale en avance	830	196
04. Pale reculant	215	57

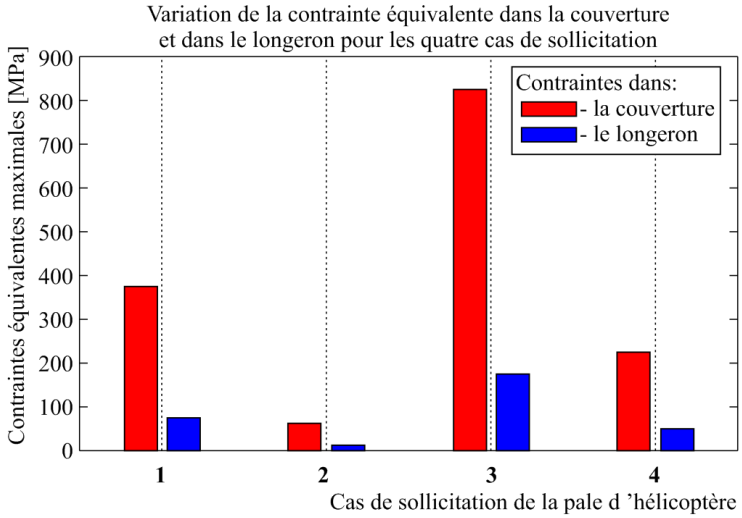
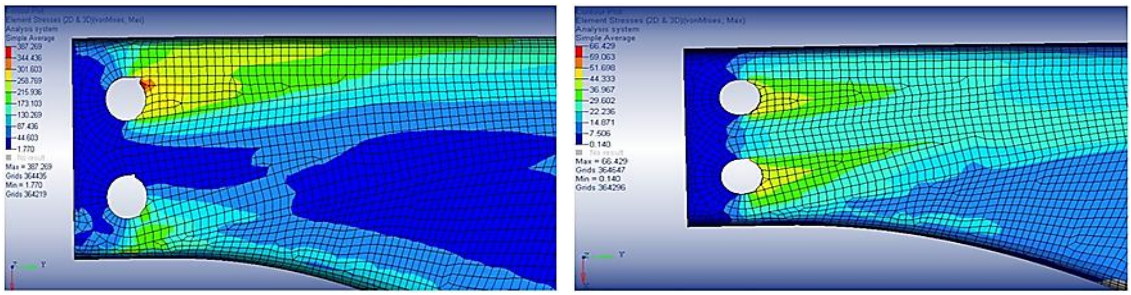


Fig. 4.17. Variation des contraintes équivalentes dans la couverture et dans le longeron.

Par conséquence, dans la figure 4.18 on a figuré la variation des contraintes équivalentes sur la couverture dans la zone de cylindres pour le cas de vol stationnaire (a) et pour le cas du chargement avec le propre poids (b). Dans le cas du vol stationnaire est possible d'identifier une zone critique très petite dans la zone des cylindres, ayant les valeurs maximales de la contrainte de 367 N/mm^2. Conformément à l'image, dans le cas du chargement par le propre poids, il n'y a pas des contraintes critiques.

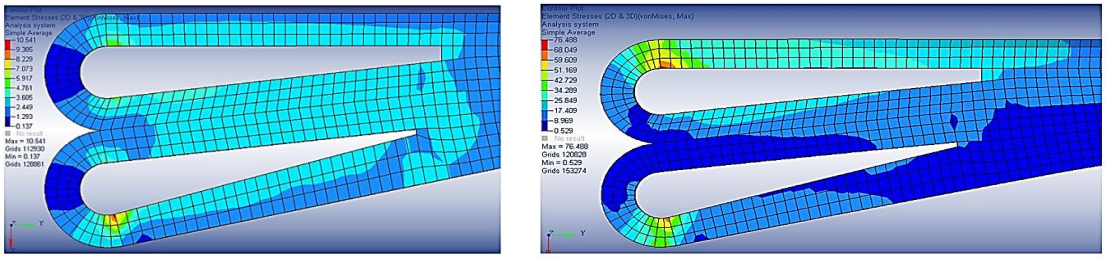


a) b)

Fig. 4.18. Variation des contraintes équivalentes sur *la couverture* pour : vol stationnaire (a) ; sous le chargement par le propre poids (b).

La figure 4.19 présente une analyse comparative entre les valeurs des contraintes équivalentes sur le longeron dans la zone d'encastrement, pour le cas du vol stationnaire (a) et

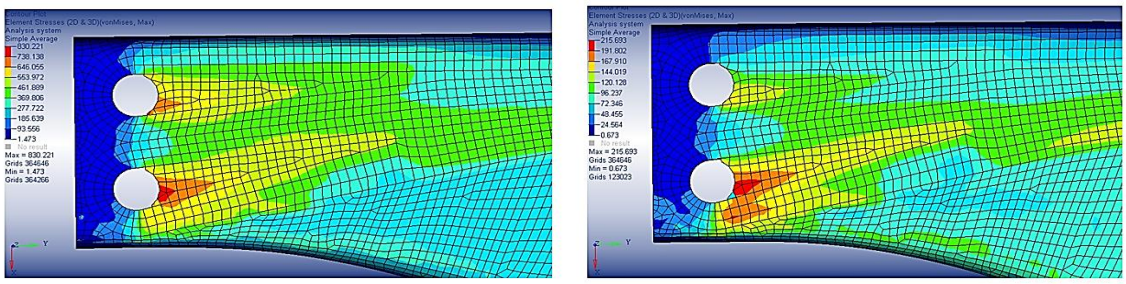
pour le cas du chargement avec le poids propre (b). Dans ce cas comparatif, les contraintes équivalentes avec des grandes valeurs se manifestent sous le chargement avec le poids propre (σ_{ech} = 76 N/mm^2). Pour le vol stationnaire, les contraintes critiques se développent aussi mais leurs valeurs montent seulement jusqu'à 11 N/mm^2.



a) b)

Fig. 4.19. Variation des contraintes équivalentes sur *le longeron* pour : vol stationnaire (a) ; sous le chargement par le poids propre (b).

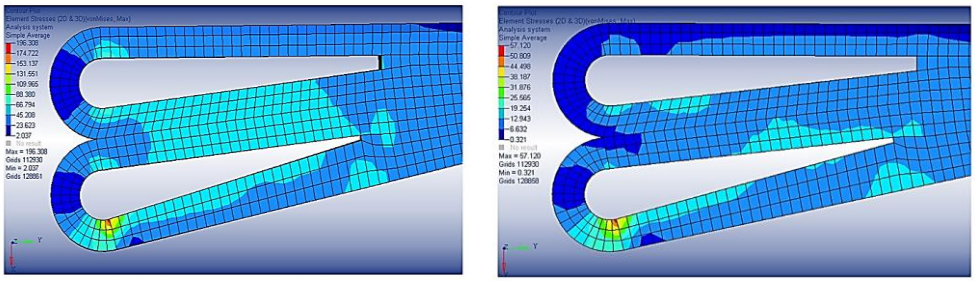
L'analyse comparative entre les résultats obtenus pour la pale en avance et reculant est illustrée dans les figures 4.20 et 4.21. Dans la figure 4.20 où sont représentées les contraintes équivalentes sur la couverture, dans la zone des cylindres, on peut observer que dans le cas de la pale en avance les valeurs critiques de la contrainte équivalente sont beaucoup plus hautes (σ_{ech} = 830 N/mm^2) que celle pour la pale reculant (σ_{ech} = 216 N/mm^2). Pour les deux situations, les zones critiques sont positionnées dans la région des cylindres.



a) b)

Fig. 4.20. Variation des contraintes équivalentes sur *la couverture* pour la pale : en avance (a) ; reculant (b).

Dans la figure 4.21 est présentée la variation des contraintes équivalentes sur le longeron, dans la zone d'encastrement pour les deux cas étudiés. Aussi, dans ce cas d'analyse comparative, on observe que les contraintes critiques plus grandes se retrouvent sur la pale en avance (σ_{ech} = 196 N/mm^2), la pale reculant développant des contraintes critiques plus réduites (σ_{ech} = 57 N/mm^2).



a) b)

Fig. 4.21. Variation des contraintes équivalentes sur *le longeron* pour la pale : en avance (a) ; reculant (b).

A base des résultats numériques obtenus de l'analyse FEM pour les deux régimes de vol, ont été effectués de calculs concernant les différences entre les contraintes en traction et en compression pour les cas de la pale en avance et reculant, ainsi que le cas de vol au point fixe et le vol sous le poids propre. Les résultats sont centralisés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2. Résultats des différences entre les contraintes pour les cas étudiés.

CAS	Couverture				Longeron			
	σ_1	σ_3	Δ_1	Δ_3	σ_1	σ_3	Δ_1	Δ_3
01. Pale en avancement 6°	725	- 551	521	494	87	-165	66	118
02. Pale reculant 2,5°	204	-57			21	- 47		
03. Vol au point fixe	285	-192	235	152	67	-46	59	38
04. Vol sous poids propre	50	-40			8	-8		

En utilisant les valeurs du Tableau 4.2 ont résulté les graphiques de variation des contraintes de traction et de compression sur le longeron et aussi au niveau de la couverture pour les quatre cas de sollicitation : 1 - pale en avancement, 2 – pale reculant, 3 – vol stationnaire (au point fixe) et 4 – vol sous propre poids. Dans la figure 4.22 est comparativement illustrée la variation des contraintes de traction sur la couverture et sur le longeron dans les quatre cas de sollicitation. On peut observer que les contraintes les plus grandes apparaissent dans le cas de la pale en avancement et le minimum est rencontré pour le vol sous propre poids. Conformément à la représentation graphique ; les valeurs des contraintes développées sur la couverture sont plus grandes que celles sur le longeron.

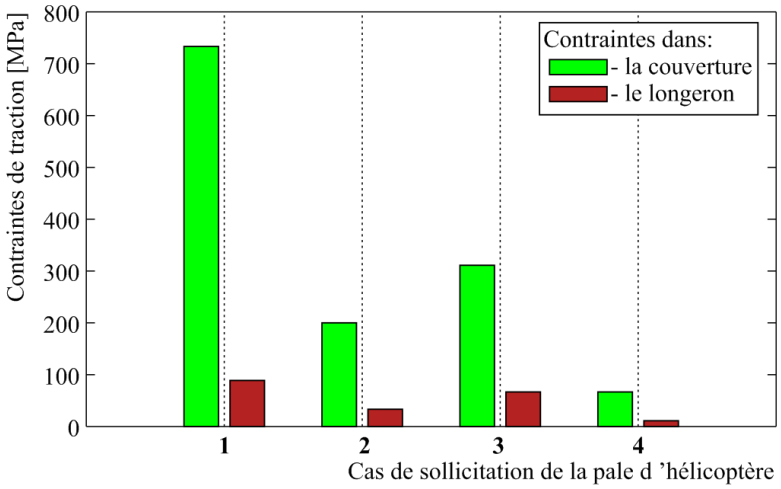


Fig. 4.22. Variation des contraintes σ_1 sur la couverture et le longeron pour les 4 cas de sollicitation.

Pour ce cas, pour le dessin du graphique a été aussi utilisée une routine de programmation MATLAB ayant comme base la forme matricielle des valeurs.

La variation des contraintes de compression sur le longeron est présentée dans la figure 4.23 qui indique que les contraintes maximales se développent dans le cas de la pale en avancement et que le niveau minimal apparaît dans les cas du chargement par propre poids. Les plus hautes valeurs sont pour la couverture.

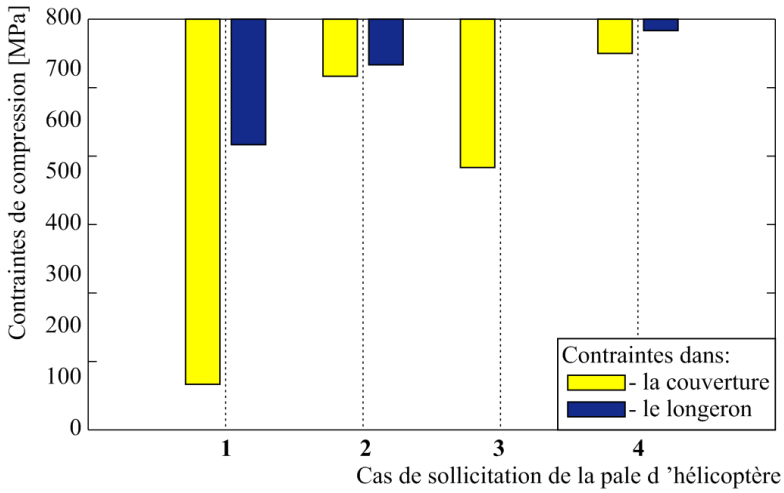


Fig. 4.23. Variation des contraintes σ_3 sur la couverture et le longeron pour les 4 cas de sollicitation.

4.4.7. Résultats pour le cas de simulation de la sollicitation de l'éprouvette de fléchissement en quatre points

De la figure 4.24 on peut observer que la déformation maximale se manifeste au milieu de la longueur de l'éprouvette et elle a eu une valeur de 17,205 mm pour la force de rupture de F = 3949 N. il faut mentionner que dans la simulation ont été utilisées les données extraites des résultats de l'expérimentation réel pour la force de rupture et, aussi, pour les propriétés du matériau.

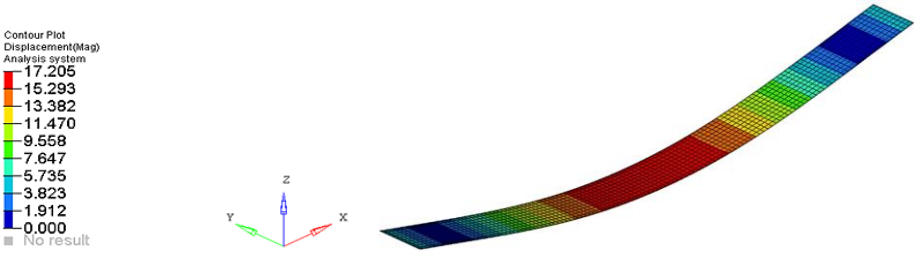


Fig. 4.24. La carte des déformations pour l'éprouvette en composite stratifié.

La figure 4.25 illustre la carte des contraintes von Misses pour l'éprouvette sollicitée. Il est visible que les contraintes maximales de fléchissement se manifestent dans la zone centrale de l'éprouvette sollicitée (là où sont positionnés les éléments de sollicitation). Une valeur de 528,733 MPa a été obtenue, étant légèrement plus haute que la valeur de la contrainte obtenue expérimentalement.

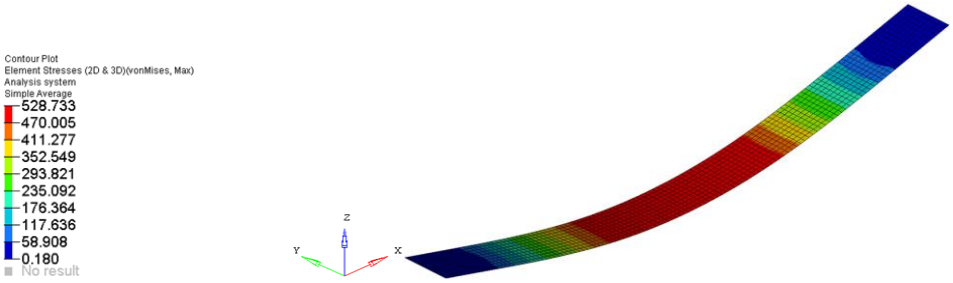


Fig. 4.25. La carte des contraintes von Misses au niveau macroscopique.

CHAPITRE 5.

CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES

5.1. INTRODUCTION

Afin de déterminer la réponse du système de dépistage des défauts dans des différentes conditions de sollicitation, ont été effectuées des séries d'essayes en utilisant trois techniques différentes de dépistage : des jauges résistives, la méthode acoustique et la thermographie infra rouge (IR). Dans ce but, deux types d'essayes mécaniques ont été effectuées :

- ✓ tests de fléchissement en quatre points ;
- ✓ tests de traction composée.

Des éprouvettes en matériau composite stratifié armé avec de fibre carbone ont été soumises aux deux types de tests. Le matériau choisi est celui qui, de par sa résistance et légèreté, est souvent utilisé dans la construction des structures aérospatiales mais aussi pour des différentes composantes d'automobiles.

Dans le présent chapitre sont présentés les détails de la conception de l'expérimentation comme : choix de la structure, sélection de la méthode expérimentale, description de l'installation expérimentale, le mode de obtention des données expérimentales. A la fin du chapitre, les résultats sont systématisés et interprétés et sont présentées les conclusions identifiées pendant et après la fin de l'expérimentation.

5.2. CONCEPTION DE L'EXPERIMENTATION

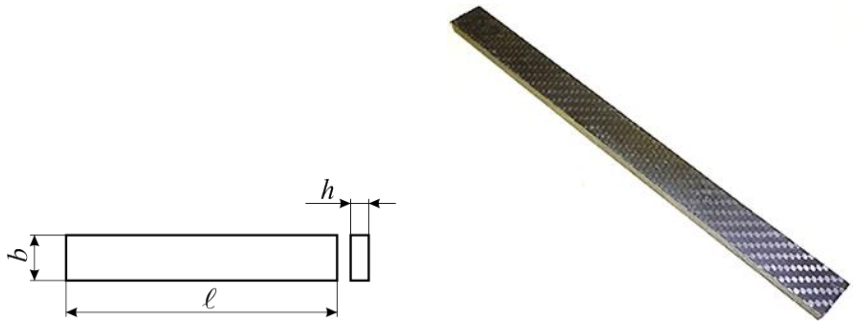
5.2.1. Choix de la structure

Les éprouvettes ont été découpées des plaques stratifiées armées avec de fibre carbone et racine époxydique. La fabrication des plaques a suivi des technologies consacrées [Roşu, 2010], [Mitu, 2013]. Les éprouvettes étaient réalisées en matériau stratifiés avec trois couches pour la traction et avec dix couches pour le fléchissement en quatre points. La découpe des éprouvettes à des dimensions correspondant à chaque type de sollicitation a été réalisée sur un dispositif de découpage Proxxon 27070 (D), avec un disc diamanté de 80 mm en diamètre et une épaisseur de 2 mm. Les dimensions des éprouvettes pour les tests de fléchissement en quatre points sont détaillées dans le Tableau 5.1 et leur formé est présentée dans la figure 5.1.

Tableau 5.1. Dimensions des éprouvettes testées au fléchissement en quatre points.

	Indicatif éprouvette	**Longueur** *l* *mm*	**Distance entre les supports** *mm*	**Largeur** *b* *mm*	**Epaisseur** *h* *mm*	**Masse** *m* *g*
Matériaux composites unidirectionnels (0°) et multidirectionnels (systèmes avec fibres de carbone)	D1	248,62	207,66	20,29	8,79	63,47
	D2	248,92	207,66	20,32	8,51	63,57

Pour les essayes de traction a été utilisé le même matériau composite stratifié armé avec racine époxydique et fibre carbone. Les dimensions principales de l'éprouvette se retrouvent dans le Tableau 5.2 et sa forme, dans la figure 5.2.



a) b)

Fig. 5.1. Eprouvette D1 pour les essayes de fléchissement en quatre points: dimensions de gabarit (a); vue (b).

Tableau 5.2. Principales dimensions de gabarit de l'éprouvette.

Longueur *mm*	**Largeur** *mm*	**Epaisseur** *mm*
250	9,96	2,97

Fig. 5.2. Eprouvette en matériau composite stratifié armé avec fibre carbone pour la traction.

5.2.2. Choix de la méthode expérimentale

Comme déjà a été précisé dans l'introduction, deux types des essayes mécaniques ont été préférés:

- ✓ fléchissement en quatre points;
- ✓ traction.

Parmi les méthodes expérimentales ont été choisies les suivantes trois :

- ✓ avec des jauges électriques résistives ;
- ✓ méthode acoustique (seulement le fléchissement) ;
- ✓ thermographie infrarouge (IR).

5.2.3. Description de l'installation expérimentale

5.2.3.1. Tests de fléchissement en quatre points par des jauges électriques résistives

Les essayes des éprouvettes au fléchissement en quatre points ont été effectués sur une machine **ZWICK/ROELL Z 300** (fig. 5.3) dont les principales caractéristiques techniques sont :

- ✓ Force maximale active : 300 kN ;
- ✓ Hauteur de l'espace utile : 1800 mm ;
- ✓ Largeur de l'espace utile : 630 mm ;
- ✓ Vitesse maximale d'avancement : 250 mm/min.

L'acquisition des données provenant des jauges électriques résistives a été réalisée par l'intermédiaire du système d'acquisition de type SPIDER 8 présenté dans la figure 5.4. Celui-ci est un système complexe avec fréquence portante d'acquisition et traitement des résultats de mesure, ayant 8 entrées-canaux actives.

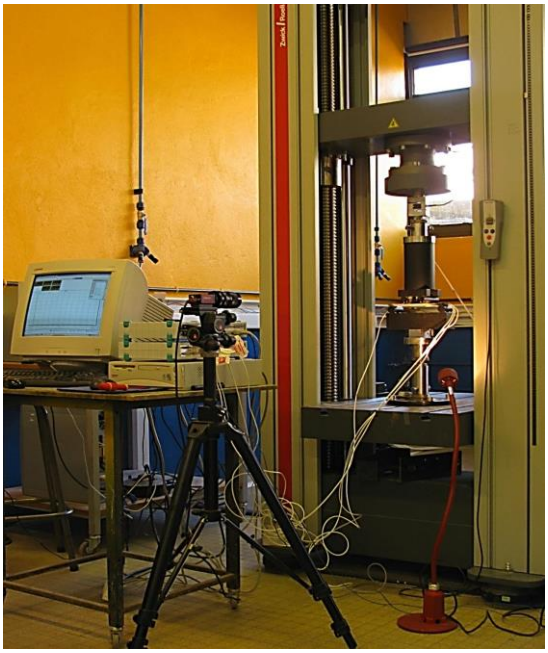


Fig. 5.3. Installation d'essaye au fléchissement en quatre points de l'éprouvette en matériau composite armé avec fibre carbone.

Fig. 5.4. Plaque d'aquisition SPIDER 8.

Système d'acquisition fonctionne avec des transducteurs à induction ou résistifs (ou d'autres types) et permet l'enregistrement et le traitement des valeurs des différentes grandeurs de nature mécanique comme : force, déplacement, déformations spécifiques, température, pression. Par des transducteurs adéquats il peut accomplir aussi d'autres tâches.

Le logiciel SPIDER 8 *Control* ou *Catman 3.0 Express-HBM* est pourvu d'une interface virtuelle utilisée dans l'acquisition, l'édition et le traitement des résultats de mesure.

5.2.3.2. Tests de fléchissement en quatre points par des traducteurs acoustiques

Dans le but de tester au fléchissement en quatre points la deuxième éprouvette (D2) a été utilisée la même machine **ZWICK/ROELL Z 300** dont les caractéristiques sont déjà présentées plus hautes. Pour déterminer les déplacements dans le matériau pendant les tests, la méthode par jauges électriques résistives a été utilisée. Les microfissures et les délaminations, qui peuvent se manifester dans l'éprouvette durant les tests, ont été détectées par un système de dépistage basé sur l'émission acoustique fourni par la compagnie MISTRAS Holding (Fig. 5.5) et équipé par trois senseurs acoustiques de type NANO 3, de même production .

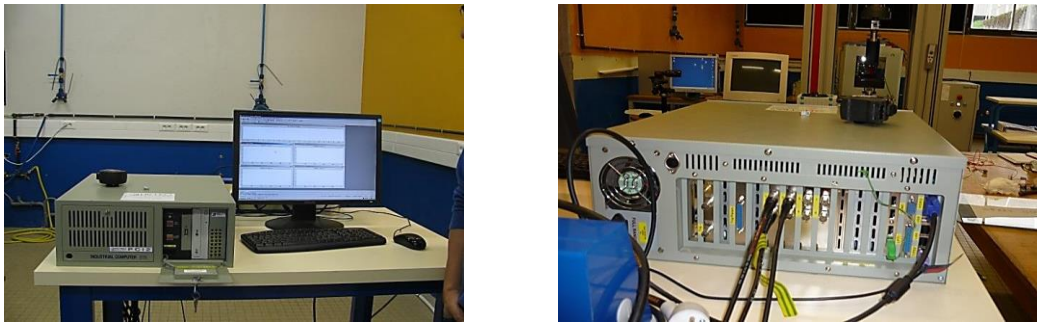


Fig. 5.5. Système de détection des microfissures basé sur la méthode d'émission acoustique.

5.2.3.3. Tests de fléchissement en quatre points et traction par thermographie infrarouge

L'option pour cette expérimentation était une caméra thermographique type FLIR SC 7000 (Fig. 5.8). Les principaux paramètres considérés dans le choix de la caméra étaient la résolution et la sensibilité du détecteur en infrarouge. La caméra dispose d'un détecteur InSb 320x256 pixels qui a une sensibilité satisfaisante. La fréquence des images et du temps d'intégration sont programmable.

Fig. 5.8. Caméra thermografique infrarouge SC FLIR 7000.

Fig. 5.9. Montage expérimentale – détection des défauts au fléchissement en quatre points par thermographie infrarouge.

Dans la figure 5.9 est présenté le montage expérimental pour les tests de fléchissement.pour acquisitionner des images les plus claires possibles de la variation de températuresur la surface de l'éprouvette, derière le dispositif de fixation a été placée une plaque noire (qui a l'émissivité égale à 1).

La figure 5.10 présente le montage utilisé pour les tests de traction.

Il faut mentionner que pour les deux expérimentations avec la caméra thermographique, dans la proximité de l'éprouvette a été placé un thermomètre pour mesurer la température ambiante au début des tests.

Fig. 5.10. Montage expérimentale pour la détection des défauts à la traction par thermographie infrarouge.

5.2.4. Conditions ambiantes

Les essayes expérimentaux de traction et de fléchissement (à l'exception de ceux où a été utilisée la thermographie infrarouge) ont été réalisés en conditions de laboratoire à une température ambiante de 18,6°C et avec l'éclairage normal (naturel plus artificiel).

Les tests mécaniques avec la caméra infrarouge ont été effectués dans des conditions d'éclairage très réduit pour n'affecter pas la qualité des cartes thermiques. La température ambiante dans le laboratoire a été de 18,3°C et l'humidité relative de l'air de 24 %.

5.3. ACQUISITION DES DONNEES EXPERIMENTALES

5.3.1. Tests de fléchissement en quatre points par des jauges électriques résistives

Pour la détection des déformations (déplacements) produites pendant les essayes au fléchissement en quatre points de l'éprouvette D1 ont été choisies des jauges électriques résistives. Cette technique est une des plus utilisées en expérimentations pour déterminer les caractéristiques élastiques des matériaux composites et aussi pour l'étude de leur comportement sous l'action des différents chargements extérieurs.

Les jauges appliquées sur la surface de l'éprouvette étaient :

- ✓ 2 jauges type N11 – FA – 8 – 350 – 11, ayant la résistance de 350,0 ± 0,3 Ω et facteur de calibration de 2,17 ± 1 % sur la largeur de l'éprouvette (Fig. 5.15, a);
- ✓ 2 jauges type N11 – MA – 5 – 120 – 11 ayant la résistance de 120,0 Ω et facteur de calibration de 2,09 ± 1 % sur l'épaisseur de l'éprouvette (Fig. 5.15, b).

L'application des jauges a été faite par l'intermédiaire de l'installation spéciale de collage M–Bond 200. Pour vérifier le collage des jauges, la zone d'application a été analysée sous microscope. Ainsi, on peut observer en détail, dans la figure 5.11, la jauge appliquée sur la largeur de l'éprouvette. Pareillement ont été vérifiés les collages de jauges sur l'épaisseur de l'éprouvette (Fig. 5.12).

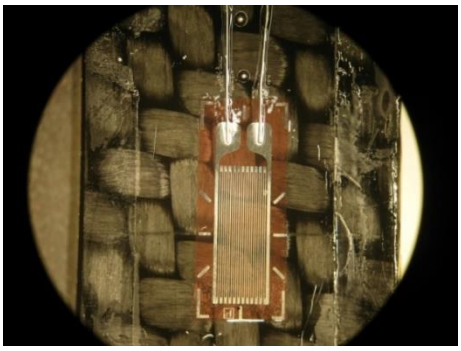


Fig. 5.11. Vizualisation au microscope de la jauge appliquée sur la largeur de l'éprouvette.

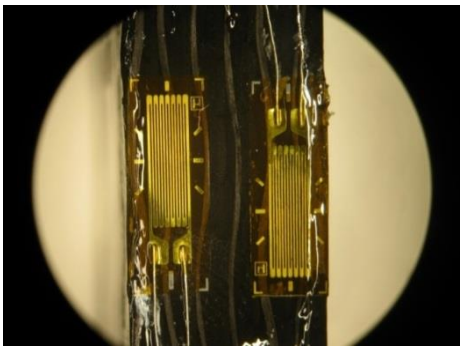


Fig. 5.12. Vizualisation de la jauge appliquée sur l'épaisseur de l'éprouvette.

Après le collage des fils des connecteurs pour chaque jauge, elles ont été vérifiées avec un ohmmètre (pout vérifier leur résistance électrique). Pour l'acquisition des signaux des transducteurs, la plaque d'acquisition SPIDER 8 a été utilisée. Sont vérifiées les valeurs des résistances développées par des fils des transducteurs et, aussi, celles des connecteurs. Le placement des jauges électriques sur la surface de la fibre pendant les tests mécanique est illusté dans la figure 5.14.

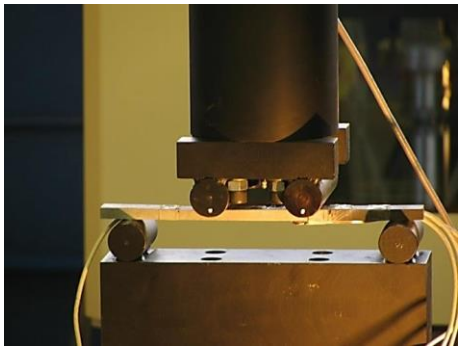


Fig. 5.13. Montage expérimental pour les tests de fléchissement en quatre points.

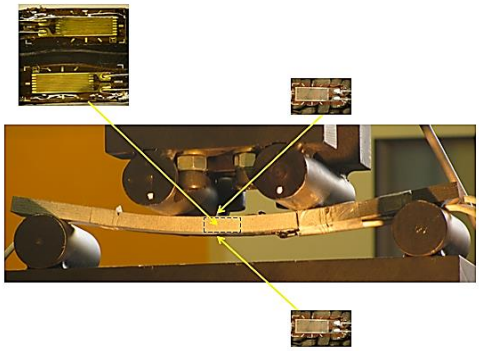


Fig. 5.14. Détail du positionnement des senseurs sur la surface de l'éprouvette pendant les tests de fléchissement.

Au moment d'accomplissement des vérifications les tests ont pu commencer par le choix de la vitesse développée par la machine. Ainsi, dans la figure 5.15, est présentée l'étape intermédiaire de chargement de l'éprouvette (avant que le chargement arrive à la valeur maximale). La rupture totale de l'éprouvette est illustrée dans la figure 5.16. On peut observer la destruction des fibres dans la partie supérieure et, aussi, dans la partie inférieure de l'éprouvette testée.

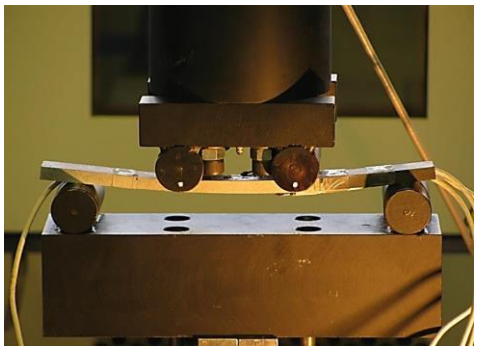


Fig. 5.15. Tests de fléchissement en quatre points – étape intermédiaire.

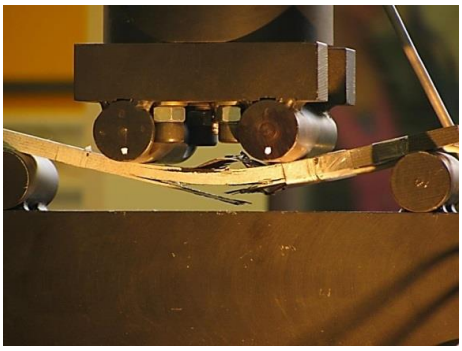


Fig. 5.16. Tests de fléchissement en quatre points – étape finale de rupture de l'éprouvette.

Au premier test l'acquisition des résultats a été faite par les ordinateurs connectés à la machine d'essaye et à la plaque d'acquisition sous forme de fichiers texte. Ceux sont, après, convertis en format .xls et introduits dans le logiciel GRAPHER et les graphs afférents ont été générés. Les fichiers texte acquis contentent des informations concernant la force appliquée (F ou N), la flèche ou la déformation dans la zone centrale de l'éprouvette (v [mm]), les valeurs des contraintes σ [MPa] et des déformations développées pendant les sollicitations. Par l'intermédiaire de ces informations, les suivantes grandeurs peuvent être estimées:

- ✓ module d'élasticité au fléchissement, E_f du matériau composite stratifié ;

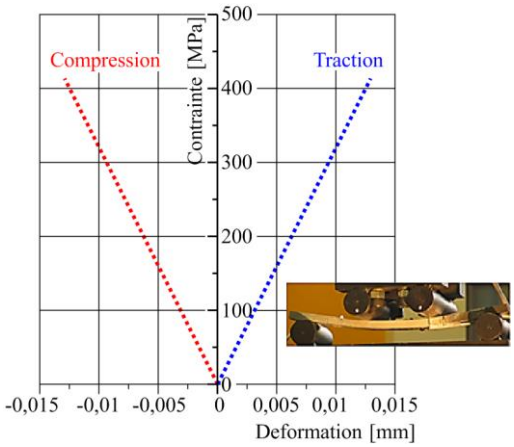


Fig. 5.17. Courbe caractéristique force – déformation dans le cas du fléchissement en quatre points de l'éprouvette en matériau composite à base de fibre carbone.

- ✓ contrainte de fléchissement σ_f;
- ✓ rigidité de fléchissement R_i.

Ainsi, dans la figure 5.17 est présentée la courbe caractéristique force – déplacement pour l'éprouvette testée. En analysant le graph et en tenant compte des résultats numériques fournis par la machine d'essaye, on peut constater que la force de rupture de l'éprouvette a atteint, pendant le fléchissement, la valeur maximale de 3949,04 N.

En utilisant les résultats numériques obtenus du système d'acquisition es données, ont été tracés les graphs correspondant aux déformations. Le graph de la figure 5.17 illustre la courbe caractéristique force – déformation obtenue pour les deux cas se manifestant pendant le fléchissement : traction (bleu) et compression (rouge). Ces données sont obtenues des senseurs positionnés sur les surfaces supérieure et inférieure de l'éprouvette.

5.3.2. Tests de fléchissement en quatre points par des transducteurs acoustiques

Sur la surface de l'éprouvette ont été appliqués quatre senseurs de type jauge électrique résistive, comme ceux présentés plus haut et, aussi, trois senseurs acoustiques de type NANO 3. Ceux-ci étaient placés sur la surface de l'éprouvette à des certaines distances, pour détecter les microfissures de leur aire d'action (figure 5.18).

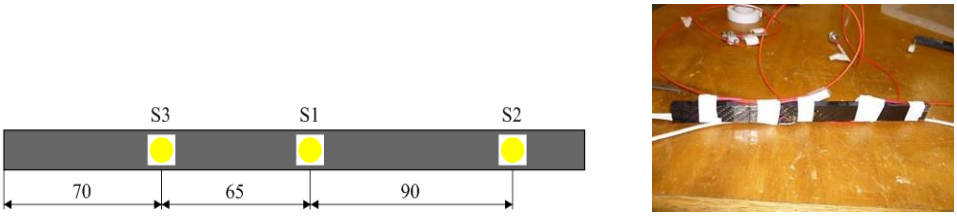


Fig. 5.18. Mode de positionnement des senseurs acoustiques sur la surface de l'éprouvette.

L'éprouvette était fixée dans le dispositif d'essaye de même manière que pour les tests antérieurs. La plaque d'acquisition SPIDER 8 et le système de détection d'émission acoustique MISTRASS ont été connectés par des câbles. Le montage expérimental est présenté dans la figure 5.19.

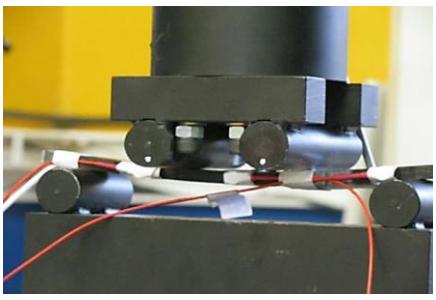


Fig. 5.19. Montage expérimental pour les essayes de fléchissement en quatre points – éprouvette D2.

Des informations concernant la santé structurelle de la structure ont pu être enregistrées par le système d'acquisition MISTRAS et le logiciel spécifique AEWin for PCI2. Les signaux acoustiques fournis par les trois senseurs sont observable dans la figure 5.20. Les signaux provenant des différents senseurs ont été codifiés par des couleurs différentes : en rouge, celui du premier senseur, en bleue celui provenant de deuxième senseur et en violet celui du troisième.

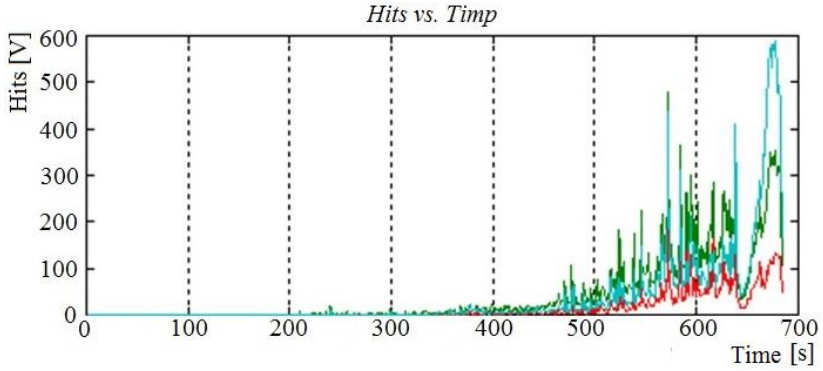


Fig. 5.20. Variation des signaux acoustique provenant des trois senseurs (*Hits* vs *Timp*).

Un fichier texte avec des données numériques fournisses par la machine d'essaye au fléchissement a été obtenu de même manière et, suivant, transformé en fichier de type .xls.

A base de ces informations a été tracée la courbe caractéristique force – déplacement pour les tests effectués (Fig. 5.21). Elle a une allure différente parce que le test de fléchissement a été arrêté avant de la rupture finale de l'éprouvette.

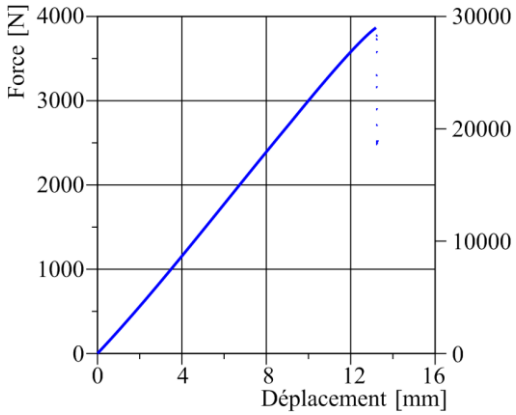


Fig. 5.21. Courbe caractéristique force – déplacement pour les tests de fléchissement en quatre points (D2).

5.3.3. Tests de tractions avec des jauges électriques résistives

Comme dans le cas des tests précédents, des données ont été acquis de la machine d'essaye et du système d'acquisition SPIDER 8 auquel étaient connectés les deux jauges électriques résistives. Les données étaient extraites sous forme de fichier texte, ensuite converti en fichier .xls pour tracer les graphs afférents. D'ici a résulté la courbe caractéristique de traction (fig: 5.22) pour l'éprouvette en fibre carbone.

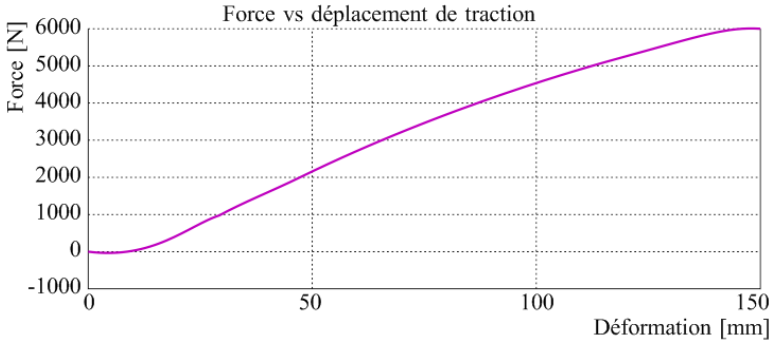


Fig. 5.22. Courbe caractéristique de traction pour l'éprouvette D3.

5.4. TRAITEMENT DES DONNEES

5.4.1. Traitement des données obtenues par tests de fléchissement en quatre points avec des jauges électriques résistives

L'analyse du graph force-déplacement et des valeurs numériques acquises de la machine d'essaye peuvent être profitable pour extraire des informations concernant la force de rupture et la déformation de l'éprouvette dans des différents points.

Le calcul des valeurs de la résistance au fléchissement et du module d'élasticité a nécessité une application dans l'environnement de programmation LabVIEW (**Lab**oratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench), nommée DC_1. LabVIEWest une plateforme et un environnement de programmation développé par National Instruments (NI) qui permet aux usagers de concevoir des applications en langage graphique. Lancé au début pour Macintosh en 1986, LabVIEW est fréquemment utilisé pour acquisition des données, comme instrument de contrôle, et en automatisation industrielle sur diverses plateformes : Microsoft Windows, UNIX, Linux and Mac OS.

Le panneau destiné aux usagers, visible dans la figure 5.22, contient deux modules essentiels : un panneau pour l'introduction des données initiales et un autre pour la visualisation des résultats.

Pour la conception de l'application dans l'environnement de programmation graphique, ont été considérées les équations spécifiques de la résistance des matériaux.

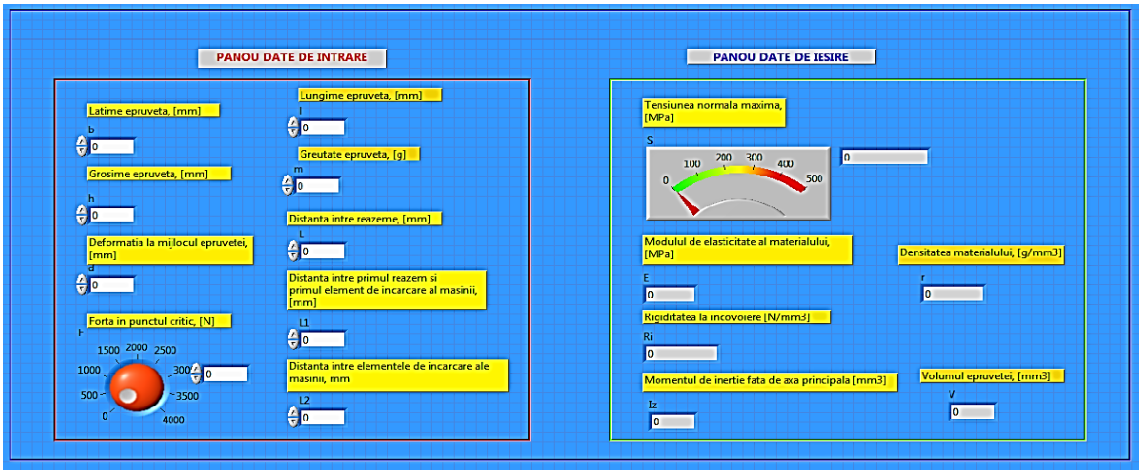


Fig. 5.22. Panneau de l'application LabVIEW pour le calcul de fléchissement (programme DC_2).

5.4.2. Traitement des données obtenues par tests de fléchissement en quatre points avec des transducteurs acoustiques

Pour utiliser les données fournies par le système acoustique d'acquisition, a été conçue une application LabVIEW (DC_3, fig. 5.23 et 5.24), capable d'effectuer l'analyse spectrale des signaux fournis par les senseurs. Les données numériques, sauvegardées séparément dans des fichiers avec l'extension .lvm, sont introduite dans l'algorithme en utilisant un VI spécifique: *Read from measurement file.* Le spectre des fréquences (amplitude et phase) est obtenu à l'aide d'un instrument virtuel existant en LabVIEW: *Spectral measurements,* où a été sélectionné le type de fenêtre : *Hamming,* et le type de mesure à effectuer : *Magnitude – RMS.* La représentation graphique des signaux : initial et les valeurs de l'amplitude et de phase, a nécessité trois oscilloscopes de type Graph. Les valeurs de l'amplitude ont été obtenues par transformée Fourier.

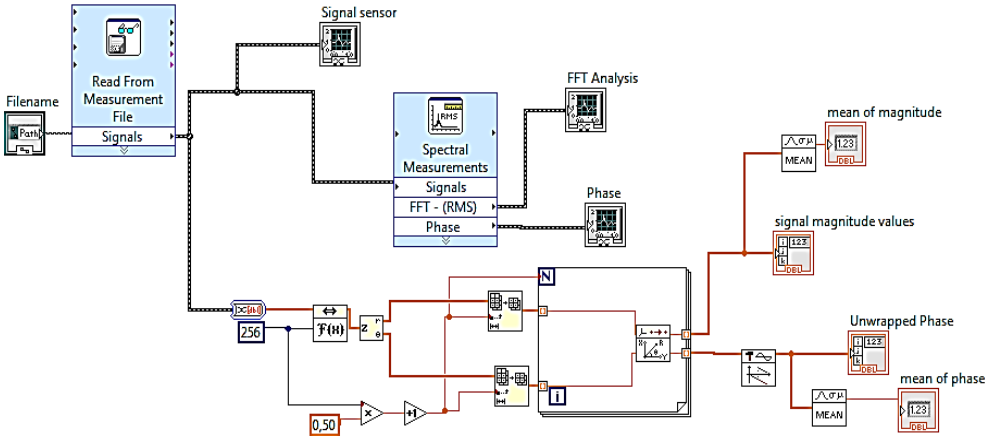


Fig. 5.23. Code du programme LabVIEW DC_3 d'analyse fréquentielle.

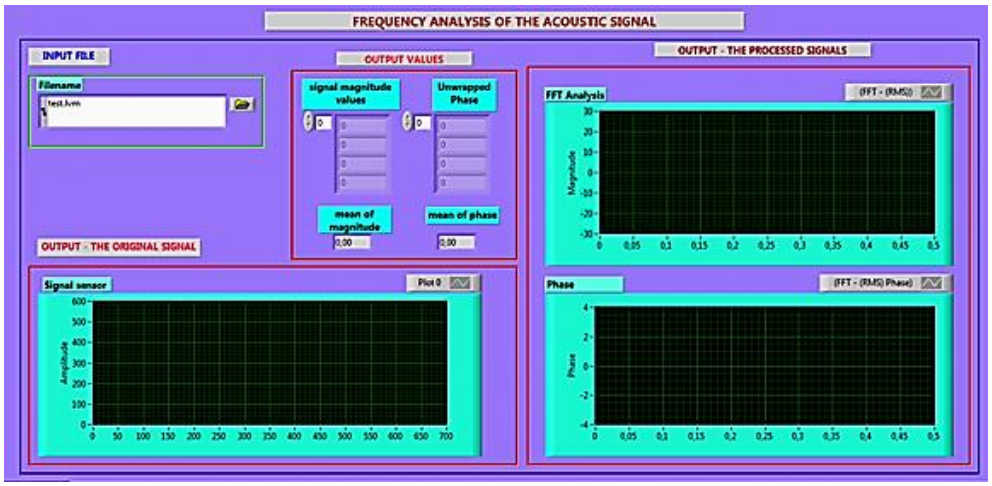


Fig. 5.24. Panneau du programme DC_3 pour l'analyse fréquentielle.

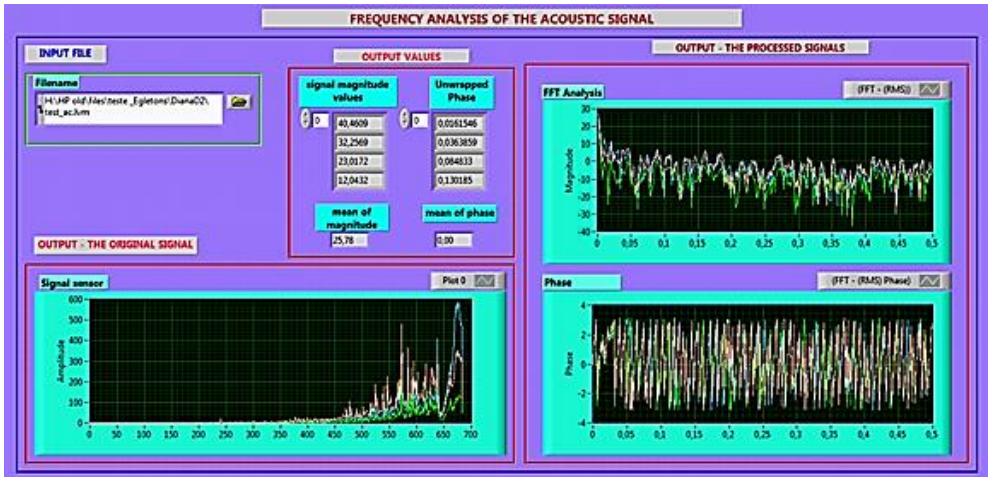


Fig. 5.25. Analyse spectrale – la représentation des signaux des trois senseurs : signal senseur 1 marqué avec rose, signal senseur 2 marqué avec vert, signal senseur 3 marqué avec bleue.

Dans la figure 5.25 on peut voir les résultats de l'analyse spectrale pour les signaux provenant des trois senseurs et dans la 5.26 on observe leurs positions sur la surface de l'éprouvette.

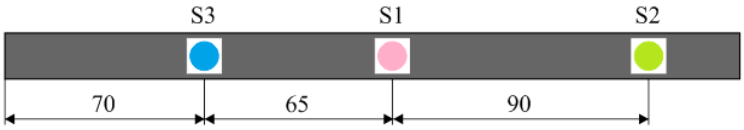


Fig. 5.26. Position des senseurs sur la surface de l'éprouvette.

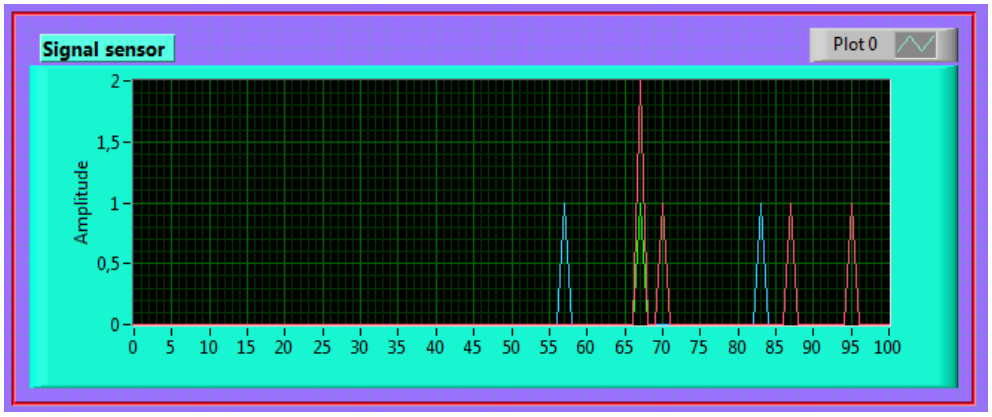


Fig. 5.27. Illustration du signal acoustique fourni par les trois senseurs dans l'intérvalle de temps 0 – 100 s.

Pour une analyse correcte du signal acoustique, l'activité des signaux a été examinée dans l'intervalle de temps de 0 - 100 s (Fig. 5.27). Dans les premières 55 s secondes le signal est nul. Au moment t=56 s on observe une augmentation de la tension provenant du senseur S3, ce qui démontre que dans la zone de celui-ci se manifeste un phénomène critique dans la structure du matériau de l'éprouvette: pratiquement un défaut se produit là, dans la zone du S3. La propagation du défaut se perpétue jusque dans la zone du senseur S1 ou le phénomène devient beaucoup plus intense: la tension du signal augmente jusqu'à 2V. Après cet épisode, le signal garde un niveau acceptable (1 V) jusqu'au moment t= 200 s et, ensuite, le signal S1 recommence de grandir jusqu'à la valeur de 22 V au moment t=240 s (Fig. 5.28), quand un phénomène majeur de destruction apparaît.

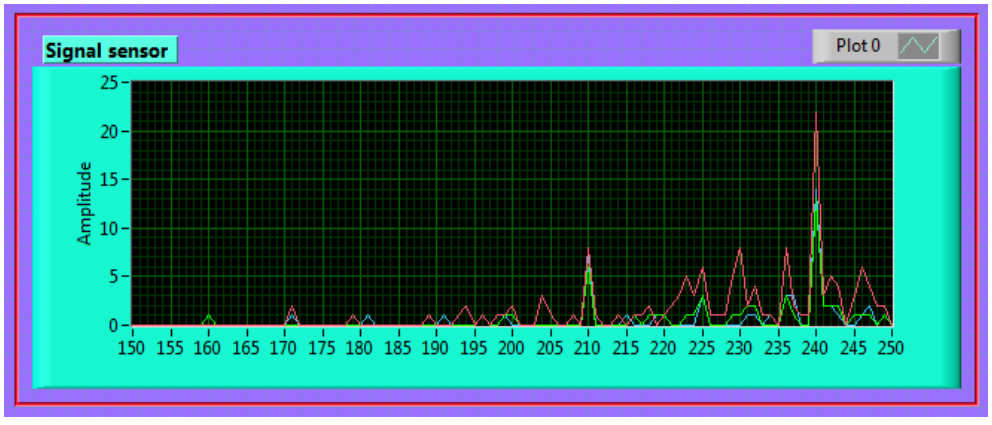


Fig. 5.28. Illustration du signal acoustique fourni par les trois senseurs dans l'intervalle de temps 150 – 250 s.

On peut observer que la forme des signaux est différente d'un senseur à l'autre, ce qui mène à la conclusion que le matériau se comporte différemment dans chaque zone. De l'analyse des signaux acoustiques on peut déduire que la première zone critique est dans l'aire du senseur S3 (ca va être ultérieurement démontré par thermographie infrarouge). De là, le défaut se propage vers le centre de l'éprouvette (zone du senseur S1), où les contraintes deviennent critiques et se produit la rupture.

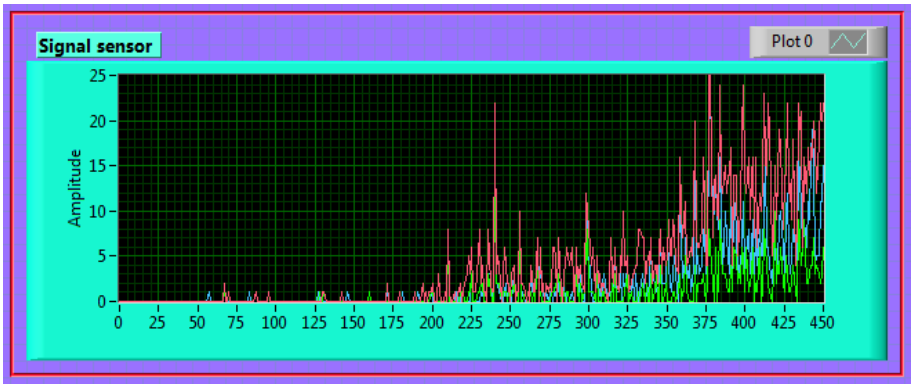


Fig. 5.29. Illustration du signal acoustique fourni par les trois senseurs dans l'intervalle de temps 0 – 450 s.

Les phénomènes internes dans l'éprouvette commencent à s'intensifier après 350 s (Fig. 5.29). La tension des trois senseurs augmente et leur activité s'intensifie. Depuis ce moment, les liaisons entre les couches du matériau composite commencent à céder et la rupture finale va apparaître à *t*=640 s, quand la zone du S3 a été détériorée (Fig. 5.30).

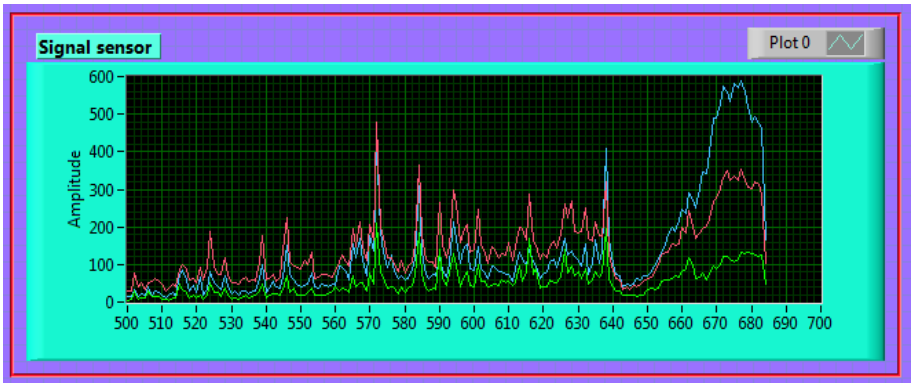


Fig. 5.30. Illustration du signal acoustique fourni par les trois senseurs dans l'intervalle de temps 500 – 700 s.

5.4.3. Traitement des données obtenues par tests de traction

A base de courbe force – déplacement dans le cas de la traction, ont été extraites des valeurs de la force de rupture et des déplacements en 12 points signifiantes (Tableau 5.3).

Tabel 5.3. Valeurs numériques de la force de rupture et du déplacement extraites de la courbe caractéristique force – déplacement.

Force *N*	**Déplacement** *mm*	**Force** *N*	**Déplacement** *mm*
484,6278	0,28748	3486,1171	1,222612
1050,5080	0,454449	4006,426	1,422948
1507,128	0,587960	4491,1611	1,62343
2011,3004	0,738267	5018,3979	1,8571
2494,5947	0,888643	5496,6035	2,0909254
3009,5668	1,05557	5999,4790	2,371129

Afin de déterminer la résistance à la traction et l'élongation spécifique, en utilisant les équations spécifiques de la résistance des matériaux [Deutsch, 1979], a été élaborée une application (programme DC_4) dans LabVIEW. Dans la figure 5.21 est présenté le panneau de cette application

pour le calcul des caractéristiques mécaniques à la traction. Le panneau contient deux modules : un en cadre vert pour l'introduction des données et, un autre, en cadre rouge pour les résultats.

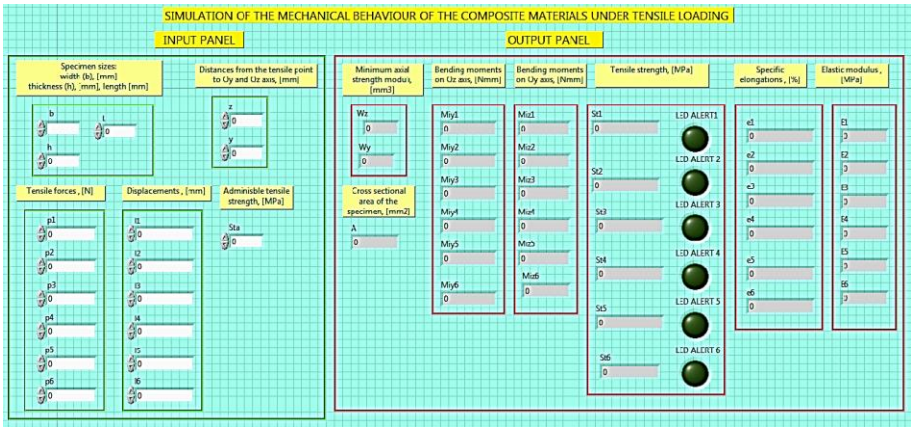


Fig. 5.31. Panneau de l'application de calcul à traction excentrique (programme DC_4).

5.5. REZULTATS. DISCUTIONS. CONCLUSIONS

5.5.1. Résultats des tests de fléchissement en quatre points avec des jauges électriques résistives

Pour les cas où la déformation est considérée comme positionnée au milieu de l'éprouvette a été utilisée l'application DC_2 est ont été obtenus les résultats présentés dans la figure 5.32. Sont présentés seulement les résultats pour le cas du chargement critique (force maximale) et, par DC_2 ont été calculées les valeurs de la contrainte de fléchissement, du module d'élasticité et de la rigidité de fléchissement pour la force de rupture et déformations signifiantes durant le processus.

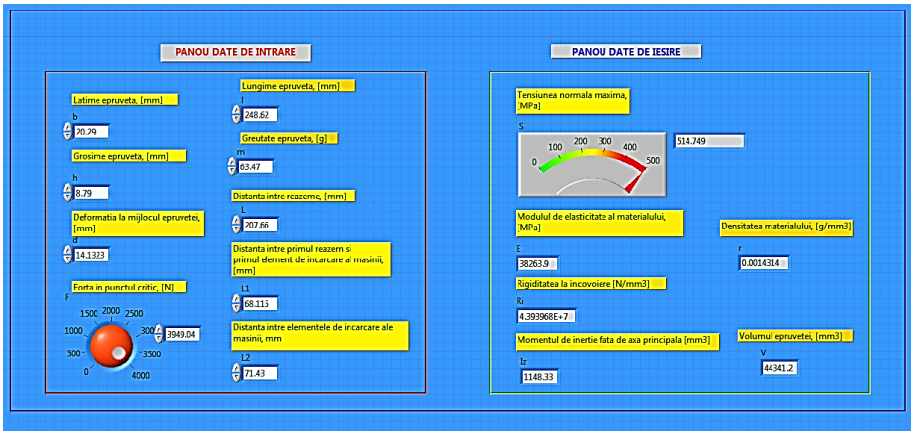


Fig. 5.32. Résultats numériques des variables calculées pour le fléchissement en quatre points : cas de la force maximale (la déformation est considérée au milieu de l'éprouvette).

Tableau 5.4. Résultats numériques des variables dans le cas du fléchissement en quatre points.

Force *N*	**Contrainte** *MPa*	**Rigidité** *MPa*	**Module d'élasticité** *MPa*
500,01	65,1753	$3{,}346926 \cdot 10^7$	29146,0
1000,01	130,349	$3{,}84453 \cdot 10^7$	33479,3
1500,04	195,527	$4{,}110873 \cdot 10^7$	35798,7

2000,07	260,705	$4{,}281169 \cdot 10^7$	37281,6
2500,01	325,871	$4{,}385901 \cdot 10^7$	38193,7
3000,06	391,052	$4{,}44716 \cdot 10^7$	38727,1
3500,11	456,232	$4{,}476535 \cdot 10^7$	38982,9
3949,04	514,749	$4{,}393968 \cdot 10^7$	38263,9

5.5.2. Résultats des tests de fléchissement en quatre points avec des transducteurs acoustiques

Par l'intermédiaire de l'application DC_2 ont été calculées les valeurs des caractéristiques mécaniques du matériau pour l'éprouvette D2 (Tableur 5.5).

Tableau 5.5. Résultats numériques des variables dans le cas du fléchissement en quatre points.

Force *N*	**Contrainte** *MPa*	**Rigidité** *MPa*	**Module d'élasticité** *MPa*
500,041	69,4363	$4{,}318387 \cdot 10^7$	41380
1000,05	138,868	$4{,}489989 \cdot 10^7$	43024,3
1500	208,292	$4{,}586378 \cdot 10^7$	43948
2000,03	277,727	$4{,}646584 \cdot 10^7$	44524,9
2500,04	347,159	$4{,}675658 \cdot 10^7$	44803,5
3000,03	416,588	$4{,}678301 \cdot 10^7$	44828,8
3500,15	486,035	$4{,}675633 \cdot 10^7$	44803,2
3894,7	540,823	$4{,}548063 \cdot 10^7$	43580,0

5.5.3. Résultats des tests de traction

Les résultats des dernières six valeurs des caractéristiques mécaniques du matériau sont présentés dans la figure 5.33. On peut observer que pour l'éprouvette testée, la résistance maximale de traction de dépasse pas la valeur admissible, ce qui est normale parce que l'essaye de traction a été arrêté avant la rupture finale de l'éprouvette.

A l'aide de l'application DC_4 ont été calculées les résistances à la traction et les élongations spécifiques en 12 points essentiels (leurs valeurs étaient extraites de la courbe force-déplacement) de l'expérimentation.

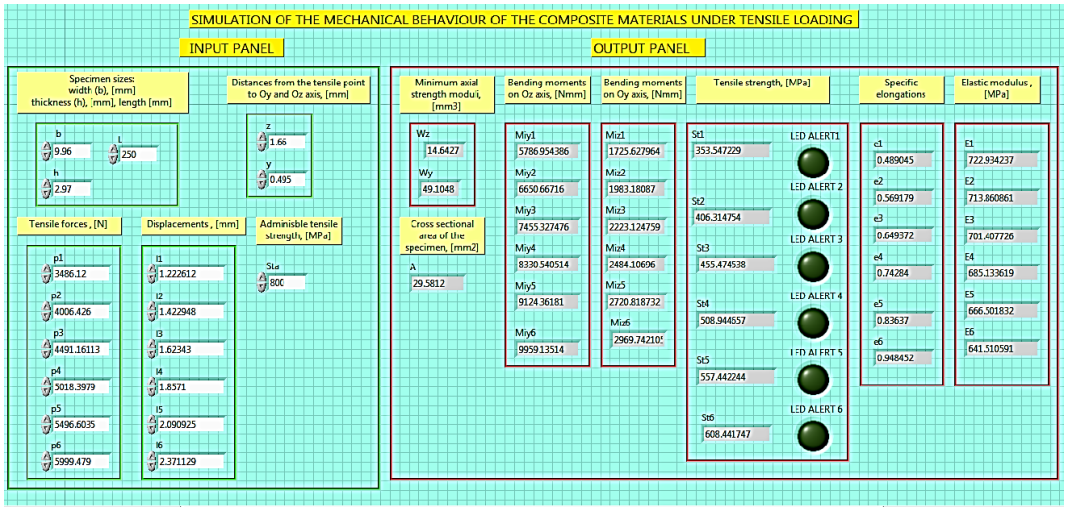


Fig. 5.33. Résultats finales du calcul de traction excentrique pour l'éprouvette testée.

5.5.4. Analyse des résultats des tests par thermographie infrarouge

5.5.6.1. Tests de fléchissement en quatre points

A l'aide du logiciel Altair a pu être réalisée une analyse des variations de température avant et après l'apparition du défaut. Ainsi, dans les figures 5.34 et 5.35 sont présentées les cartes thermiques avant et après l'essaye de fléchissement. En analysant ces cartes thermique, on peut observer que la température maximale de l'éprouvette en état initial (avant l'expérimentation) a été de 16,61°C; alors qu'après l'expérimentation elle était arrivée à 17,50°C.

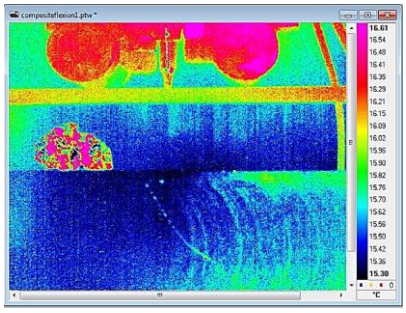


Fig. 5.34. Cartes thermiques avant l'essaye de fléchissement – phase initiale.

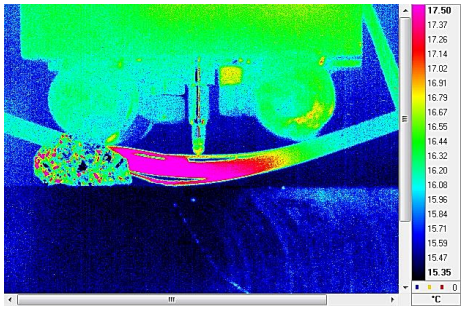


Fig. 5.35. Cartes thermiques après l'essaye de fléchissement – phase finale.

La valeur maximale de la température durant l'essaye a été atteinte exactement au moment du début de la délamination (Fig. 5.36). Dû à la force de rupture, les contraintes internes développées dans le matériau produisent l'augmentation de la température et, implicitement, au décollage des couches en fibre carbone. Dans les zones des rouleaux d'appui existent des aires avec une température plus élevée. Le moment de la rupture finale est illustré dans la figure 5.37, où on peut observer, sur la carte thermique (Fig. 5.37, a), des zones de température très basse dues au fait que les couches superficielle sont déjà rompues.

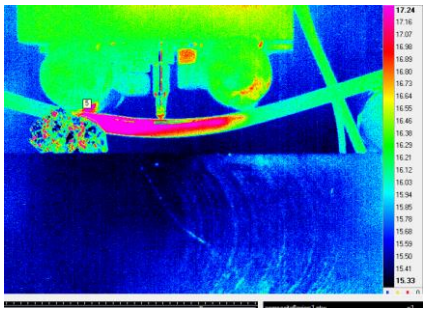
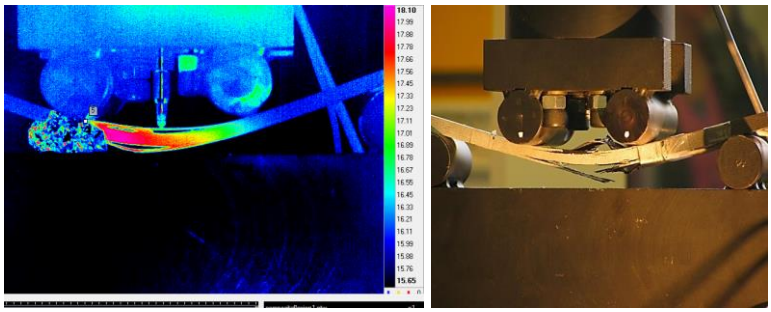


Fig. 5.36. Cartes thermiques de l'éprouvette au moment de la délamination dans le matériau.



a) b)

Fig. 5.37. Etat final de l'éprouvette après l'expérimentation : carte thermique (a) ; image a fin de l'expérimentation (b).

5.5.6.2. Tests de traction

Par le logiciel Altair a pu être réalisée une analyse des variations de température avant et après l'apparition du défaut. Dans les figures 5.38 et 5.39 sont présentées les cartes thermiques avant et après l'essaye de torsion. En les analysant, on observe que la température maximale de l'éprouvette avant l'expérimentation a été de 17,18°C; alors qu'après l'expérimentation elle était de 18,47°C.

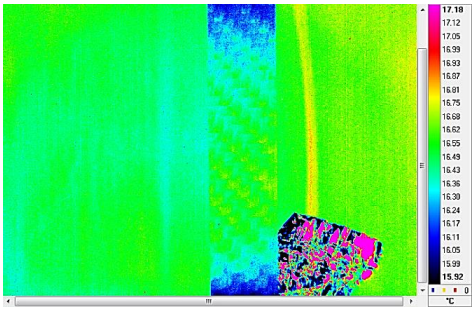


Fig. 5.34. Cartes thermiques avant l'essaye de torsion– phase initiale.

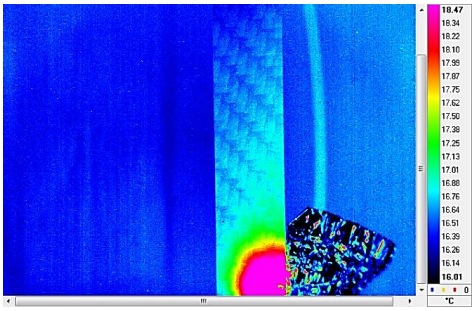


Fig. 5.35. Cartes thermiques après l'essaye de torsion – phase finale.

Dans la figure 5.40, représentant la variation des températures maximales avant (bleu) et après (rouge) la délamination, on observe que la température décroît et, suivant, elle augmente jusqu'à la rupture finale. Du graph on observe que la température maximale a une variation de fréquence très élevée.

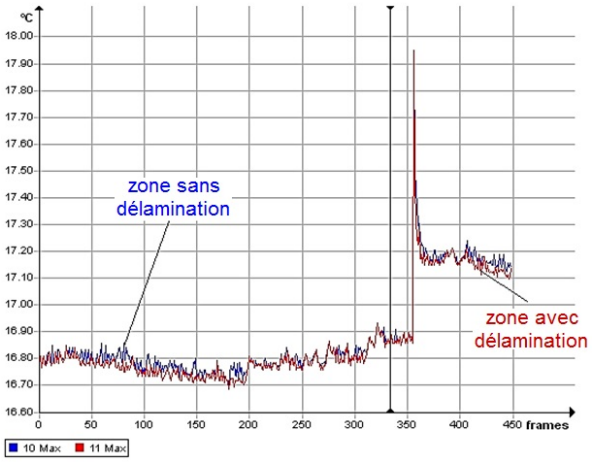


Fig. 5.40. Variation des températures maximales avant et après la délamination.

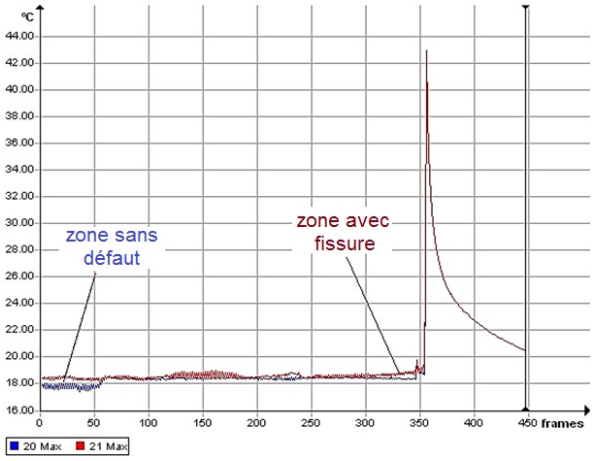


Fig. 5.41. Variation des températures maximales avant et après l'apparition de la fissure.

En comparaison avec le cas de délamination où la température a une variation fréquente, dans le cas de la fissure, la température a des variations très petites et décroît lentement jusqu'au moment de la délamination pour augmenter après, brusquement, à la valeur critique (Fig. 5.41).

5.6. ANALYSE MULTICRITERES A BASE DES SOLUTIONS SELECTIONEES POUR LA COMPARAISON DES TROIS SYSTEMES SELECTIONNES DE DETECTION DES DEFAUTS

L'analyse multicritères consiste en cinq étapes, respectivement :

- ✓ établissement des critères ;
- ✓ détermination du poids de chaque critère ;
- ✓ identifications de toutes variantes ;
- ✓ allocation d'un qualificatif ;
- ✓ calcul des produits entre les qualificatifs *N* et les coefficients de poids.

5.6.1. Établissement des critères

Dans la première étape de cette analyse ont été établis les critères pour une méthode avancée de détection des défauts dans les structures. Ces critères sont :

- ✓ Prix du système de détection des défauts (critère P) ;
- ✓ Précision de détection (critère R) ;
- ✓ Facilité d'application du système de détection des défauts (critère F) ;
- ✓ Sécurité en fonctionnement (critère S) ;
- ✓ Niveau de détection des défauts (critère N) ;
- ✓ Seuil d'erreur (critère E) ;
- ✓ Dégrée d'intégrabilité dans l'intérieur des matériaux (critère G).

5.6.2. Détermination du poids de chaque critère

Le but de cette étape est de calculer des coefficients de poids : sur un tableau carré sont marqués les critères au long des lignes et des colonnes. Dans le même tableau sont écrits les résultats des comparaisons entre l'importance réciproque des deux critères, effectuée par l'application DC_5 en LabVIEW (Fig. 5.42) et leurs valeurs sont chargées dans le Tableau 5.6.

Tableau 5.6. Calculs associés aux coefficients de poids.

	P	R	F	S	N	E	G	Points	Niveau	Poids
P	1	0	0	0	0	0	1	**2**	**5**	**1.42**
R	1	1/2	0	1/2	0	1	0	**3**	**4.5**	**2**
F	1	1	1/2	0	0	0	1/2	**3**	**4.5**	**2**
S	0	1/2	1	1/2	1	1	1/2	**4.5**	**1**	**5**
N	1	1	1	0	1/2	0	1/2	**4**	**2.5**	**3.33**
E	1	0	1	0	1	1/2	0	**3.5**	**3**	**2.5**
G	0	1	1/2	1/2	1/2	1	1/2	**4**	**2.5**	**3.33**

5.6.3. Identifications de toutes variantes

Compte tenu du fait que trois méthodes de détection des défauts sont comparées, dans ce cas, les variantes seront : la variante (a) : la méthode de détection des défauts par des jauges électriques résistives, la variante (b) : la méthode de détection des défauts par des senseurs acoustiques et la variante (c) : la méthode de détection des défauts par thermographie infrerouge IR.

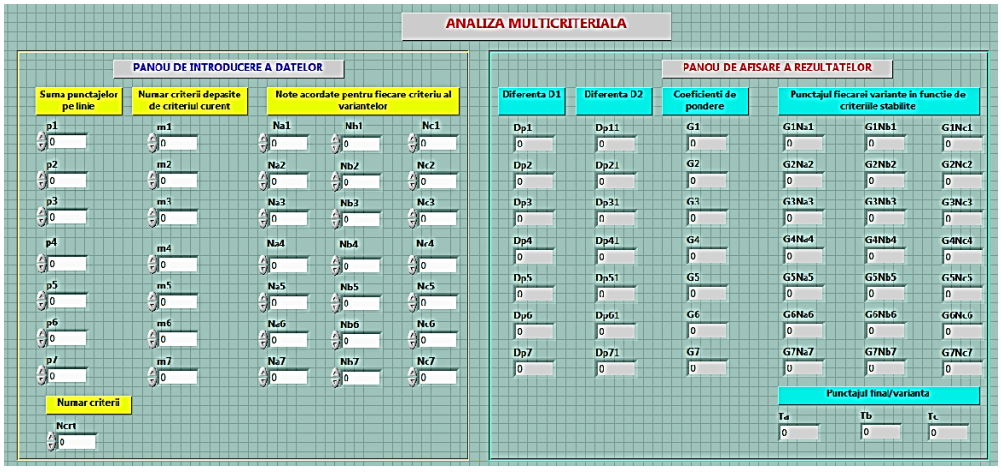


Fig. 5.42. Panneau de l'application de l'analyse multicritères – programme DC_5.

L'application permet de calculer tous les indicateurs nécessaires pour une telle analyse. Les données sont introduites dans la partie gauche du panneau, alors que les résultats sont affichés dans le panneau de la partie droite. Parce que les données d'entrée sont très nombreuses, une programmation séquentielle de type *Stacked* a été préférée. Le code source contient des contrôles et des indicateurs numériques, ainsi qu'une série d'opérateurs mathématiques de type différence. Les séquences 2 et 3 du programme contient une série de structures type *Formula Node*; où les relations de calcul sont insérées en langage C. la troisième séquence contient trois structures de programmation *Formula Node* mais, aussi, trois opérateurs mathématiques élémentaires pour des calculs composés (addition multiple).

5.6.4. Allocation des qualificatifs

Les qualificatifs sont choisis entre 1 et 10 (d'ailleurs ils doivent être des nombres entiers) et est accordé à chaque variante, d'après chaque critère. Les qualificatifs sont dans le Tableau 5.7.

Tableau 5.7. Les qualificatifs des variantes.

Critère	**Variante** (a)	**Variante** (b)	**Variante** (c)
P	10	9	9
R	8	10	8
F	9	9	10
S	9	10	10
N	8	10	7
E	9	9	9
G	10	10	1

5.6.5. Calcul des produits entre les qualificatifs *N* et les coefficients de poids

Ce calcul est effectué dans un tableau nommé *la matrice des conséquences* (Tableau 5.8) et il consiste des produits entre les qualificatifs *N* et les coefficients de poids du Tableau 5.6.

Les calculs numériques ont été effectués par le programme LabVIEW DC_5.

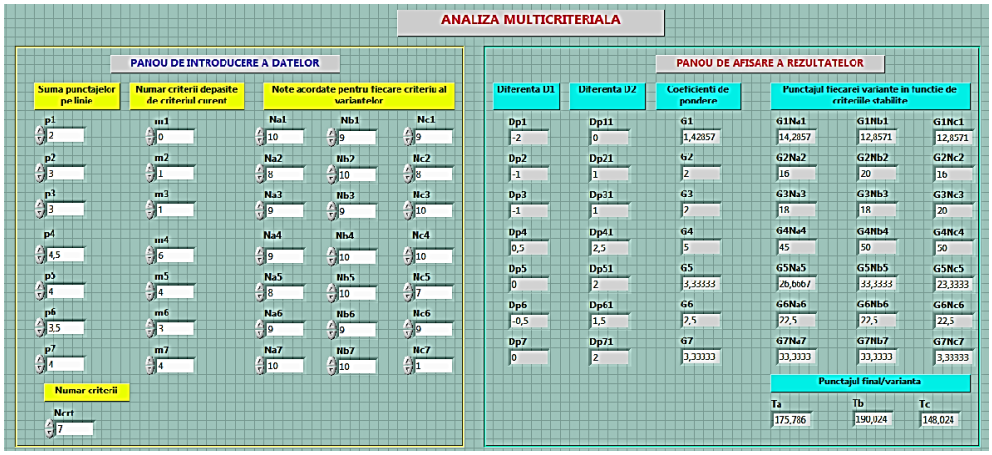


Fig. 5.43. Panneau du programme DC_5 en affichant les résultats finals.

Tableau 5.8. Coefficients de poids calcules.

Critère	γ_i	**Variante** (a)		**Variante** (b)		**Variante** (c)	
		N_i	$N_i\ \gamma_i$	N_i	$N_i\ \gamma_i$	N_i	$N_i\ \gamma_i$
P	1,428	10	14,28	9	12,85	9	12,85

R	2	8	16	10	20	8	16
F	2	9	18	9	18	10	20
S	5	9	45	10	50	10	50
D	3,33	8	26,66	10	33,33	7	23,33
E	2,5	9	22,5	9	22,5	9	22,5
G	3,33	10	33,33	7	33,33	1	3,33
Total			175,78		190,02		148,04

5.6.6. Discutions

En conformité avec ceux montrés avant, dans ce chapitre, le matériau de l'éprouvette a eu un comportement différent dans les zones de positionnement des trois senseurs acoustiques. Ainsi, dans la figure 5.44 on peut observer que la première zone critique apparaît dans l'extrémité gauche de l'éprouvette, là où il y le senseur S3 – sur l'oscilloscope est évident que la première augmentation en amplitude est au signal provenant du senseur S3 (bleue). La carte thermique de l'éprouvette pendant l'expérimentation soutient cette observation. Une fois initié dans la structure du matériau, le défaut se propage vers le centre de l'éprouvette, comme on peut voir sur l'image thermographique du côté droit. Aussi, le signal provenant du senseur S1 (placé au centre de l'éprouvette), marqué en rose, augment en amplitude tel qu'il dépasse les niveaux des deux autres signaux.

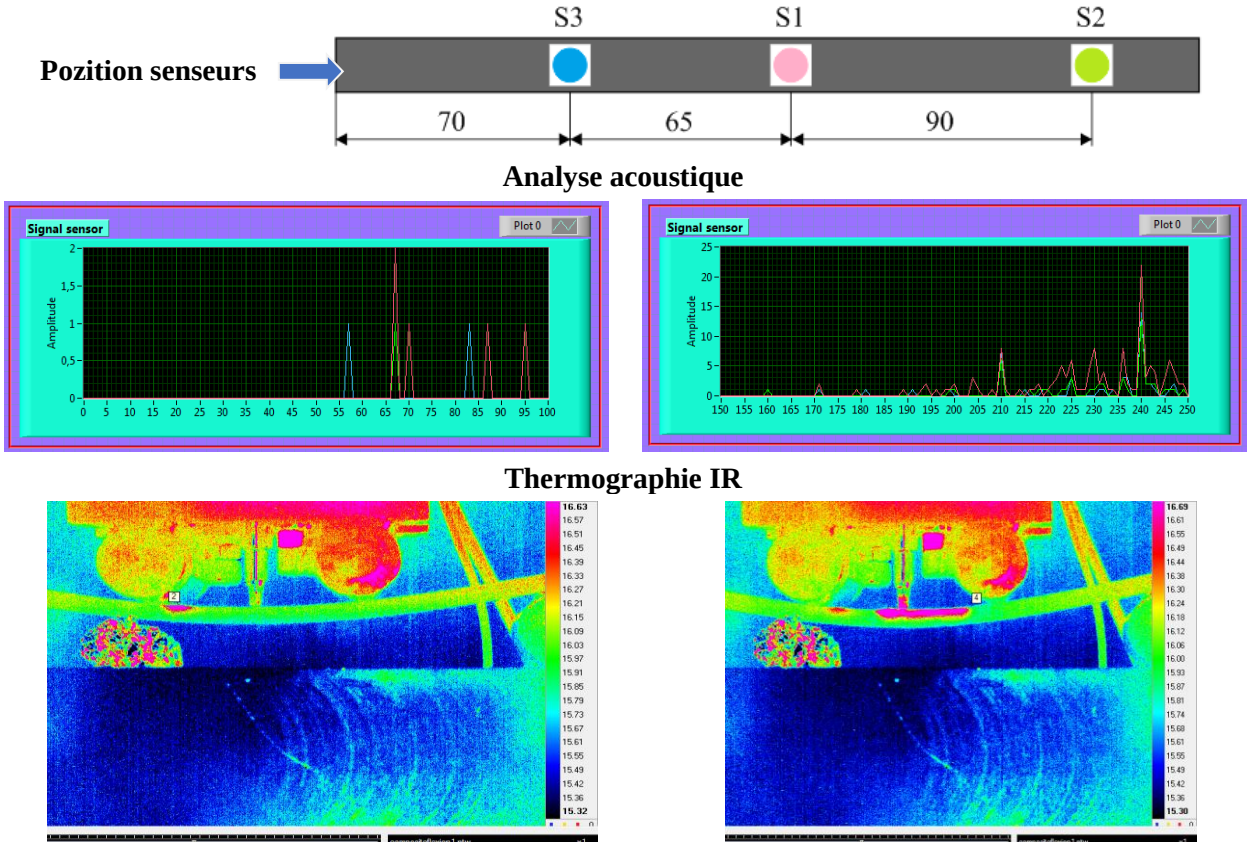


Fig. 5.44. Résultats comparatifs obtenus des senseurs acoustiques et dela caméra thermpgraphiques.

De même, en utilisant les résultats numériques fournis par le programme DC_4, a été tracé la variation de l'amplitude moyenne pour les signaux provenant des trois senseurs (Fig. 5.45) – on peut observer que l'amplitude moyenne du signal acoustique obtenu du senseur S1 dépasse de loin les valeurs des signaux provenant des senseurs S2 et S3.

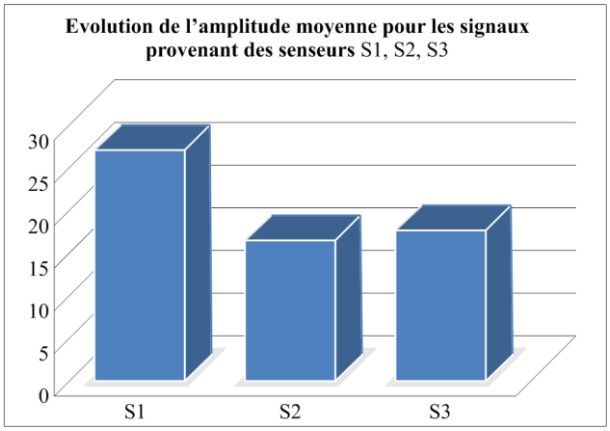


Fig. 45. Variation de l'amplitude moyenne pour les signaux provenant des trois senseurs.

Avec les mêmes valeurs numériques de l'analyse spectrale a été représentée la variation des amplitudes des signaux acoustiques des senseurs S1 (rouge), S2 (vert) et S3 (bleue). D'ici, aussi, est visible que le premier défaut apparu pendant l'expérimentation est situé dans la zone du senseur S3 et, ensuite, il se propage vers la zone de de S1, où les valeurs deviennent critiques et l'éprouvette se rompe.

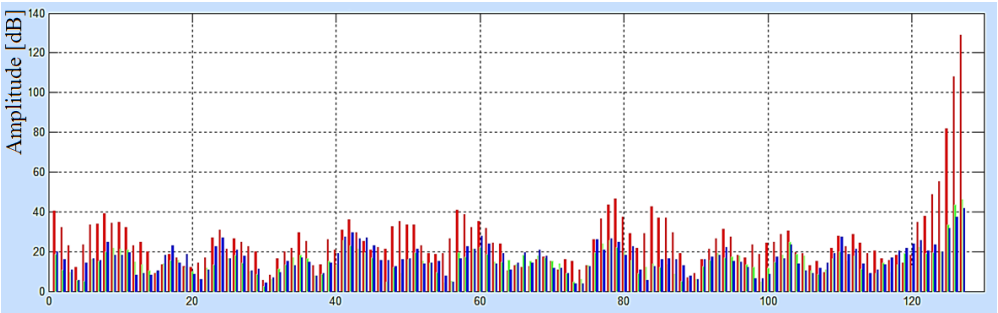
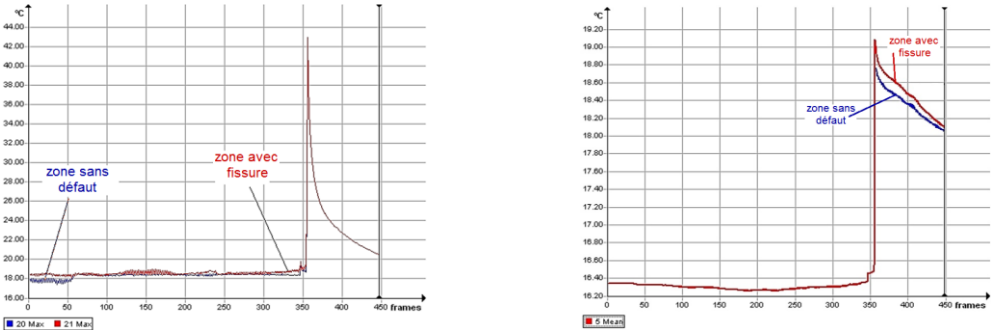


Fig. 5.46. Variation de l'amplitude des signaux acoustiques provenant des trois senseurs.

L'application de la méthode thermographique infrarouge IR a démontré que la température à la surface de l'éprouvette se modifie pendant l'expérimentation en fonction de la force appliquée : la température de surface augment en même temps avec l'apparition du premier défaut du matériau. Les résultats expérimentaux au fléchissement en quatre points ont été, aussi, comparés avec les résultats numériques résultant d'une simulation du comportement d'une éprouvette en matériau composite stratifié fléchi en quatre points.



a) b)

Fig. 5.47. Variation de la température à la surface de l'éprouvette pendant les essayes de traction dans la zone sans défaut (bleue) et avec défaut/fissure (rouge) : température maximale (a) et température moyenne (b).

Dans la figure 5.48 sont comparées: la carte des déformations obtenue par simulation, la carte des températures à la surface de l'éprouvette fournie par la caméra thermographique et l'image de l'éprouvette en phase finale de rupture. Ainsi est démontrée, encore une fois, l'augmentation de la température dans la zone où apparaît un défaut.

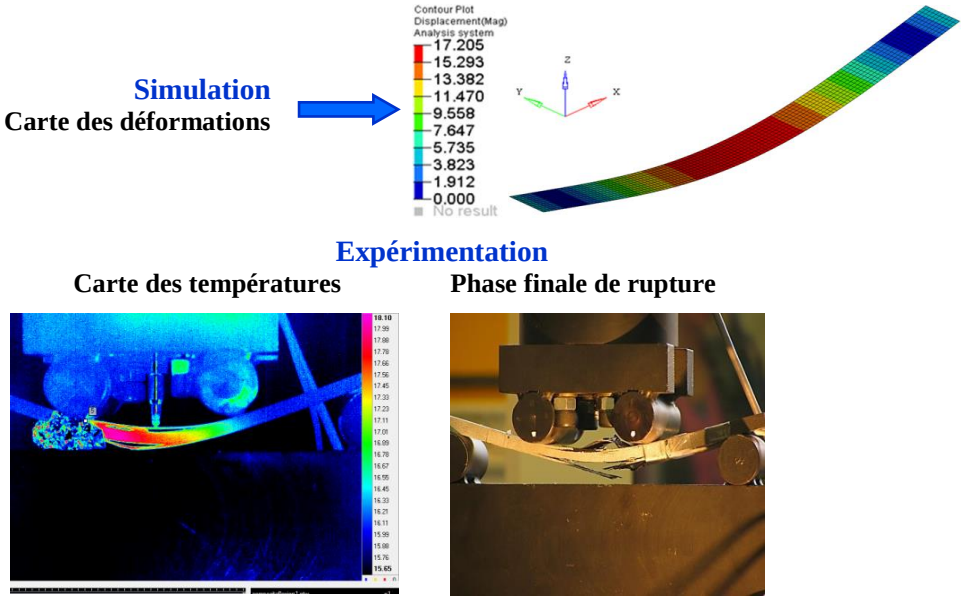


Fig. 5.55. Simulation vs. expérimentation – validation des résultats.

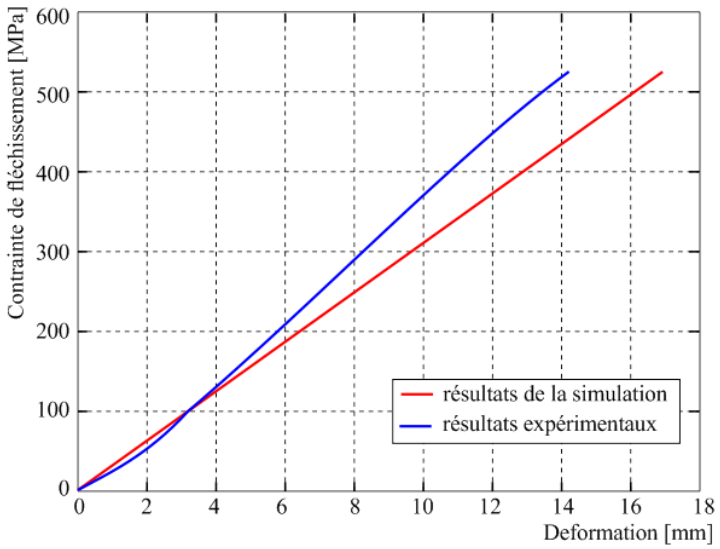


Fig. 5.49. Courbe caractéristique déformation – contrainte au fléchissement – simulation vs. expérimentation.

Dans la figure 5.49 est représentée la courbe caractéristique déformation – contrainte pour les cas de simulation (rouge) et expérimentale (bleue).

En utilisant les fonctions statistiques prédéfinies dans le logiciel Microsoft Excel, le coefficient de corrélation a été calculé pour les résultats de la simulation et, aussi, pour ceux fournis par l'expérimentation. Pour la simulation, le coefficient de corrélation était égale à l'unité et pour l'expérimental il a résulté en valeur de 0,999167. On peut conclure d'ici un dégrée élevé de corrélation entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle virtuel.

CHAPITRE 6.

CONCLUSIONS FINALES. CONTRIBUTIONS ORIGINNELLES. VALORISATION DES RESULTATS. DIRECTIONS DE DEVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE

La thèse doctorale intitulée *Caractérisation des processus d'endommagement des matériaux composite à base de fibres de carbone* a envisagé des recherches théoriques et expérimentales dans le domaine du contrôle non-destructif appliqué aux matériaux composites stratifiées renforcés avec de la fibre carbone utilisés, généralement, dans l'industrie aérospatiale mais aussi dans d'autres domaines industrielles. Son but a été d'étudier les systèmes de dépistage des défauts depuis leur moment d'apparition pour n'importe quelle méthode d'investigation utilisée. En règle générale, l'amélioration des performances des méthodes d'analyse non-destructive des matériaux, suppose la conception des matériaux nouveaux et des systèmes ayant des caractéristiques supérieures, ainsi que l'utilisation des systèmes sensoriels intégrés dans la structure du matériau composite.

6.1. CONCLUSIONS FINALES

Les *Objectifs de la recherche doctorale,* établis dans une étape initiale, ont été intégralement accomplis et se sont matérialisés sous forme des produits innovants avec caractère d'originalité.

Dans le chapitre dédié à l'*Etude bibliographique dans le domaine de recherche* a été réalisée une synthèse des méthodes d'évaluation non-destructives des systèmes du point de vue des leurs performances, des phénomènes physiques statuant à leur base, du mode d'utilisation et du matériel nécessaire. A été aussi présenté le concept de *Surveillance de l'Intégrité des Structures* et ont été décrites quelques méthodes d'analyse de la qualité fonctionnelle.

En ce qui concerne l'analyse des défauts structurels, au long du temps ont été développées des différentes méthodes non-destructives basées sur des principes physiques divers comme : l'utilisation des jauges électriques résistives, l'émission acoustique, photoélasticimétrie, franges Moiré, la thermographie infrarouge, le contrôle par ultrasons, la radiographie aux rayons X, la corrélation de l'image visuelle. Toutes ces méthodes se sont basées sur des mesures directes : surveillance des chargements pour conclure sur la qualité de la structure (son intégrité).

Pour simplifier le processus d'identification des défauts structurels, il y a quelques décennies, ont été créés des standards internationaux concernant la classification de ces défauts pour des différents types de matériaux. Pour cette étude ont été utilisées des informations standardisées sur les matériaux métalliques, sur les alliages et sur les matériaux composites et leurs défauts.

Les méthodes expérimentales d'identification des défauts, présenté dans le mémoire de thèse, peuvent être appliquées à une large gamme des matériaux métalliques et aussi, composites.

Dans le chapitre dédié aux *Contributions à la modélisation et à la simulation des structures* ont été traité notions liées à la modélisation géométrique des structures de l'industrie aérospatiale, ont été mentionnées quelques caractéristiques des matériaux utilisés et, aussi, des relations mathématiques de base pour les phénomènes aérodynamiques. Le comportement d'une

pale d'hélicoptère en conditions de vol stationnaire, avec pale en avance et réculant et pour le cas de chargement par propre poids a été simulé. De même, a été simulé le comportement d'une éprouvette en matériau composite stratifié armé avec des fibrs carbone en conditions de sollicitation au fléchissement en quatre points.

Les modèles géométriques ont été réalisés à l'aide des logiciels dédiés : CATIA et *Hypermesh* pour la pale et l'échantillon en matériau composite.

Conclusions concernant l'analyse FEM en régime de vol stationnaire

Comme conséquence de l'analyse FEM de la pale conçue, des multiples conclusions ont résulté concernant la modélisation et, aussi, le comportement de la structure dans des conditions de sollicitation imposées :

- ✓ le modèle géométrique 3D conçu a l'avantage qu'une tel pale est très légère du à l'introduction de la mousse à la place des nervures de renforcement existantes dans les pales des autre hélicoptères connus ;
- ✓ pour le vol stationnaire, on peut observer que sur le longeron dans la zone de cylindres apparaissent des déformations critiques ayant la valeur maximale de 0,006 % ;
- ✓ la valeur du déplacement maximale de la pale (226 mm) peut être considérée comme acceptable vue les conditions de sollicitation et les dimensions de gabarit de la pale ;
- ✓ la contrainte maximale sur le longeron (78 N/mm^2) montre que celui-ci a une bonne rigidité.

En règle générale, ce sont les couvertures qui ramassent en grande partie les chargements qui sont exercés sur les structures des pales. Aussi, dans ce cas de sollicitation, des tensions critiques équivalentes apparaissent sur la surface latérale intérieure de la couverture dans la zone du longeron.

Une analyse statique structurelle, concernant la variation des contraintes équivalentes sur la couverture de la pale, a été aussi effectuée dans le cas de chargement par le propre poids.

De l'analyse comparative des deux cas de chargement, ont été identifiées des valeurs plus hautes des contraintes équivalentes sur la couverture, dans la zone des cylindres, pour le régime de vol stationnaire. Pour le longeron, les contraintes équivalentes plus hautes se manifestent pour le cas du chargement per le propre poids et sont localisées plutôt dans la zone d'encastrement.

Conclusions concernant l'analyse FEM en régime de vol avec avancement

L'application d'un régime de vol avec avancement dans l'analyse structurelle avec FEM peut mener à l'obtention des résultats très relevant pour le domaine spécifique.

Comme a été montré avant, le régime de vol avec avancement implique deux cas distincts d'analyse : le cas de la pale en avancement et le cas de la pale reculant.

En considérant les données d'entrée identique à ceux d'un vol réel a été possible de déterminer des valeurs différentes des angles d'incidence α pour les deux cas de chargement, ce qui a conduit aux résultats différents des contraintes von Misses pour les cas étudiés. De l'étude des cartes des contraintes sur le longeron et au niveau de la couverture, il est possible d'identifier des valeurs plus grandes d'une manière signifiante sur la pale en avancement. De l'analyse comparative des deux cas de chargement ont résulté, pour le longeron et pour la couverture, des valeurs des contraintes beaucoup plus élevées dans le cas de la pale avec avancement, dans la proximité de la zone d'encastrement.

Comme conclusion finale, on peut souligner que les résultats d'une analyse structurelle sont très valeureux, pouvant servir dans le cas d'intégration d'un système de surveillance du comportement de la pale. Les cartes de contraintes et déformations obtenues peuvent aider pour mieux positionner les senseurs dans la structure.

Conclusions concernant l'analyse FEM de l'éprouvette en matériau composite stratifié

La recherche théorique a été orientée aussi sur l'analyse structurelle d'une éprouvette en matériau composite stratifié par FEM.

L'analyse structurelle FEM a tenu compte des propriétés mécanique des matériaux, déterminées par des essayes mécaniques. L'approche quantitative et qualitative de la réalité de la solution donnée par FEM dépend en grande mesure du type d'élément choisi pour l'analyse, du type de matériau, du mode de modélisation pour atteindre la convergence liée à la solution finale, du mode d'application des liaisons etc.

La comparaison des résultats théoriques avec ceux résultés d'expérimentation a mis en évidence une bonne corrélation. L'étude FEM a été basée sur la méthodologie moderne de simulation des matériaux composites en tenant compte des propriétés structurelles de chaque couche. Ainsi il est possible d'obtenir des informations de type déplacement, contrainte, déformation dans n'importe quelle couche du composite stratifié et aussi dans les interfaces entre les strates. La valeur maximale de la contrainte von Misses (528,733 MPa) est observable dans la zone centrale de l'éprouvette (où est appliqué le chargement) et où apparaît une concentration des contraintes.

Le cinquième chapitre, *Contributions expérimentales*, est axé sur des tests concernant le dépistage des défauts dans les éprouvettes en matériaux composite stratifié armé avec des fibres carbone, en utilisant trois méthodes différentes : avec des jauges électriques résistives, la méthode acoustique et la thermographie infrarouge active. Ont été effectués des tests de fléchissement en quatre points et de traction sur des éprouvettes en matériau composite.

Pour le calcul des paramètres mécaniques impliqués dans les expérimentations ont été développées une série d'applications LabVIEW (DC_1, DC_2, DC_3, DC_4 et DC_5), les résultats obtenus étant utilisés pour tracer des diagrammes et courbes caractéristiques.

Afin de choisir un système de détection optimale, une analyse multicritère a été réalisée à travers laquelle les trois méthodes ont été comparées en tenant compte des avantages et des désavantages de chaque critère. Aussi pour cette analyse, l'application de calcul conçue (DC_5) s'est avérée très utile, surtout dans le cas des critères multiples de sélection. Elle a été programmée pour des calculs simultanés avec sept critères mais elle peut être utilisée, aussi, si le nombre des critères est différent.

En analysant les résultats obtenus des expérimentations sur les éprouvettes en matériau composite stratifié armé avec des fibres carbone, en conditions différentes de sollicitations, il est possible d'identifier les conclusions suivantes :

- ✓ pour le cas de sollicitation au fléchissement en quatre points, le système d'émission acoustique utilisé pour la détection des défauts dans le matériau de l'éprouvette a fourni une augmentation de l'amplitude initiale pour le senseur S3 (situé dans la partie gauche de l'éprouvette). Ça signifie que le défaut initial se produit dans la partie gauche de l'éprouvette et ensuite de propage vers son centre où va s'obtenir une amplitude maximale (celle-ci étant la zone critique) ;

- ✓ la caméra de thermographie IR a aussi détecté des températures plus hautes à la surface de l'éprouvette, de côté gauche (la zone du senseur S3) que dans la zone du senseur S2 (côté droit). La température dans la zone du senseur S1 est initialement réduite mais elle augmente dès l'apparition de la première fissure détectée per S3. Dans la zone su senseur S2 ne sont pas signalées des valeurs critiques, ce qui est confirmé aussi par les signaux captés per les senseurs acoustiques ;
- ✓ l'utilisation de la caméra de thermographie IR pour la sollicitation de traction a prouvé qu'au premier moment a lieu une légère décroissance de la température sur la surface de l'éprouvette, ensuite la température augmente progressivement jusqu'au moment de la rupture pour décroître linéairement à la suite ;
- ✓ les applications de calcul élaborées (DC_1, DC_2, DC_3, DC_4 et DC_5) constituent une interface agréable et sont très utiles dans les calculs de complexité réduite. L'introduction des structures avancées de programmation en langage C, en environnement graphique, a un grand avantage quand les données sont multiples et le calcul plus complexe. L'utilisation de des applications pour les calculs a conduit à des résultats numériques qui peuvent valider correctement les modèles virtuels ;
- ✓ en utilisant le programme DC_5 pour l'analyse multicritères a pu être énoncée la conclusion que, parmi les méthodes étudiées, la méthode de l'émission acoustique a obtenu le meilleur classement. La technique est plus onéreuse mais les senseurs acoustiques peuvent être appliqués sur tout type de structure (à la surface ou intégrés) et ont la capacité de détecter un défaut même s'il est dans la profondeur. La méthode acoustique peut être utilisée même quand la structure est fonctionnement ;
- ✓ la méthode avec des jauges électriques résistives est moins onéreuse (d'ici son utilisation fréquente), peut détecter seulement les déplacements de l'intérieure du matériau maos elle n'a pas l'habilité de détecter les fissures dans le matériau ;
- ✓ la thermographie infrarouge est utile comme méthode de contrôle, offre des informations en ce qui concerne la température sur la surface d'un matériau mais elle ne peut pas pénétrer plus profondément dans matériau et elle n'est pas ni une technique intégrable.

6.2. CONTRIBUTIONS PERSONNELLES ET ORIGINELLES

La recherche de la thèse doctorale s'est proposé une étude ample des méthodes non-destructives (NDT – non destructive techniques) utilisées, basée sur des références de spécialité et de trouver la solution optimale d'analyse qui permettra la détection des défauts structurels depuis leur début, pour les matériaux composites.

Après la détermination de la méthode optimale et des objectifs, durant les recherches et pendant l'élaboration du mémoire de thèse se sont précisées des contributions personnelles de l'auteur, parmi lesquelles les suivantes peuvent être mentionnées :

Contributions originelles théoriques

En ce qui concerne les études théoriques de cette thèse doctorale, les suivantes contributions originelles de l'auteur peuvent être mentionnées :

- ✓ la conception conceptuelle de la structure de masse minimale d'une pale d'hélicoptère léger en conservant en totalité ses fonctions ;

- ✓ la conception d'un modèle 3D de longeron qui offre résistance et rigidité suffisantes à la pale d'hélicoptère sans utiliser les nervure de de renforcement qui se retrouvent dans la construction d'autres types de pales ;
- ✓ la conception d'une méthodologie de calcul par éléments finis pour le calcul de la pale d'hélicoptère en différentes conditions de sollicitation : vol stationnaire, vol d'avancement avec les deux cas (pale en avancement et reculant) et chargement par le propre poids ;
- ✓ l'obtention des cartes des contraintes et des déformations dans la structure du longeron et au long de la couverture dans le but de positionner les senseurs d'un système de surveillance de l'intégrité des structures ;
- ✓ la réalisation d'une analyse comparative statistique du comportement mécanique du longeron et de la couverture pour les quatre cas de sollicitation étudiés ;
- ✓ l'élaboration d'une routine de programmation MATLAB pour la réalisation des graphs d'analyse statistique.

Contributions originelles expérimentales

- ✓ la réalisation des échantillons/éprouvettes en matériau composite stratifié armé avec des fibres carbone ;
- ✓ la conception des stands expérimentaux pour les essayes mécaniques effectués sur les échantillons : fléchissement en quatre points et traction ;
- ✓ l'élaboration des programmes de calcul en utilisant l'environnement de programmation graphique LabVIEW (DC_1, DC_2 et DC_3) pour l'obtention des caractéristiques mécaniques du matériau testé ;
- ✓ l'élaboration d'un programme LabVIEW (DC_4) pour l'analyse spectrale des signaux acoustiques fournis par les trois senseurs appliqués sur la surface de l'éprouvette ;
- ✓ l'élaboration d'un programme LabVIEW pour le calcul des indicateurs et des coefficients impliqués dans l'analyse multicritères ;
- ✓ le dépistage des défauts structurels de surface apparus pendant les essayes mécaniques, par l'analyse des cartes thermographiques ;
- ✓ l'identification des défauts de structure en profondeur par l'analyse de l'amplitude des signaux acoustiques, de la forme et de leur retardement ;
- ✓ la définition et la synthèse, à base des résultats obtenus et des méthodes étudiées ; des conclusions concernant les expérimentations effectués.

6.3. VALORISATION DES RESULTATS

Les recherches réalisées pendant le développement de la thèse ont fait possible l'obtention des résultats aptes d'être publiés dans des différentes apparitions. Ainsi, l'auteur a publié 15 articles dans le domaine de la thèse et dans des domaines connexes qui peuvent être structurés de la manière suivante :

- **7** articles dans les documents des manifestations scientifiques côtés ISI proceedings ;
- **3** articles dans les documents des conférences internationales avec comité de lecture ;
- **5** articles publiés dans des revues nationales roumaines.

Pour **9** de ces articles, Mlle Cazangiu Diana est le premier auteur et pour **1** d'entre eux et le seul auteur.

6.4. DIRECTIONS DE DEVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE

Compte tenu des résultats théoriques et expérimentaux obtenus pendant la recherche doctorale, il est à l'évidence le domaine du détectage et l'évaluation des défauts par des méthodes non-destructives offre des nouvelles perspectives dans l'approche des directions connexes comme :

- Étude du comportement des matériaux avancés, intelligentes dans des différentes conditions de sollicitation ;
- Adaptation des méthodes d'évaluation par émission acoustique à des structures composites existantes dans le domaine aérospatiale et l'élaboration d'une méthode rapide et efficace de diagnostic par l'utilisation des senseurs intégrables avec télétransmission ;
- Développement et l'amélioration des propriétés des matériaux composites par l'analyse de leurs propriétés à l'aide de la méthode de détection des défauts par émission acoustique ;
- Développement des systèmes avancés de surveillance de l'intégrité des structures du domaine aérospatial qui seraient capable d'identifier et de localiser les défauts et, ensuite, d'isoler et de stabiliser la zone avariée ainsi que le système puisse être sauvegardé.

BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE

AWERBUCH, J., GORMAN, M. R., MADHUDAR, M., *Monitoring Acousting Emission During Quasy-Static Loading-Unloading Cycles of Filament-Wound Graphite-Epoxy Laminate Coupouns*, Materials Evaluation, Vol. 43, 6, 1985

BAKER, A., DUTTON, S., KELLY, D., *Composite materials for Aircraft Structures*, Second edition. Published by American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc (AIAA), 2004, ISBN 1 – 56347 – 540 – 5

BALAGEAS, D., FRITZEN, C. P., GÜEMES, A., *Structural Health Monitoring. Introduction*, ISTE Ltd., 2010, ISBN 978-0470612071

BEJINARU MIHOC, Gh., POP, A. P., MITU, G. L., GEAMĂN, H., BEJINARU MIHOC, A., **CAZANGIU, D.**, *Characteristics of the composite materials cutting process*. In Proceedings of the 3rd International Conference COMEC 2010, Braşov, Romania, ISSN 1844 – 9336

CAZANGIU Diana, DIMA, Gabriel, DRAGAN, Razvan, ROȘCA, Ileana, *The Structural Analysis of the main Rotor Blade for a light Helicopter - Case of Hovering Flight Mode*. In "ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering", vol. XIII, Nr. 1, p. 63 – 66, ISSN 1583 - 0691

CAZANGIU, D., ROȘCA., I. C., *The current trends in Structural Health Monitoring in Aerospace Applications.* In Proceedings of the 5th Conference on COMEC 2013, Braşov; Romania, ISBN 978 – 606 – 19 – 025 – 5.

CHAMBERS, T. J., *Durability Testing of an Aircraft Structural Health Monitoring System*, MIT, 2006

FARRAR, C. R, WORDEN K., *An Introduction to Structural Health Monitoring*, Phil. Trans. R. Soc. A., 2007

HOBBS, C. P., TEMPLE, A., *The Inspection of Aerospace Structures Using Transient Thermography*, Brit J NDT 35, 1993.

KAW, A. K., *Mechanics of Composite materials* (2nd ed.), Boca Raton CRC Press, 2005, ISBN 0 – 8493 – 1343 – 0

MAZUMDAR, K. S., *Composites manufacturing materials, product, and process engineering.* ISBN 798-0-8493-0585, CRC Press, 2002

REIFSNEIDER, K. L., *Fatigue of composite materials*, Series 4, Elsevier Science Publishers, 1991. ISBN: 0–444–42525–X

REIFSNEIDER, K. L., HENNEKE, E. G., STINCHCOMB, W. W., *The Mechanics of Vibrothermography, in Mechanics of Non-Destructive Testing*, New-York, 1980

SOHN, H., Farrar, C.R., HEMEZ, F.M., CZARNECKI, J.J., SHUNK, D.D., STINEMATES, D.W., NADLER, B.R., *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*, LA-13976-MS, 2003

STASZEWSKI W., WORDEN K., *Signal processing for damage detection*. In Encyclopedia of Structural health Monitoring, John Wiley & Sons Ltd, pp. 415 – 421, 2009, ISBN: 9780470092866

STEPINSKI Tadeusz, UHL Tadeusz, STASZEWSKI Vielsaw, *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Application*, John Wiley & Sons, 2013

THANGJITHAM, S., CHOI, H. J., *Interlaminar crack problems of a laminated anisotropic medium*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 30, nr. 7, 1993

WORDEN K., STASZEWSKI W., HENSMAN J. J., *Natural computing for mechanical system research: A tutorial overview*. Mechanical systems and sygnal processing, 25(1), 4–111, 2011

WORDEN, K., FARRAR, C. R., MANSON, G., PARK, G., *The fundamental axioms of Structural Health Monitoring*. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A 463 (2082), 2007

ZINKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L., *The Finite Element Method, vol. 1 – The Basis*, Fifth Edition, Ed. Butterworth – Heinemann, 2000, ISBN 0 – 7506 – 50494

*** *AD-A033 21 Engineering Design Handbook. Helicopter Engineering. Part 2*, National Technical Information Service, 1976

*** Composite Materials Handbook Series, MIL-HDBK-17, 2002