

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE
ASACHI" DIN IAȘI



**STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA SOLICITĂRILOR
DIN EXPLOATARE ASUPRA CARACTERISTICILOR
DE MATERIAL ȘI A STRUCTURII PALETELOR
DE TURBINĂ EOLIANĂ
-REZUMAT-**

Ing. Ciprian-Ionuț MORĂRAȘ

Conducător de doctorat: Prof. univ. ab. dr. ing. Viorel GOANȚĂ

IAȘI, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 04.07.2024 la ora 10, în sala de conferințe "Cezar Opreșan" M3 a Facultății de Mecanică, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"STUDII SI CERCETĂRI PRIVIND INFLUENTA SOLICITĂRILOR
DIN EXPLOATARE ASUPRA CARACTERISTICILOR DE
MATERIAL ȘI A STRUCTURII PALETELOR DE TURBINĂ
EOLIANĂ"**

elaborate de domnul **MORĂRAȘ CIPRIAN - IONUȚ** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Conf. univ. dr. ing. Gelu Ianuș, Universitatea Tehnica "Gheorghe Asachi" din Iași - președinte
2. Prof. univ. dr. ing. Viorel Goanță, Universitatea Tehnica "Gheorghe Asachi" din Iași conducător de doctorat
3. Prof. univ. dr. ing. Ștefan Pastramă, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie "Politehnica" din București- referent oficial
4. Prof. univ. dr. ing. Mariana Domnica Stanciu, Universitatea "Transilvania" din Brașov-referent oficial
5. Prof. univ. dr. ing. Paul-Doru Bârsănescu, Universitatea Tehnica "Gheorghe Asachi" din Iași-referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

**STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA SOLICITĂRILOR
DIN EXPLOATARE ASUPRA CARACTERISTICILOR DE
MATERIAL ȘI A STRUCTURII PALETELOR DE TURBINĂ
EOLIANĂ**

Ing. Ciprian-Ionuț MORĂRAȘ
Domeniul: Inginerie Mecanică

Președinte comisie doctorat:
Conducător de doctorat:
Referenți oficiali:

Gelu Ianuș
Viorel Goanță
Ștefan Pastramă
Mariana Domnica Stanciu
Paul-Doru Bârsănescu

Cuprins

INTRODUCERE.....	ix
CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE CONVERSIE A ENERGIEI EOLIENE	1
1.1 Energia regenerabilă și dezvoltarea durabilă a societății	1
1.1.1 Energia și poluarea mediului	1
1.2 Cedarea palelor.....	1
1.2.1 Defecte ale palelor de turbină eoliană	2
1.3 Solicitări ale palelor în timpul funcționării	3
1.4 Concluzii generale la capitolul 1	3
CAPITOLUL 2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA CARACTERISTICILOR DE MATERIAL DIN CARE SUNT FABRICATE PALELE DE TURBINĂ EOLIANĂ	5
2.1 Scopul cercetărilor experimentale privind materialul GFRP	5
2.2 Elaborarea materialului compozit GFRP	5
2.3 Încercarea la tracțiune aplicată pe GFRP	6
2.4 Determinarea caracteristicilor elastice ale materialului compozit <i>GFRP</i>	17
2.5 Încercarea la forfecare pură.....	19
2.6 Încercarea la compresiune	21
2.7 Influența umidității asupra caracteristicilor de tracțiune ale materialului GFRP	26
2.8 Analiza structurală a materialului compozit GFRP.....	28
2.8.1 SEM pe materialul GFRP cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ - probe supuse la tracțiune .	28
2.8.2 SEM pe materialul GFRP cu orientarea $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ - probe supuse la tracțiune .	29
2.8.3. SEM pe materialul GFRP cu orientarea $[0^\circ/90^\circ]$ - probe supuse la compresiune.....	30
2.9 Concluzii generale la capitolul 2	31
CAPITOLUL 3. TESTE EFECTUATE PE PROBE CT PREFISURATE DIN GFRP – VITEZA DE PROPAGARE A FISURII, DETERMINĂRI DEFECTOSCOPICE ȘI TENACITATEA LA FISURARE	33
3.1 Considerații teoretice privind determinarea vitezei de propagare a fisurii	33
3.2 Descriere program de încercări	34
3.3 Materialul utilizat	35
3.4 Efectuarea încercărilor pentru determinarea da/dN	36
3.5 Rezultate experimentale	37
3.6 Concluzii privitoare la determinarea vitezei de propagare a fisurii pe probele fabricate din GFRP	46
3.7 Determinări defectoscopice pe probe CT din GFRP.....	47
3.7.1 Metoda utilizată pentru determinarea fisurii inițiale propagate prin oboseală	47
3.8 Determinări ale tenacității la fisurare pe probe CT prelevate din plăci de GFRP.....	49
3.8.1 Considerații teoretice privind determinarea tenacității la fisurare.....	49
3.8.2. Materiale și probe utilizate	49
3.8.3. Interpretarea graficului forță-deplasare	50
3.8.4 Rezultate experimentale obținute la încercările pentru determinarea tenacității la fisurare pe probe GFRP	51
3.9 Concluzii privitoare la determinarea tenacității la fisurare pe probe din GFRP	59
3.10 Concluzii generale la capitolul 3	60
CAPITOLUL 4. ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A PALEI DE TURBINĂ EOLIANĂ	62
4.1 Preprocesarea modelului palei de turbină eoliană.....	62
4.2 Cazul 1: Analiza cu elemente finite la încovoiere: $F=1000N$	63

4.3 Cazul 2: Analiza cu elemente finite la solicitarea de răsucire (sens orar) ($M_t = -170660,646$ Nmm).....	64
4.4 Cazul 3: Analiza cu elemente finite la solicitarea de răsucire (sens antiorar) ($M_t = 170660,646$ Nmm).....	65
4.5 Cazul 4: Analiza cu elemente finite la solicitarea compusă (încovoiere + răsucire sens orar) ($F = 1000\text{N} + M_t = -170660,646$ Nmm)	66
4.6 Cazul 5: Analiza cu elemente finite la solicitarea compusă (încovoiere + răsucire sens antiorar ($F = -1000\text{N} + M_t = 170660,646$ Nmm).....	67
4.9 Concluzii generale la capitolul 4	69
CAPITOLUL 5. CONCEPEREA, PROIECTAREA ȘI REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL DE TESTARE LA SOLICITARE COMPUSĂ.....	70
5.1 Scopul proiectării și realizării standului experimental	70
5.2 Descrierea standului	70
5.3 Descrierea funcționării standului.....	72
5.4 Concluzii generale la capitolul 5	72
CAPITOLUL 6. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND TESTAREA PALEI LA SOLICITARE COMPUSĂ	73
6.1 Standul experimental și senzorii utilizați	73
6.2 Tensometria electrică rezistivă	76
6.3 Determinarea tensiunilor și deformațiilor pe pala de turbină eoliană	78
6.4 Calibrarea cu greutăți la solicitarea de încovoiere și răsucire	80
6.5 Rezultate experimentale obținute pe traductoarele rectangulare.....	82
6.6. Rezultate experimentale obținute pe lanțurile tensometrice de tip delta.....	94
6.6.1 Solicitarea de încovoiere a palei.....	94
6.6.2 Solicitarea de răsucire a palei	103
6.6.2.1 Solicitarea la răsucire în sens orar	103
6.6.2.2 Solicitarea în sens antiorar	105
6.6.3 Solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire a palei	107
6.6.3.1 Solicitarea de încovoiere cu răsucire în sens orar.....	107
6.6.3.2 Solicitarea de încovoiere cu răsucire în sens antiorar	111
6.7 Validarea rezultatelor experimentale cu AEF	115
6.8 Concluzii generale la capitolul 6	117
CAPITOLUL 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	119
7.1 Concluzii finale	119
7.2 Contribuții proprii.....	120
7.3 Direcții viitoare de cercetare	121
Diseminarea rezultatelor cercetării.....	122

REZUMAT

Teză de doctorat intitulată *Studii și cercetări privind influența solicitărilor din exploatare asupra caracteristicilor de material și a structurii paletelor de turbină eoliană*, reprezintă rezultatul unei munci pe o perioadă de șase ani în cadrul Universității Tehnice “ Gheorghe Asachi ” din Iași, Facultatea de Mecanică din departamentul Inginerie Mecanică, Mecatronică și Robotică. Lucrarea este structurată în șapte capitole, bibliografie și anexe.

Teza de doctorat este alcătuită, conform prevederilor actuale, din două părți: partea generală care cuprinde stadiul actual al cunoașterii/cercetării, și partea a doua în care regăsim cercetări proprii, contribuții proprii și rezultate experimentale. În introducere se prezintă justificarea abordării temei, importanța și actualitatea temei de cercetare și obiectivele tezei de doctorat.

În **Capitolul 1** prezintă stadiul actual al cercetărilor care cuprinde un studiu de sinteză privind dezvoltarea energiei eoliene în Uniunea Europeană și România. Tot aici se descriu elementele constructive ale unei turbine eoliene, elementul de interes fiind pala de turbină. Datorită structurii sale complexe și a modului de funcționare, se realizează o sinteză a factorilor de risc și a defectelor ce pot apărea în timpul funcționării. Este important să se studieze materialul din care este fabricată pala de turbină prin diferite teste mecanice (tracțiune, compresiune, încovoiere, forfecare). Tot în capitolul 1 sunt precizate și direcțiile de cercetare din cadrul tezei.

Capitolul 2 prezintă cercetările experimentale privind caracteristicile pentru materialul compozit armat cu fibră de sticlă GFRP cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ și $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, plăcile fiind confecționate de SC. Compozite Brașov SRL, având grosimea de 4mm. În scopul obținerii rezistențelor de rupere, s-au efectuat teste statice de tracțiune și compresiune. Toate testele statice și cele ce urmează a fi prezentate au fost efectuate pe mașina de încercări mecanice INSTRON 8801. Pentru încercările la tracțiune s-au utilizat câte cinci epruvete debitate longitudinal (în raport cu formatul plăcii), transversal și pe diagonală la 45° din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$. Din placa cu fibrele orientate la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ au fost confecționate câte cinci epruvete debitate longitudinal și transversal. Încercările statice au fost realizate în conformitate cu standardele ASTM D3039 și ASTM D3518. În cadrul acestui capitol, pentru determinarea constantelor de material s-a utilizat metoda tensometriei electrice rezistive. Un alt test utilizat pentru epruvetele din material compozit a fost cel de compresiune pe placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$. S-a realizat un dispozitivul conform ASTM D695 modificat (Boeing BSS 7260) și s-au determinat rezistențele la compresiune și modulul lui Young, pe epruvete debitate transversal (pe direcția bătăturii). Modulul lui Young a fost determinat cu ajutorul a două mărci tensometrice unidirecționale lipite pe ambele fețe în zona de calibrare. Pentru determinarea coeficientului Poisson al GFRP, s-a conceput un nou dispozitiv de testare. Dispozitivul conceput și realizat poate testa, în același timp, patru epruvete de aceeași formă și aceleași dimensiuni. Astfel, prin dispunerea celor patru eșantioane după laturile unui pătrat s-a mărit momentul de inerție al secțiunii transversale a epruvetei, iar cu ajutorul distanțierelor s-a micșorat lungimea de flambaj (aceasta rămâne mai mare doar în partea centrală a epruvetelor, acolo unde s-au montat cele două rozete tensometrice). S-au efectuat și încercări la forfecare pură pe epruvete plate, decupate din cele două plăci de compozit armate cu țesătură de fibră de sticlă, în

vederea determinării tensiunii tangențiale la rupere $\tau_{rf} [0^\circ/90^\circ]$, $\tau_{rf} [-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ și a modulului de elasticitate transversal $G_{[0^\circ/90^\circ]}$ și $G_{[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]}$. Cunoscând faptul că palele de turbină eoliană funcționează în condiții nefavorabile (intemperii, temperaturi scăzute) au fost necesare și teste de imersie în apă pe durata a 7, 14, 21 și 31 de zile. În plus, cum pala de turbină poate funcționa la temperaturi foarte scăzute, s-a urmărit și imersarea unei epruvete în azot lichid, la o temperatură de -70°C timp de patru zile. În urma imersării epruvetelor s-a constatat că rezistența la tracțiune scade odată cu numărul de zile de imersie. Analize de microscopie electronică au fost realizate cu ajutorul microscopului electronic SEM Quanta 2003D, pe probele cu cele mai mari rezistențe obținute în urma încercării la tracțiune (pe trei direcții din placa $[0^\circ/90^\circ]$ și două direcții din placa $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ și compresiune (debitate pe direcție transversală din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$). Scopul a fost acela de a evidenția aspectele clare de rupere a fibrelor și zonele caracteristice.

Capitolul 3 conține încercări efectuate pe epruvete CT (compact tension) confecționate din compozit armat cu fibră de sticlă GFRP cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ și $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, plăcile confecționate de SC. Compozite Brașov SRL având, în acest caz, grosimea de 10mm. Modul de prelevare al probelor din cele două plăci și numărul probelor debitate este identic cu cel prezentat în capitolul 2. S-a urmărit determinarea vitezei de propagare a fisurii și s-au trasat graficele doar pentru cele mai reprezentative probe din punct de vedere al rezultatelor obținute. Graficele trasate au fost: variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare, $a-N$; variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare, $da/dN-N$; variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii, $da/dN-\Delta K$. După testele de prefisurare s-a recurs la determinări defectoscopice pentru a se putea vizualiza și măsura fisura inițiată prin propagarea la oboseală. Determinarea fisurilor din probele CT a fost efectuată cu ajutorul lichidelor penetrante, respectând toate etapele. Și în acest caz, s-a ales câte o probă reprezentativă din punct de vedere al propagării fisurii. Pentru evidențierea fisurilor, pentru toate cele 5 probe examinate s-a utilizat un stereomicroscop de tipul OPTIKA SN 255308 și un microscop optic Leica 5000 DMI. Ultimul subcapitol prezintă determinarea tenacității la fisurare.

Capitolul 4 cuprinde analiza cu elemente finite (FEM) asupra palei de turbină eoliană, în soft-ul ANSYS Academic R17.2. Caracteristicile pentru materialul din care a fost confecționată pala de turbină au fost furnizate pentru compozitul E-glass, din care au fost confecționate și epruvetele din capitolul 2. Caracteristicile de material obținute experimental au fost introduse în librăria ANSYS. S-a estimat că încărcarea maximă la care modelul palei de turbină poate fi supus este: $F=1000N$ (aplicată la vârful palei) și $M_t=170660\text{ Nmm}$ (aplicată la vârful palei). Au fost realizate FEM pentru 5 cazuri de încărcare diferite: încovoiere $F=1000N$; răsucire sens orar $M_t=-170660,646\text{ Nmm}$; răsucire sens antiorar $M_t=170660,646\text{ Nmm}$; încovoiere + răsucire sens orar $F=-1000N + M_t=-170660,646\text{ Nmm}$; încovoiere + răsucire sens antiorar $F=1000N + M_t=170660,646\text{ Nmm}$. Rezultatele obținute în urma FEM a distribuției tensiunilor echivalente von Mises maxime și a tensiunii principale maxime au ajutat la amplasarea pe pala la scară a celor patru rozete tensometrice și a celor patru lanțuri tensometrice.

Capitolul 5 prezintă conceperea, proiectarea și realizarea standului experimental de testare la solicitare compusă. Scopul realizării a fost să se caracterizeze comportamentul palelor în condiții de

solicitări diverse. Obiectivul principal a constat în dezvoltarea și consolidarea de tehnologii inovatoare pentru sistemele de monitorizare a integrității structurale ale palelor de turbină eoliană. O primă noutate a acestei realizări este modul de aplicare în același timp a unui moment de torsiune M_t și a unui moment de încovoiere M_i . Prin intermediul sistemului de automatizare care efectuează operația de răsucire și încovoiere controlată de motoarele pas cu pas s-a îmbunătățit calitatea procesului de încărcare și descărcare.

Capitolul 6 a fost destinat experimentelor pe pala de turbină eoliană la solicitări simple (încovoiere și răsucire) și compusă (încovoiere cu răsucire). Au fost studiate zece cazuri de încărcări și descărcări: încovoiere simplă - încărcare, încovoiere simplă - descărcare, răsucire sens orar - încărcare, răsucire sens orar -descărcare, răsucire sens antiorar -încărcare, răsucire sens antiorar - descărcare, răsucire sens orar și încovoiere -încărcare , răsucire sens orar și încovoiere -descărcare, răsucire sens antiorar și încovoiere -încărcare, răsucire sens antiorar și încovoiere -descărcare. Pentru determinarea deformațiilor specifice s-a utilizat metoda tensometriei electrice rezistive. Au fost aplicate 4 traductoare rectangulare în anumite zone critice ale palei și s-au achiziționat 12 deformații specifice prin intermediul punții tensometrice Vishay P3. Alte 4 lanțuri tensometrice cu traductoare delta au furnizat 60 de deformații, utilizând sistemul de achiziție de date de tip QUANTUM HBM MX1615B. Utilizând metoda indirectă, recomandată de Micro-Measurements Vishay, s-au determinat deformațiile principale și direcțiile lor, respectiv tensiunile principale și direcțiile lor, pentru fiecare rozetă.

Capitolul 7 formulează concluziile finale, contribuțiile proprii și sugerează direcții viitoare de cercetare deschise în domeniul abordat.

La sfârșitul fiecărui capitol sunt prezentate concluziile iar la finalul tezei se prezintă bibliografia completă, lista publicațiilor autorului și anexe.

INTRODUCERE

Tema abordată în această teză de doctorat, care are o evidentă importanță teoretică și practică, a constituit o preocupare a autorului începând cu lucrările de finalizare a studiilor de licență și master. Pala de turbină eoliană, care a fost analizată și testată, provine de la proiectul de cercetare PCCA 2013-4-0656, contract nr. 59/01.07.2014. Analizând stadiul actual al cercetării în domeniu, s-au constatat unele deficiențe la testarea palelor la solicitări compuse și s-au trasat astfel direcțiile de cercetare. Teza își propune să dezvolte un sistem de testare în laborator ale palelor de mici dimensiuni, care să reproducă cât mai fidel solicitările din timpul funcționării.

În ultimii ani, producția de energie electrică din sursă eoliană a cunoscut o creștere exponențială, atât pe plan internațional, cât și național. Ca urmare a cercetărilor efectuate asupra turbinelor eoliene, costul producerii de energie electrică din energie eoliană a devenit din ce în ce mai competitiv. Energia eoliană a câștigat din ce în ce mai mult teren în industria energetică, fiind o sursă regenerabilă, care nu produce emisii de bioxid de carbon. O tendință majoră o reprezintă dezvoltarea de turbine eoliene mai mari, la care costul energiei furnizate este mai mic. Cu toate acestea, defectarea turbinelor eoliene reprezintă încă o problemă gravă, mai ales că deteriorarea palelor poate provoca daune majore. În ansamblul sistemului turbinei eoliene, pala reprezintă elementul cel mai puțin fiabil. Acest lucru justifică importanța cercetării privind creșterea fiabilității palelor turbinelor eoliene.

Tema tezei de doctorat se încadrează în tendințele internaționale și naționale privind creșterea performanțelor turbinelor eoliene și a ponderii energiei regenerabile în vederea reducerii încălzirii globale. Datorită creșterii diametrului rotorului, înlocuirea materialelor metalice cu materiale compozite de tipul GFRP sau CFRP, a devenit o prioritate actuală în construcția palelor de turbină eoliană. Astfel, tema se încadrează în direcții moderne, actuale și de mare perspectivă pentru prioritățile lumii actuale. Aplicabilitatea cercetărilor efectuate în cadrul tezei, privind creșterea fiabilității palei de turbină eoliană, urmărește și testează componenta principală din ansamblul unei turbine eoliene.

Pornind de la constatarea că palele reprezintă elementul cel mai puțin fiabil din ansamblul turbinelor eoliene, teza își propune să dezvolte cercetări privind atât materialul compozit din care este confecționată pala, cât și realizarea în laborator a unor încercări ale palelor de mici dimensiuni, care să reproducă cât mai fidel posibil solicitările care apar în timpul funcționării. Obiectivele cercetării au fost următoarele: testarea complexă a materialelor compozite armate cu fibră de sticlă (GFRP) în diferite condiții de umiditate; identificarea mecanismelor de cedare a compozitelor; analiza cu elemente finite a unui model de pală supus la încovoiere cu torsiune; testarea modelului de pală supus la încovoiere cu torsiune, achiziția și prelucrarea datelor experimentale; compararea rezultatelor prezise cu AEF cu cele obținute experimental; identificarea posibilelor moduri de cedare ale modelului de pală; formularea de concluzii și recomandări.

Astfel, teza aduce contribuții la creșterea fiabilității palelor de turbină eoliană, ceea ce determină îmbunătățirea siguranței în exploatare a turbinelor eoliene și dezvoltarea energiei bazată pe surse regenerabile.

1.1 Energia regenerabilă și dezvoltarea durabilă a societății

1.1.1 Energia și poluarea mediului

Odată cu începerea și dezvoltarea procesului de industrializare, consumul de energie, atât la nivel global cât și local, a înregistrat o creștere accelerată, motivele fiind diverse. Deși nu se cunoaște o sursă de energie complet “curată”, totuși, sursele tradiționale de energie sunt mult mai poluante, contribuind la creșterea emisiilor de gaze cu efect de seră, care au consecințe dramatice asupra încălzirii globale. Dezvoltarea energiei regenerabile va avea o contribuție considerabilă la atenuarea schimbărilor climatice. Din fericire, guvernele au conștientizat importanța protecției mediului și iau măsuri pentru a reduce impactul pe termen lung al industriei energetice și nu numai. Sunt elaborate strategii susținute în vederea creșterii eficienței de utilizare a energiei și de implementare a programelor de eficiență energetică. Dezvoltarea economică depinde, în mare măsură, de capacitatea de a asigura necesarul de energie la un preț rezonabil. Resursele regenerabile de energie, precum și tehnologiile care au o influență cât mai redusă asupra mediului, constituie o prioritate pentru prezent și viitor.

Pentru prima dată, în 2020, energia provenită din surse regenerabile a depășit-o pe cea produsă din combustibili fosili, devenind principala sursă de energie a UE. Astfel, energia electrică produsă în UE provine în proporție de 38 % din surse regenerabile, 37 % din combustibilii fosili și 25 % din energia nucleară. Legea europeană a climei prevede că până în anul 2030 emisiile de gaze cu efect de seră să fie reduse cu 55%, urmând ca până în 2050 să se atingă neutralitatea climatică.

România, ca țară a UE, va trebui să implementeze aceste prevederi. Conform Raportului anual privind activitatea ANRE din 2021, ponderea surselor energetice din România este următoarea: sursele regenerabile contribuie la balanța energetică cu 45,47%, dintre care energia hidro contribuie cu 30,28%, eoliană cu 11,09%, solară cu 3,09% etc.

Construirea unor turbine eoliene cu putere nominală cât mai mare reprezintă principalul mod de scădere a prețului energiei electrice produse din această sursă. Aceasta implică realizarea unor rotoare cu diametre cât mai mari. Cele mai mari turbine au o putere nominală de peste 10MW și un diametru al rotorului de circa 190m. Mărirea diametrului elicei implică creșterea lungimii palelor. Pentru o elice cu diametrul de 190m, pala are o lungime de 83m. La turația nominală a rotorului de 13 rot./min, viteza vârfului palei este circa 300km/h.

Realizarea unor rotoare de mari dimensiuni nu ar fi posibilă fără utilizarea materialelor compozite pentru construcția palelor. Costul celor trei pale reprezintă circa 15-20 % din costul total al turbinei eoliene. Înlocuirea unei pale poate costa până la 200.000\$, iar o zi de nefuncționare a turbinei produce pierderi de 800-1600\$ (Shohag, M.A.S ș.a., 2017; Mishnaevsky, 2020; Burton T ș.a., 2001).

1.2 Cedarea palelor

Prin creșterea lungimii, tensiunile mecanice din pală se măresc și probabilitatea cedărilor crește. Pala este elementul cel mai puțin fiabil al turbinei eoliene. Ruperea unei pale determină dezechilibrarea rotorului și, de obicei, avarierea celorlalte pale datorită impactului cu fragmentele provenite din pala ruptă.

În perioada 2015-2020, s-au produs 26 de accidente majore la turbinele eoliene din întreaga lume. Dintre acestea, 17 (65,38 %) s-au datorat ruperii unor pale, figura 1.3. În afară de ruperi, palele mai pot ceda și ca urmare a altor cauze, cum ar fi: acțiunea mediului, defecte ale materialului compozit etc. Palele turbinelor eoliene pot avea defecte introduse încă din procesul de fabricație, sau, acestea pot să apară ca urmare a exploatării. Defectele de fabricație mari sunt remediate în fabrică. Defectele

mici își pot mări dimensiunea inițială ca urmare a solicitărilor din exploatare: solicitări variabile, șocuri, solicitări compuse, factori de mediu. Cele mai frecvente defecte de fabricație sunt:

- exfolierea stratului protector;
- îmbinări cu adeziv necorespunzătoare;

Din aceste motive, creșterea fiabilității turbinelor eoliene este preponderat determinată de creșterea fiabilității palelor. Aceasta justifică focalizarea cercetărilor în vederea realizării unor pale cu un risc de cedare cât mai scăzut.

1.2.1 Defecte ale palelor de turbină eoliană

Degradări ale palelor turbinelor eoliene se pot produce în cursul procesului de fabricație, la transport, la montaj sau în timpul exploatării. Defectele mari apărute în procesul tehnologic, capabile să pună în pericol buna funcționare a palei, sunt remediate chiar de compania producătoare. Defectele mici pot genera microfisuri care se măresc ca urmare a solicitărilor din timpul exploatării (solicitări compuse, șocuri, factori de mediu). Aceste fisuri pot atinge, în timp, mărimea critică și, din acest motiv, se recomandă inspectarea periodică a palelor și/sau monitorizarea acestora în timpul funcționării, cu ajutorul senzorilor (Xiaowen Song ș.a., 2022).

În prezent procesul de fabricație al palelor este parțial automatizat și, astfel, multe dintre defectele de fabricație au fost eliminate. Mai există, însă, unele zone critice ale palei care nu sunt accesibile tehnicilor uzuale de control nedistructiv (NDT) (<https://www.windfarmbop.com/wind-turbine-blade-damage-detection-systems>):

- mărci tensometrice lipite pe suprafața palei sau înglobate în materialul compozit la fabricarea palei;
- fibre optice incluse în materialul palei (metoda Fibre Bragg Gratings -FBG);
- controlul prin metoda cu ultrasunete;
- termografia;
- detectarea emisiilor acustice (50 kHz to 1 MHz) care apar în timpul funcționării palei, ca urmare a rupei fibrelor sau a fisurării matricei;
- tehnici de tip *Machine Vision*, cum ar fi Digital Image Corelation (DIC).

Fisuri în palele de turbină eoliană

Fisuri longitudinale

Fisuri cu lungimea de 50-400 mm au fost observate atât la baza palelor, cât și în zona aerodinamică. Cea mai lungă fisură longitudinală raportată a avut 600 mm și s-a dezvoltat în stratul de adeziv. Dezlipiri de până la 1,35m lungime au fost înregistrate pe bordul de fugă al palelor.

Fisuri transversale

Fisuri transversale cu lungimi de până la 40 mm au fost observate, în special, pe bordul de fugă. Fisurile transversale au fost clasificate astfel:

- Fisuri simple, care apar numai pe una dintre cele două jumătăți ale palei și se opresc la marginea acesteia;
- Fisuri pe circumferință, care se extind atât pe intradosul cât și pe extradadosul palei;

Eroziuni la bordul de atac și de fugă

Inspectarea a 36 de pale de turbine eoliene, aflate în serviciu de 17-22 ani, a evidențiat următoarele defecte majore la bordul de fugă, tabelul 1.1, (Ataya S, 2013):

- Fisuri longitudinale între materialele lipite, la distanța de circa 0,73m din raza rotorului;
- Fisuri transversale, care apar, în special, pe bordul de fugă, în zona cea mai solicitată la oboseală;
- Tăieturi și striviri.

1.3 Solicitări ale palelor în timpul funcționării

În timpul funcționării, pala de turbină eoliană este supusă la următoarele solicitări: încovoiere în două plane, solicitări axiale și torsiune.

Materialele compozite cu matrice polimerică sunt hidrofile. Absorbția apei în pale are multiple efecte:

- creșterea greutateii palelor, majorând astfel încărcările acestora;
- producerea de dezechilibre, care conduc la apariția vibrațiilor;
- absorbția umidității în materialele compozite conduce la scăderea caracteristicilor mecanice și elastice ale acestora
-

1.4 Concluzii generale la capitolul 1

1. Dezvoltarea energiei regenerabile va avea o contribuție considerabilă la atenuarea schimbărilor climatice. România are un potențial eolian ridicat, dar încă insuficient valorificat. Din aceste motive, dezvoltarea energiei eoliene va cunoaște o creștere accelerată în viitor;
2. Construirea unor turbine eoliene cu putere nominală cât mai mare reprezintă principalul mod de scădere a prețului energiei electrice produse din această sursă. Aceasta implică realizarea unor rotoare cu diametre tot mai mari. Cele mai mari turbine au o putere nominală de peste 10MW și un diametru al rotorului de circa 190m. Palele acestui rotor au o lungime de 83m. Aceste pale solicită materialele componente aproape de limitele lor de cedare, în timpul funcționării turbinei. Din acest motiv sunt necesare cercetări aprofundate ale materialelor și palelor pentru a preveni ruperea acestora;
3. Pala este elementul cel mai puțin fiabil din structura unei turbine eoliene. Ruperea unei pale determină, de obicei, și avarierea celorlalte pale. Dintre accidentele produse la turbine eoliene în perioada 2015-2020, peste 65% s-au datorat avarierii palelor. Rezultă de aici importanța proiectării corecte și a testărilor corespunzătoare a palelor și a materialelor din care acestea sunt confecționate;
4. Mecanismele de cedare ale palelor sunt complexe: fisuri, delaminări, dezlipiri, flambaj local etc. În vederea identificării modurilor de cedare, suprafețele de rupere trebuie să fie examinate vizual, prin microscopie optică și electronică (SEM);
5. Palele turbinelor eoliene au o structură complexă, secțiunea transversală tipică fiind cea a unui profil multiplu-conex cu pereți subțiri. La fabricarea palei se folosesc mai multe materiale, îmbinate între ele: aliaje metalice, compozite (armate cu fibre, cu țesătură, tip sandwich), materiale de protecție (grund, geluri pentru protecție UV, vopsea etc.). Atât materialele componente cât și întreaga structură a palei trebuie să fie testate în vederea stabilirii caracteristicilor limită. Materialele compozite care intră în componența palelor de turbină (GFRP și CFRP) absorb umiditatea din mediu și acest lucru conduce la scăderea caracteristicilor mecanice și elastice. Din acest motiv se impune testarea acestor materiale atât în stare uscată cât și după absorbția umidității. Determinarea caracteristicilor elastice și mecanice ale MC se face prin teste standardizate. Testarea epruvetelor plate la compresiune este dificilă datorită necesității prevenirii flambajului și a strivirii. Porțiunea neghidată a epruvetelor este mică și din acest motiv instalarea TER este dificilă iar utilizarea DIC nu este posibilă;

Direcții de cercetare în cadrul tezei

Din studierea stadiului actual al cercetărilor în domeniu a rezultat importanța abordărilor în ceea ce privește mecanismele de cedare a palelor de turbină eoliană. Având în vedere și posibilitățile de testare existente, s-au stabilit următoarele direcții de cercetare în cadrul tezei:

1. Testarea complexă a materialelor compozite armate cu fibră de sticlă (GFRP) supuse la solicitări statice și dinamice atât în stare uscată, cât și după absorbția unor cantități de apă;

-
2. Testarea la tracțiune pe diferite direcții a probelor din GFRP, atât în stare uscată cât și după absorbția umidității;
 3. Testarea la compresiune a probelor plate din GFRP și perfecționarea metodelor existente;
 4. Testarea la forfecare a probelor de tip Iosipescu;
 5. Identificarea posibilelor moduri de cedare ale modelului de pală. Formularea de concluzii și recomandări;
 6. Testarea unor probe de tip Compact Tension, decupate pe diferite direcții de armare a fibrelor pentru determinarea unor parametri de mecanica ruperii.
 7. Identificarea, prin microscopie optică și electronică, a mecanismelor de cedare a compozitelor;
 8. Analiza cu elemente finite a unui model de pală supus la încovoiere cu torsiune;
 9. Testarea modelului de pală supus la încovoiere cu torsiune, achiziția și prelucrarea datelor experimentale;
 10. Compararea rezultatelor prezise cu AEF cu cele obținute experimental;

CAPITOLUL 2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA CARACTERISTICILOR DE MATERIAL DIN CARE SUNT FABRICATE PALELE DE TURBINĂ EOLIANĂ

2.1 Scopul cercetărilor experimentale privind materialul GFRP

Compozitul ranforsat cu fibră de sticlă (GFRP) este utilizat ca material predominant în fabricarea palelor de turbină eoliană, așa cum se prezintă și în stadiul actual al tezei. Scopul cercetărilor experimentale este să furnizeze informații privind caracteristicile mecanice și elastice ale materialului utilizat la fabricarea palelor de turbină eoliană. Cunoașterea precisă a proprietăților materialului este foarte importantă, deoarece în timpul funcționării elementul cel mai predispus la deteriorare este pala.

2.2 Elaborarea materialului compozit GFRP

În vederea determinării caracteristicilor de material, s-au fabricat două plăci de compozit armat cu fibră de sticlă RT 500, impregnarea fibrei realizându-se cu matrice de tipul rășină poliestică epoxidică EPIKOTE MGS LR 385 prin metoda lay-up, realizate de SC Compozite S.R.L. Brașov.

Prima placă de compozit este armată cu 10 straturi de țesătură bidirecțională, ca în figura 2.1a, având orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$. După procesul de debitare, eșantioanele au fost finisate și s-au obținut un număr de cincisprezece epruvete prelevate pe trei direcții diferite: 5 transversal (TR) pe direcția bătăturii, 5 longitudinal (LG) pe direcția urzelii și 5 pe diagonală la 45° (45), figura 2.1b.

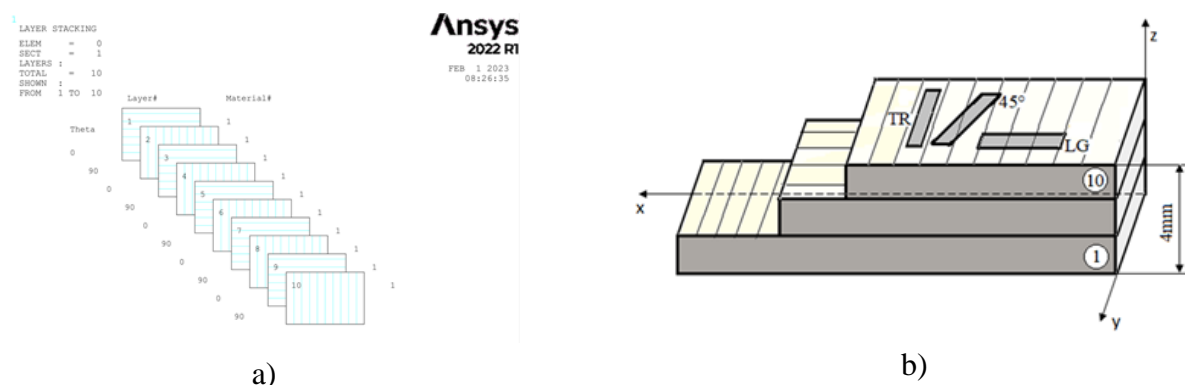
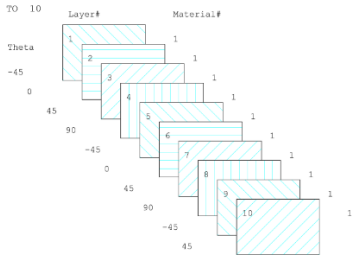


Fig. 2.1 a) Secvența de stocare a straturilor $[0^\circ/90^\circ]$ și direcțiile de prelevare a probelor din placa GFRP b)

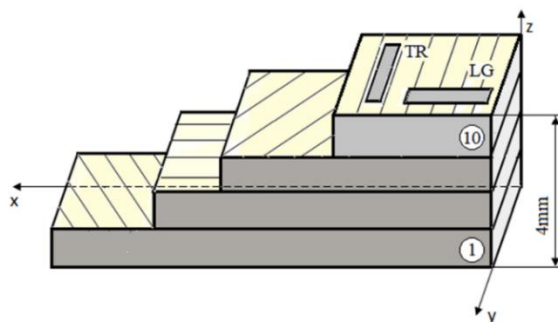
A doua placă are același număr de straturi ca prima, dar orientarea fibrelor este ca în figura 2.2a, la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, din care s-au debitat zece epruvete pe două direcții: 5 transversal (TR) pe direcția bătăturii și 5 longitudinal (LG) pe direcția urzelii, figura 2.2b.

LAYER STACKING
ELEM = 0
SECT = 1
LAYERS = 10
TOTAL
SHOWN :
FROM 1 TO 10



a)

Ansys
2022 R1
FEB 1 2023
08:30:00



b)

Fig. 2.2 a) Secvența de stocare a straturilor $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ și direcțiile de prelevare a probelor din placa GFRP b)

2.3 Încercarea la tracțiune aplicată pe GFRP

Solicitarea la tracțiune a unor epruvete din compozit, care au fost fixate în bacurile mașinii universale de testare (de tipul INSTRON 8801), figura 2.3, în scopul determinării caracteristicilor de material, a fost făcută respectând prevederile standardului ASTM D 3039, figura 2.4.



Fig. 2.3 Încercarea la tracțiune și detalii cu poziționarea extensometrului INSTRON -2670-112

Epruvetele au fost realizare conform prevederilor standardului ASTM D 3039, figura 2.4.

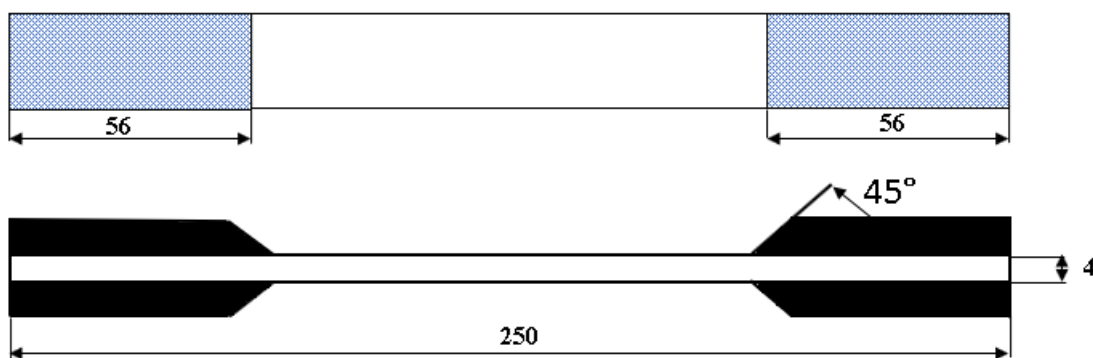


Fig. 2.4 Dimensiunile epruvetei GFRP conform ASTM D3039

Au fost debitate epruvete din placa cu orientarea fibrelor la $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$: câte patru pe direcție longitudinală și transversală. Din placa cu orientarea fibrelor la $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ s-au obținut câte patru epruvete pe direcție longitudinală (LG) pe direcția urzelii, transversală (TR) pe direcția bătăturii și pe diagonală la 45° , figura 2.5.

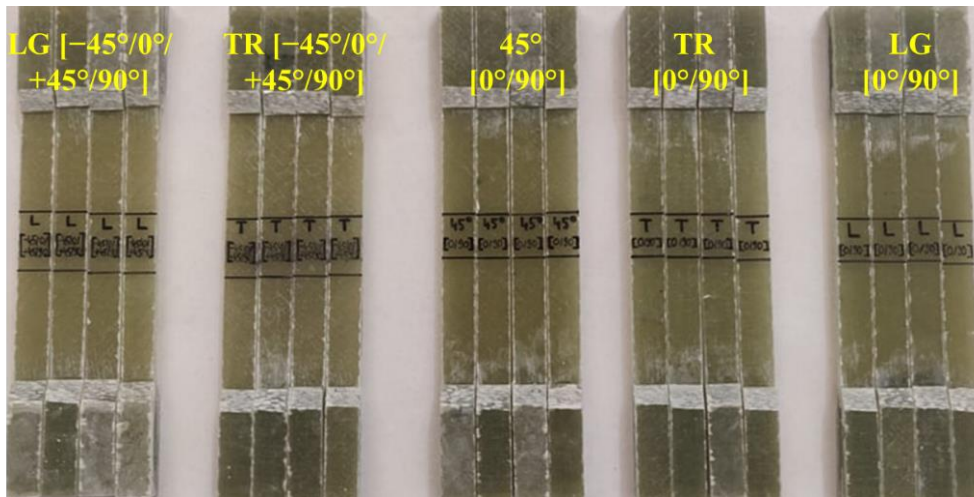


Fig. 2.5 Epruvetele utilizate pentru încercarea la tracțiune

Pe baza rezultatelor obținute după ruperea probelor s-au trasat curbele caracteristice tensiune-deformație specifică, pentru toate eșantioanele prelevate din cele două plăci. Având în vedere numărul mare al rezultatelor obținute s-a efectuat și o analiză statistică a datelor. În plus, pentru fiecare set de eșantioane, s-au urmărit și modurile de rupere, figura 2.6.

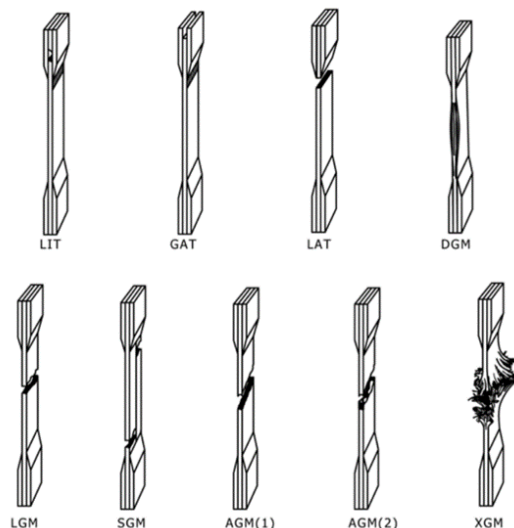


Fig. 2.6 Codurile de rupere ale testului de tracțiune/moduri tipice de rupere, conform ASTM D 3039

În figura 2.7 se observă curbele caracteristice suprapuse pentru cele 4 epruvete debitate longitudinal (pe direcția urzelii) din placa cu orientarea fibrelor la $[0^{\circ}/90^{\circ}]$.

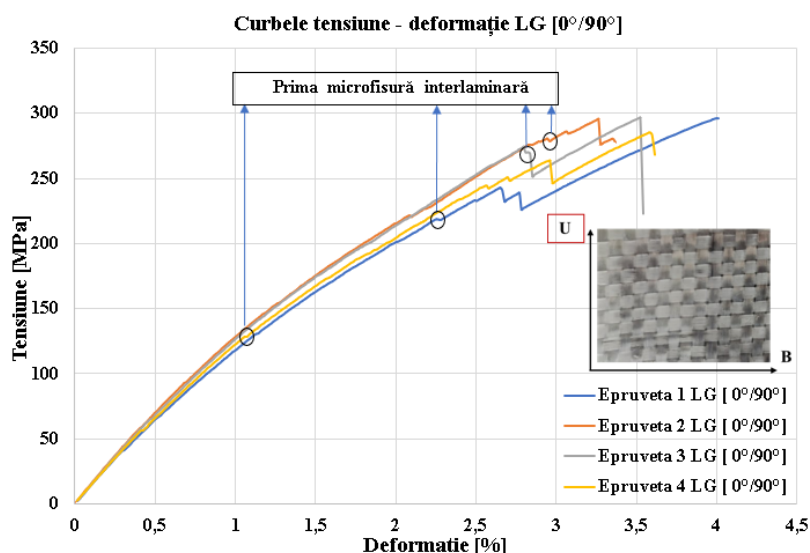


Fig. 2.7 Diagrama tensiune- deformație specifică pentru epruvetele debitate longitudinal [0°/90°]

Comparând cele 4 curbe se observă că tensiunea cea mai mare de rupere apare la epruveta 3, având o valoare maximă de $\sigma_r = 296,37$ MPa. Analizând curbele caracteristice tensiune deformație specifică se remarcă faptul că, între limita elastică și zona de rupere a materialului există o primă porțiune care indică comportamentul interlaminar și răspunsul laminei exterioare în timpul solicitării (cea mai mare parte a efortului la tracțiune este preluată de fibrele în direcția aplicării forței).

În continuare se prezintă abaterea standard pentru cele patru tensiuni de rupere la tracțiune σ_r , (debitate longitudinal din placa cu orientarea fibrelor la [0°/90°], tabelul 2.1.

Tabel 2.1 Abaterea standard pentru tensiunea de rupere la tracțiune σ_r , (debitate longitudinal din placa cu orientarea fibrelor la [0°/90°])

Proba nr.	σ_r [MPa]	Media $\bar{\sigma}_r$ [MPa]	Abaterea de la medie $\sigma_r - \bar{\sigma}_r$ [MPa]	$(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2$ [MPa]	Abaterea standard S [MPa]	Coefficientul de variație CV [%]
1	296,03	293,2	2,83	8,00	5,16	1,75
2	294,93		1,73	2,99		
3	296,37		3,17	10,04		
4	285,52		-7,68	58,98		
$\Sigma=$	1172,8		-	80,01		

Tensiunea medie de rupere la tracțiune pentru cele patru epruvete este

$$\bar{\sigma}_r = \frac{1172,8}{4} = 293,2 \text{ MPa}$$

Abaterea standard a probelor este

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2}{n - 1}}; S = \sqrt{\frac{80,01}{3}} = 5,16 \text{ MPa}$$

Coefficientul de variație CV este definit ca fiind raportul dintre deviația standard S și media

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_r} ; CV = \frac{5,16}{293,2} 100 = 1,75\%$$

Totodată, s-a analizat modul de rupere al epruvetelor, care este prezentat în tabelul 2.2.

Tabel 2.2 Modul de rupere al epruvetelor prelevate pe direcție longitudinală din placa [0°/90°], conform ASTM D3039.

Nr. epruvetă	Modul de rupere conform ASTM D3039	Tipul ruperii	Localizarea zonei de rupere	Localizarea ruperii
1	DGB	Delaminare	În zona calibrată	Partea inferioară
2	DGB	Delaminare	În zona calibrată	Partea inferioară
3	DGM	Delaminare	În zona calibrată	Mijloc
4	DWB	Delaminare	În apropierea talonului (tab-ului)	Partea inferioară

În figura 2.8 s-a evidențiat modul de rupere pentru fiecare epruvetă.



Fig. 2.8 Ruperea epruvetelor prelevate pe direcție longitudinală, cu orientarea fibrelor la [0°/90°]

În figura 2.9 sunt prezentate curbele caracteristice suprapuse. Se observă diferențele de comportament la tracțiune pentru cele patru epruvetele debitate transversal din placa cu orientarea fibrelor la [0°/90°].

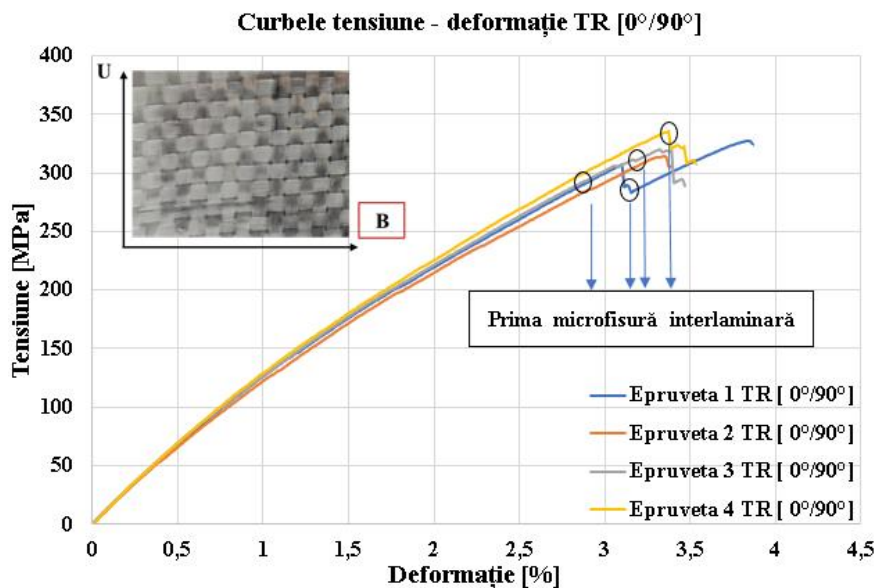


Fig. 2.9 Diagrama tensiune- deformație specifică pentru epruvetele debitate transversal [0°/90°]

În continuare se prezintă abaterea standard pentru cele patru tensiuni de rupere la tracțiune σ_r , pentru epruvetele prelevate pe direcția transversală [0°/90°], tabelul 2.3.

Tabel 2.3 Abaterea standard pentru tensiunea de rupere la tracțiune σ_r , (debitate transversal din placa cu orientarea fibrelor la [0°/90°])

Proba nr.	Media σ_r [MPa]	$\bar{\sigma}_r$ [MPa]	Abaterea de la medie $\sigma_r - \bar{\sigma}_r$	$(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2$	Abaterea standard S [MPa]	Coeficientul de variație CV [%]
1	327,47	324,19	3,28	10,75	8,92	2,75
2	314,27		-9,92	98,04		
3	320,17		-4,02	16,16		
4	334,87		10,68	114,06		
$\Sigma=$	1296,7		-	239,01		

Tensiunea medie de rupere la tracțiune pentru cele patru epruvete este

$$\bar{\sigma}_r = \frac{1296,7}{4} = 324,19 \text{ MPa}$$

Abaterea standard a probelor este

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2}{n-1}}; S = \sqrt{\frac{239,01}{3}} = 8,92 \text{ MPa}$$

Coeficientul de variație CV este definit ca fiind raportul dintre deviația standard S și media

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_r}; CV = \frac{8,92}{324,19} 100 = 2,75\%$$

Totodată, s-a analizat modul de rupere al epruvetelor, care este prezentat în tabelul 2.4.

Tabel 2.4 Modul de rupere al epruvetelor prelevate pe direcția transversală din placa $[0^\circ/90^\circ]$ conform ASTM D3039

Număr epruvetă	Modul de rupere conform ASTM D3039	Primul caracter (tip rupere)	Al doilea caracter (zona de rupere)	Al treilea caracter (zona de rupere)
1	DGM	Delaminare	Zona calibrată	Mijoc
2	DGM	Delaminare	Zona calibrată	Mijoc
3	DGM	Delaminare	Zona calibrată	Mijoc
4	DAT	Delaminare	Aproape de tab	Partea superioară

Figura 2.10 prezintă modul de rupere al fiecărei epruvete.

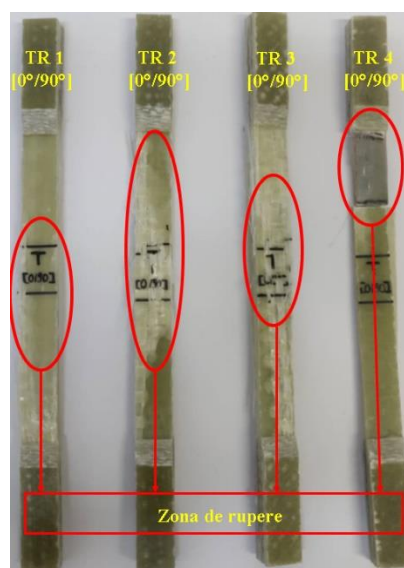


Fig. 2.10 Ruperea epruvetelor transversale cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$

Curbele suprapuse de tensiune – deformație din figura 2.11 prezintă diferențele de comportament ale rezistenței de rupere la tracțiune pentru cele 4 epruvetele debitate la 45° din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$.

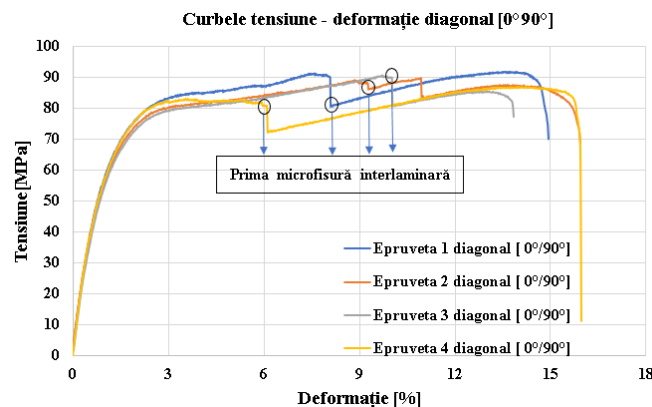


Fig. 2.11 Diagrama tensiune- deformație specifică pentru epruvetele la 45° $[0^\circ/90^\circ]$

În continuare se prezintă abaterea standard, pentru cele patru tensiuni de rupere la tracțiune σ_r , (orientare pe diagonală la 45° [$0^\circ/90^\circ$], tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Abaterea standard pentru tensiunea de rupere la tracțiune σ_r , (orientare pe diagonală la 45° [$0^\circ/90^\circ$])

Probe nr.	Media σ_r [MPa]	$\bar{\sigma}_r$ [MPa]	Abaterea de la medie $\sigma_r - \bar{\sigma}_r$	$(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2$	Abaterea standard S [MPa]	Coefficientul de variație CV [%]
1	91,82	89,70	2,12	4,49	2,1	2,35
2	89,72		0,02	0,004		
3	90,46		0,76	0,57		
4	86,82		-2,88	8,29		
$\Sigma=$	358,82		-	13,35		

Tensiunea medie de rupere la tracțiune pentru cele patru epruvete este

$$\bar{\sigma}_r = \frac{358,82}{4} = 89,70 \text{ MPa}$$

Abaterea standard a probelor este

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2}{n-1}}; S = \sqrt{\frac{13,35}{3}} = 2,1 \text{ MPa}$$

Coefficientul de variație CV este definit ca fiind raportul dintre deviația standard S și media

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_r}; CV = \frac{2,1}{89,07} 100 = 2,35\%$$

Totodată, în urma ruperii celor patru epruvete s-a analizat modul de rupere, care este prezentat în tabelul 2.6.

Tabel 2.6 Modul de rupere al epruvetelor pe direcția la 45° din placa [$0^\circ/90^\circ$] conform ASTM D3039

Număr epruvetă	Modul de rupere conform ASTM D3039	Primul caracter (tip rupere)	Al doilea caracter (zona de rupere)	Al treilea caracter (zona de rupere)
1	DWT	Delaminare	În apropierea talonului (tab-ului)	Partea superioară
2	DGT	Delaminare	Zona calibrată	Partea superioară
3	DGB	Delaminare	Zona calibrată	Partea inferioară
4	DGM	Delaminare	Zona calibrată	Mijloc

În figura 2.12 s-a evidențiat modul de rupere pentru fiecare epruvetă. În toate cele 4 cazuri a avut loc mecanismul degradării sub forma fisurilor de delaminare, în care ruperea s-a produs, în principal, din cauza separării straturilor unul de celălalt.

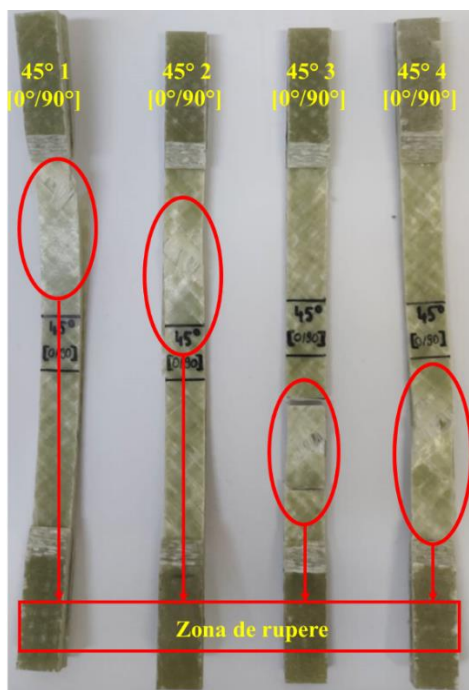


Fig. 2.12 Ruperea epruvetelor la 45° cu orientarea fibrelor la [0°/90°]

În figura 2.13 s-au figurat curbele suprapuse de tensiune – deformație specifică și diferențele de comportament ale rezistenței de rupere la tracțiune pentru cele 4 epruvetele debitate longitudinal din placa cu orientarea fibrelor la [-45°/0°/+45°/90°].

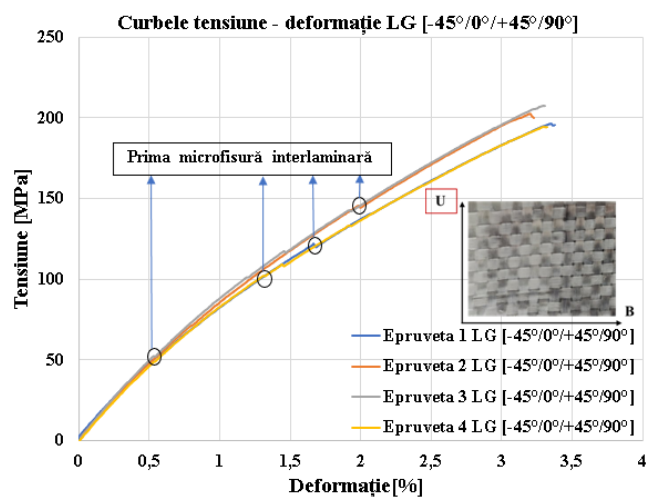


Fig. 2.13 Diagrama tensiune- deformație specifică pentru epruvetele debitate longitudinal [-45°/0°/+45°/90°]

Comparând cele 4 curbe se observă că tensiunea cea mai mare de rupere apare la epruveta 3 având o valoare maximă de $\sigma_r = 207,28$ MPa.

În continuare se prezintă abaterea standard, pentru cele patru tensiuni de rupere la tracțiune σ_r , (orientare longitudinală [-45°/0°/+45°/90°]), tabelul 2.7.

Tabel 2.7 Abaterea standard pentru tensiunea de rupere la tracțiune σ_r , (orientare pe longitudinală la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$)

Probe nr.	Media σ_r [MPa]	$\bar{\sigma}_r$ [MPa]	Abaterea de la medie $\sigma_r - \bar{\sigma}_r$	$(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2$	Abaterea standard S [MPa]	Coefficientul de variație CV [%]
1	196,17	200,1	-3,93	15,44	5,95	2,97
2	202,62		2,52	6,35		
3	207,28		7,18	51,55		
4	194,35		-5,75	33,06		
$\Sigma=$	800,42		-	106,4		

Tensiunea medie de rupere la tracțiune pentru cele patru epruvete este

$$\bar{\sigma}_r = \frac{800,42}{4} = 200,1 \text{ MPa}$$

Abaterea standard a probelor este

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2}{n-1}}; S = \sqrt{\frac{106,4}{3}} = 5,95 \text{ MPa}$$

Coefficientul de variație CV este definit ca fiind raportul dintre deviația standard S și media

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_r}; CV = \frac{5,95}{200,1} 100 = 2,97\%$$

Totodată în urma ruperii celor patru epruvete s-a analizat și modul de rupere, care este prezentat în tabelul 2.8.

Tabel 2.8 Modul de rupere al epruvetelor debitate pe direcția longitudinală din placa $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ conform ASTM D3039

Numar epruvetă	Modul de rupere conform ASTM D3039	Primul caracter (tip rupere)	Al doilea caracter (zona de rupere)	Al treilea caracter (zona de rupere)
1	DGB	Delaminare	Zona calibrată	Partea inferioară
2	DWB	Delaminare	În apropierea talonului (tab-ului)	Partea inferioară
3	DGT	Delaminare	Zona calibrată	Partea superioară
4	DWB	Delaminare	În apropierea talonului (tab-ului)	Partea inferioară

Figura 2.14 prezintă modurile de rupere pentru fiecare probă.

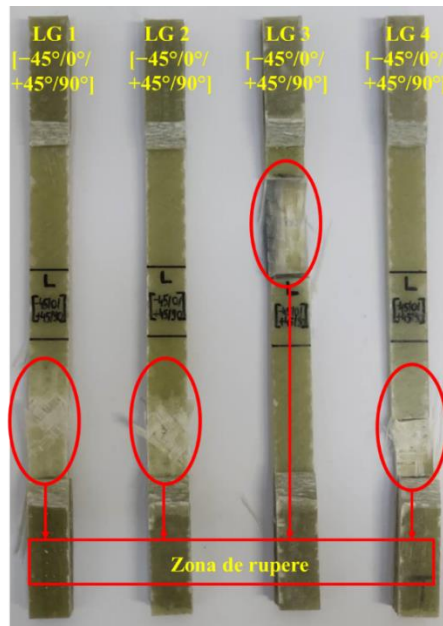


Fig. 2.14 Ruperea epruvetelor longitudinale cu orientarea fibrelor la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

În figura 2.15 se prezintă curbele suprapuse de tensiune - deformație specifică și diferențele în comportament ale rezistenței de rupere la tracțiune pentru cele 4 epruvetele debitate transversal din placa cu orientarea fibrelor la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$.

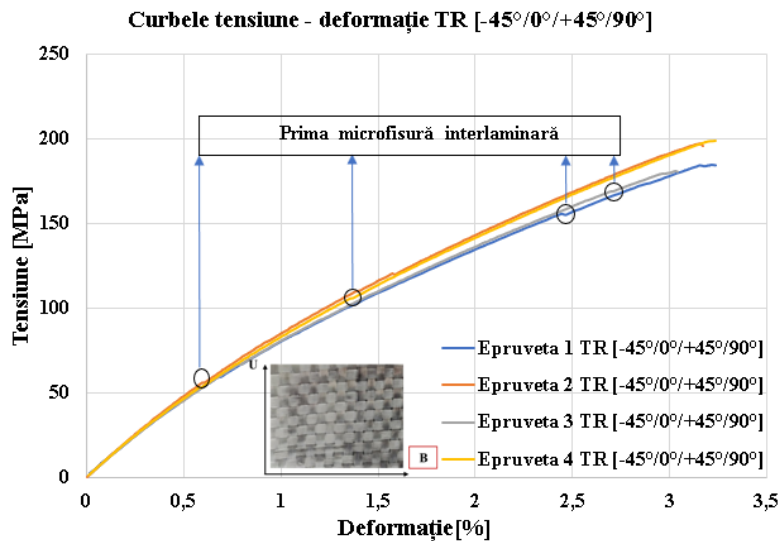


Fig. 2.15 Diagrama tensiune- deformație pentru epruvetele transversale $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

Comparând cele 4 curbe, se observă că tensiunea cea mai mare de rupere apare la epruveta 4 având o valoare maximă de $\sigma_r = 198,28$ MPa. În continuare se prezintă abaterea standard, pentru cele patru tensiuni de rupere la tracțiune σ_r , (orientare transversală $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, tabel 2.9.

Tabel 2.9 Abaterea standard pentru tensiunea de rupere la tracțiune σ_r , (orientare pe transversală la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$)

Probe nr.	Media σ_r [MPa]	$\bar{\sigma}_r$ [MPa]	Abaterea de la medie $\sigma_r - \bar{\sigma}_r$	$(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2$	Abaterea standard S [MPa]	Coefficientul de variație CV [%]
1	185	185	0	0	0	0
2	185	185	0	0	0	0
3	185	185	0	0	0	0
4	198,28	185	13,28	176,38	13,28	7,18

1	184,17	188,44	-4,27	18,23	9,12	4,83
2	196,87		8,43	71,06		
3	180,45		-7,99	63,84		
4	198,28		9,84	96,82		
$\Sigma=$	753,77		-	249,95		

Tensiunea medie de rupere la tracțiune pentru cele patru epruvete este

$$\bar{\sigma}_r = \frac{753,77}{4} = 188,44 \text{ MPa}$$

Abaterea standard a probelor este

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2}{n - 1}}; S = \sqrt{\frac{249,95}{3}} = 9,12 \text{ MPa}$$

Coefficientul de variație CV este definit ca fiind raportul dintre deviația standard S și media

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_r}; CV = \frac{9,12}{188,44} 100 = 4,83\%$$

Totodată în urma ruperii celor patru epruvete s-a analizat și modul de rupere, care este prezentat în tabelul 2.10.

Tabel 2.10 Modul de rupere al epruvetelor pe direcția transversală din placa [-45°/0°/+45°/90°] conform ASTM D3039

Număr epruvetă	Modul de rupere conform ASTM D3039	Primul caracter (tip rupere)	Al doilea caracter (zona de rupere)	Al treilea caracter (zona de rupere)
1	DGB	Delaminare	Zona calibrată	Partea inferioară
2	DAB	Delaminare	Aproape de tab	Partea inferioară
3	DAB	Delaminare	Aproape de tab	Partea inferioară
4	DWB	Delaminare	În apropierea talonului (tab-ului)	Partea inferioară

În figura 2.16 s-a evidențiat modul de rupere pentru fiecare epruvetă.

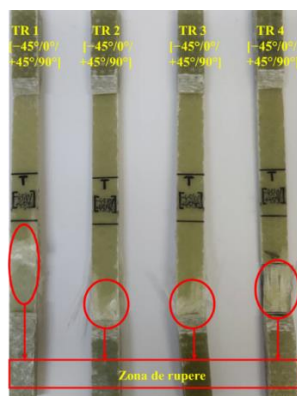


Fig. 2.16 Ruperea epruvetelor transversale cu orientarea fibrelor la [-45°/0°/+45°/90°]

2.4 Determinarea caracteristicilor elastice ale materialului compozit GFRP

Materialurile compozite armate unidirectional fac parte din categoria materialelor ortotrope, care au în componența lor trei plane de simetrie (Hadăr, A, 1997), (Alămoreanu, E., ș.a., 1993). O structură realizată din MC stratificate și armate cu fibre continue, necesită studierea caracteristicilor elastice ale unei lamine:

- E_{11} - modul de elasticitate longitudinal (Young);
- E_{12} - modul de elasticitate transversal;
- G_{12} - modul de elasticitate la forfecare (Coulomb);
- ν_{12} - coeficientul lui Poisson;

Caracteristicile elastice și mecanice ale materialului au fost determinate prin metoda tensometriei electrice rezistive (Bârsănescu P.D. ș.a., 2004). În figura 2.17 se prezintă epruvetele debitate din cele două plăci și modul de amplasare a traductoarelor.

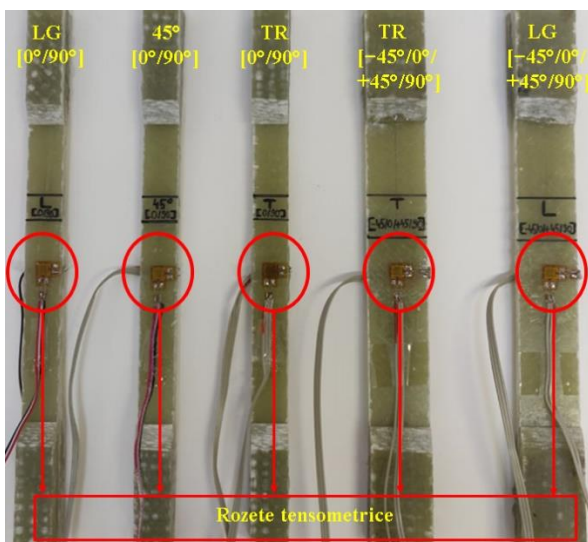


Fig. 2.17 Amplasarea rozetelor tensometrice de tip T

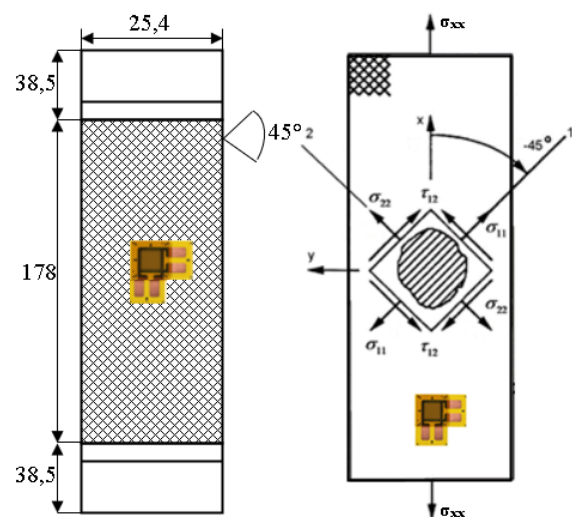


Fig. 2.18 Amplasarea rozetelor tensometrice de tip T

În cazul epruvetelor prelevate din placa de $[0^\circ/90^\circ]$, s-au debitat trei epruvete pe cele trei direcții cunoscute, respectându-se standardul ASTM D3039, prezentat, în subcapitolul 2.2. Pentru epruvetele cu orientarea fibrei la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ s-a respectat standardul ASTM D3518, figura 2.18, din care s-au debitat două epruvete: direcție longitudinală și transversală.

Pentru obținerea caracteristicilor elastice și mecanice, pe câte o epruvetă s-a lipit o rozetă tensometrică de tipul T (cu două grile la 90°) de tipul CEA-06-125WT-120, fabricate de Micro-Measurements.

În aceste condiții, marca de pe direcția longitudinală va măsura deformația specifică longitudinală, ϵ_L , iar marca tensometrică de pe direcția transversală va măsura ϵ_T . În figura 2.19 și

2.20 se prezintă variația tensiunii cu deformația longitudinală – panta de aproximare pentru modulul de elasticitate longitudinal pentru placa cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$ și $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

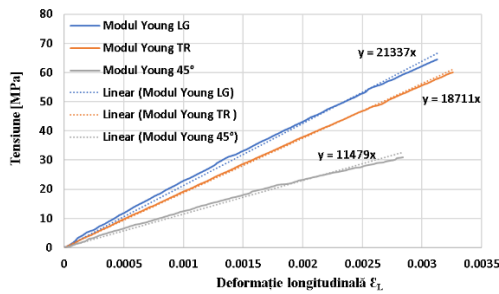


Fig. 2.19 Variația tensiunii cu deformația longitudinală – panta de aproximare pentru modulul de elasticitate longitudinal - placa cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$

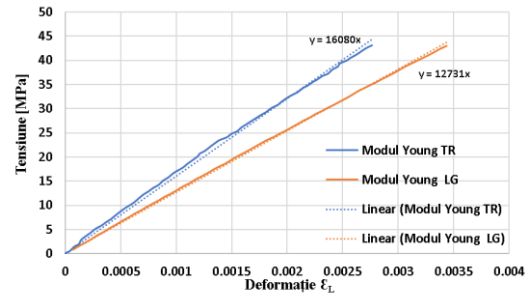


Fig. 2.20 Variația tensiunii cu deformația longitudinală – panta de aproximare pentru modulul de elasticitate longitudinal - placa cu orientarea la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

În figurile 2.21 și 2.22 sunt prezentate graficele în coordonate deformație specifică transversală (ϵ_T) / deformație specifică longitudinală (ϵ_L) pentru determinarea coeficientului lui Poisson ν , asupra epruvetelor din placa cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$ și $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$. Panta dreptei de aproximare reprezintă coeficientul contracției transversale Poisson.

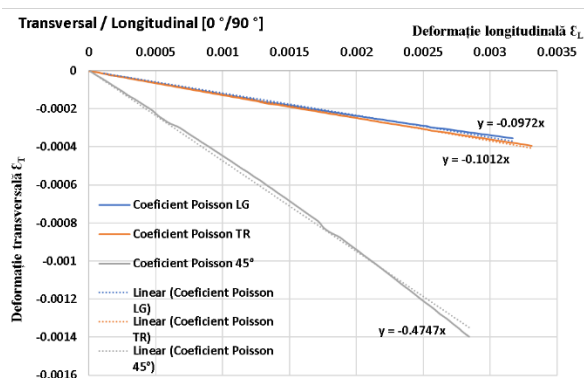


Fig. 2. 21 Caracteristica contracției transversale pentru placa cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$

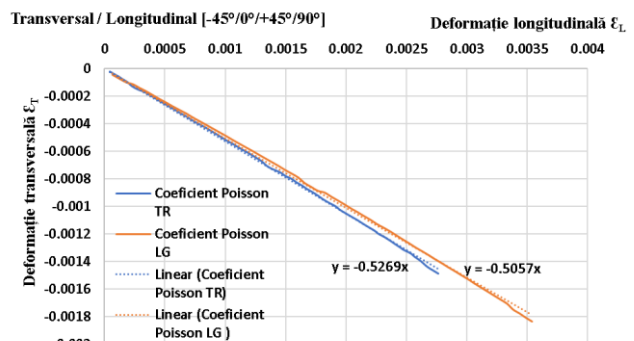


Fig. 2.22 Caracteristica contracției transversale pentru placa cu orientarea la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

2.5 Încercarea la forfecare pură

S-au efectuat încercări la forfecare pe epruvete armate cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$ și la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, conform standardului ASTM D5379/D5379M. În vederea stabilirii caracteristicilor elastice s-au montat rozete de tipul C032A, figura 2.23, fabricate de Micro-Measurements.

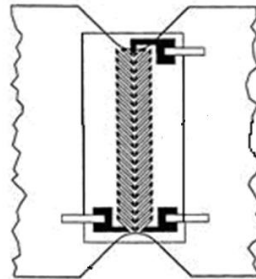


Fig. 2.23 Rozeta Micro-Measurements tip C032

Încercările s-au făcut pe un dispozitiv de forfecare conceput la UTIași, inspirat de dispozitivul creat la Universitatea Idaho (Conant, R.R., 1995). În urma încercărilor s-au determinat rezistențele de rupere la forfecare pură $\tau_{rf,90}$, $\tau_{rf,45}$ și modulul de elasticitate transversală G_{90} , G_{45} , (Morăraș C., ș.a., 2020) În figurile 2.24 și 2.25 se prezintă dispozitivul de forfecare, instalat pe mașina de încercări mecanice INSTRON 8801, cu cele două tipuri de epruvete.



Fig. 2.24 Epruvetă cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$

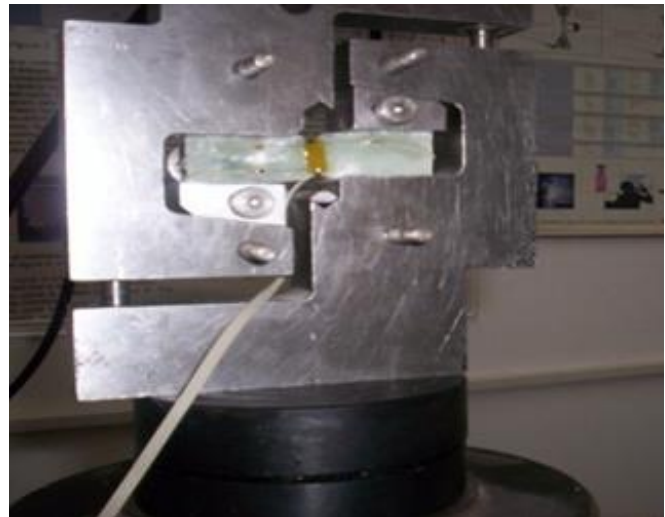


Fig. 2.25 Epruvetă cu orientarea la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

În urma încercării la forfecare pe epruveta cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$ s-a determinat o tensiune tangențială la rupere de $\tau_{rf,90} = 54 \text{ MPa}$ și un modul de elasticitate transversal de $G_{90} = 7824,6 \text{ MPa}$. În figura 2.26 se prezintă curba caracteristică la forfecare pură pentru epruveta la $[0^\circ/90^\circ]$ cu corecția alunecării specifice la sensibilitatea transversală. În figura 2.27 se prezintă graficul de aproximare a curbei $\tau-\gamma$ în domeniul elastic, prin intermediul unei drepte a cărei ecuație este $y=7824,6x-1,1847$.

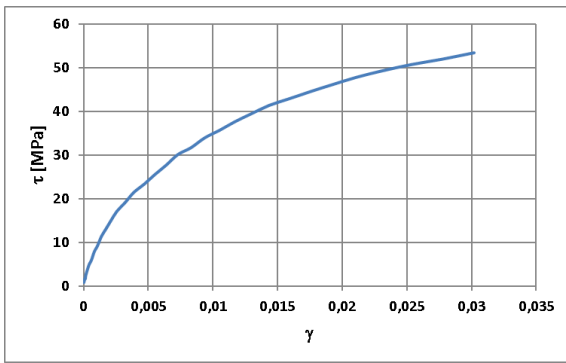


Fig. 2.26 Curba caracteristică la forfecare pură pentru epruveta cu orientarea fibrelor la $[0^{\circ}/90^{\circ}]$

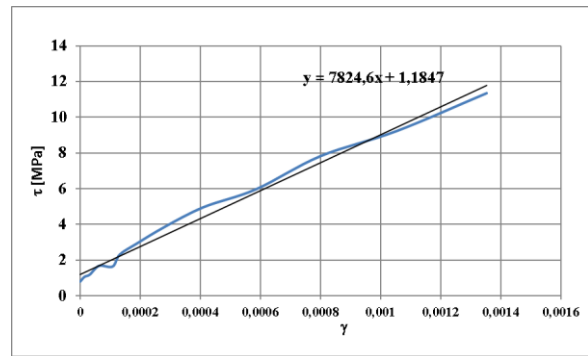


Fig. 2.27 Modulul de elasticitate transversala G_{90}

În urma încercării la forfecare pe epruveta cu orientarea la $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ s-a determinat o tensiune tangențială la rupere de $\tau_{rf,45} = 88.5\text{MPa}$ și un modul de elasticitate transversal $G_{45}=8590\text{MPa}$. În figura 2.28 se prezintă curba caracteristică la forfecare pură pentru epruveta la $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ - cu corecția lunecării specifice la sensibilitatea transversală. În figura 2.29 se prezintă graficul de aproximare a curbei τ - γ cu dreapta de ecuație: $y=8590x-5,466$.

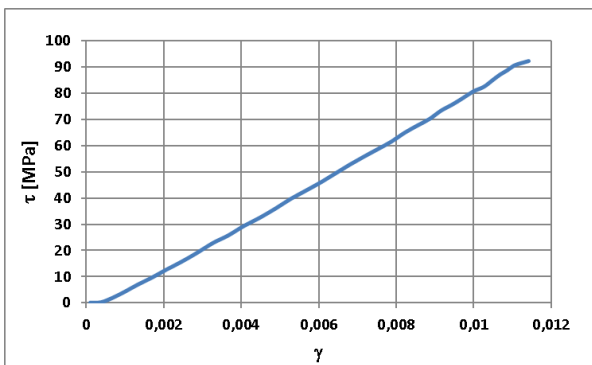


Fig. 2.28 Curba caracteristică la forfecare pură pentru epruveta cu orientarea la $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$

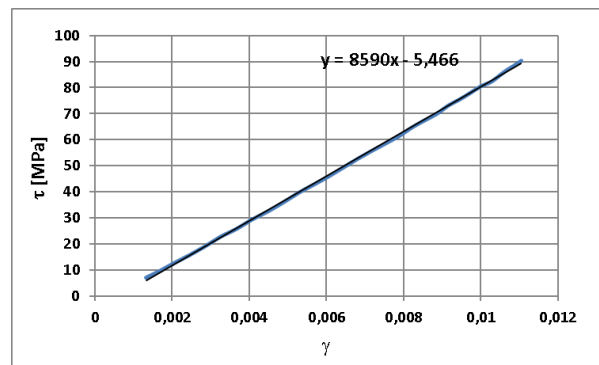


Fig. 2.29 Modulul de elasticitate transversal G_{45}

2.6 Încercarea la compresiune

S-au efectuat încercări la compresiune pe același material GFRP, din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$, prezentat în subcapitolul 2.2. Patru epruvete, debitate transversal au fost utilizate la testul de compresiune, care a respectat standardul ASTM 695 modificat (metoda Boeing), figura 2.30. În figura 2.30 s-a notat cu 1- epruvetă; 2- tab-uri; 3 și 4 mărci tensometrice unidirecționale, lipite pe ambele fețe în zona de calibrare.

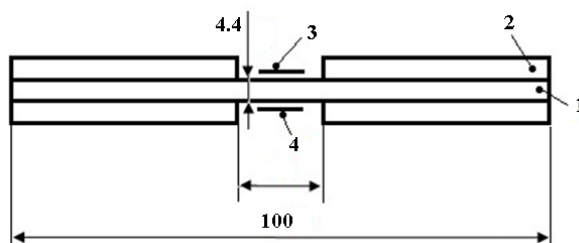


Fig. 2.30 Dimensiunile epruvetei GFRP, conform ASTM 695

Testele la compresiune au fost realizate pe mașina universală de testare INSTRON 8801, figura 2.31a, la temperatura ambiantă și o viteză de încărcare de 0,5mm/min. Figura 2.31b prezintă dispozitivul realizat și setul de epruvete pentru prima metodă de testare la compresiune.



Fig. 2.31 a Dispozitivul de testare montat pe mașina de încercat INSTRON 8801

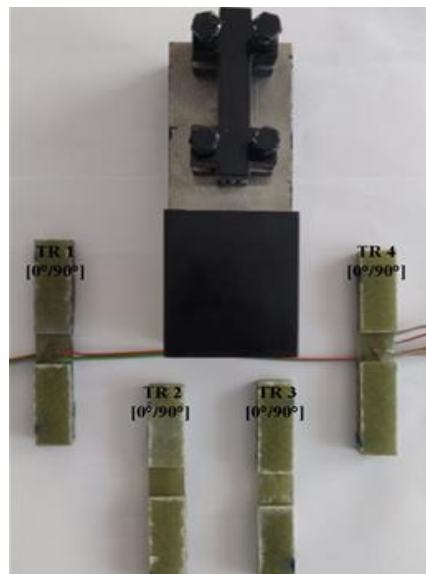


Fig. 2.31b Dispozitivul de testare și setul de epruvete la compresiune

În figura 2.32 se observă curbele caracteristice suprapuse pentru cele 3 epruvetele debitate transversal (pe direcția bătăturii) din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$.

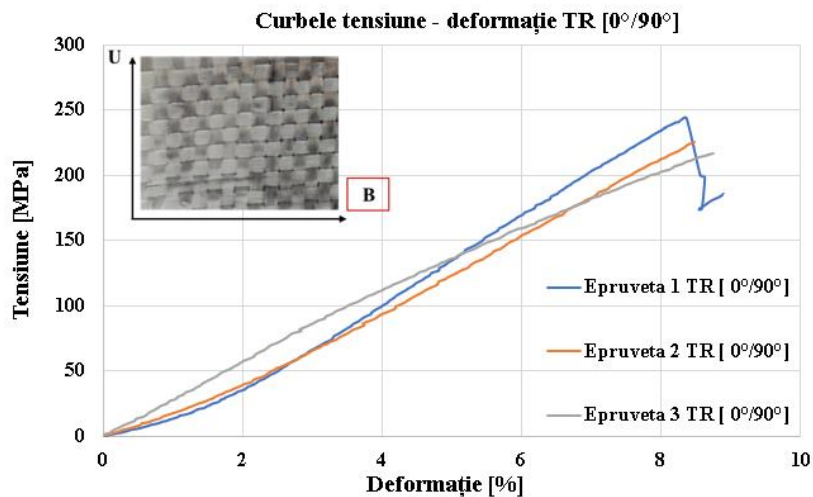


Fig. 2. 32 Diagrama caracteristică tensiune-deformație specifică pentru epruvetele transversale [0°/90°]

În cazul celor 3 curbe se observă ca tensiunea cea mai mare apare la epruveta 1, având valoarea maximă $\sigma_r = 243,23$ MPa. Analizând aspectul celor 3 diagrame se poate observa că la epruveta 1 apare o scădere bruscă la tensiunea de aproximativ 240 MPa, ceea ce arată o rupere bruscă a unui număr mai mare de fibre.

În continuare se prezintă abaterea standard pentru cele trei tensiuni de rupere la compresiune σ_r , (debitate transversal din placa cu orientarea fibrelor la [0°/90°]), tabelul 2.11.

Tabel 2.11 Abaterea standard pentru tensiunea de rupere la compresiune σ_r , (epruvete orientate transversal, prelevate din placa cu orientarea fibrelor la [0°/90°])

Proba nr.	σ_r [MPa]	$\bar{\sigma}_r$ [MPa]	Abaterea de la medie $\sigma_r - \bar{\sigma}_r$ [MPa]	$(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2$ [MPa]	Abaterea standard S [MPa]	Coefficientul de variație CV [%]
1	243,23	228,62	14,61	213,45	13,30	5,81
2	225,49		-3,13	8,94		
3	217,15		-11,47	131,56		
$\Sigma =$	685,67			353,95		

Tensiunea medie de rupere la compresiune pentru cele trei puncte este

$$\bar{\sigma}_r = \frac{685,67}{3} = 228,62 \text{ MPa}$$

Abaterea standard a probelor este

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_r - \bar{\sigma}_r)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{353,95}{2}} = 13,30 \text{ MPa}$$

Coefficientul de variație CV este definit ca fiind raportul dintre deviația standard S și valoarea medie

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_r} \cdot 100 = \frac{13,30}{228,62} \cdot 100 = 5,81\%$$

Totodată, s-a analizat modul de rupere al epruvetelor, care este prezentat în tabelul 2.12.

Tabel 2.12 Modul de rupere al epruvetelor prelevate pe direcție transversală din placa [0°/90°], conform ASTM D 3410/D 3410M – 03

Număr epruvetă	Modul de rupere conform ASTM D3410/D 3410M-03	Tipul ruperii	Localizarea zonei de rupere	Localizarea ruperii
1	BGM	Delaminare (tip "mătură")	În zona calibrată	Mijloc
2	HAT	Pe toată grosimea	Aproape de tab	Partea superioara
3	BGM	Delaminare (tip "mătură")	În zona calibrată	Mijloc

În figura 2.33 s-a evidențiat modul de rupere pentru fiecare epruvetă, cu ajutorul unui stereomicroscop. În toate cele trei cazuri mecanismul degradării este unul acceptabil, conform standardului. Aria de rupere prin delaminare (tip "mătură"), pentru epruvetele 1 și 3 au avut loc în zona calibrată, iar pentru epruveta 2 în apropierea tab-ului superior. Locația de rupere pentru epruvetele 1 și 3 a avut loc în partea din mijloc, iar pentru epruveta 2 în partea superioară.

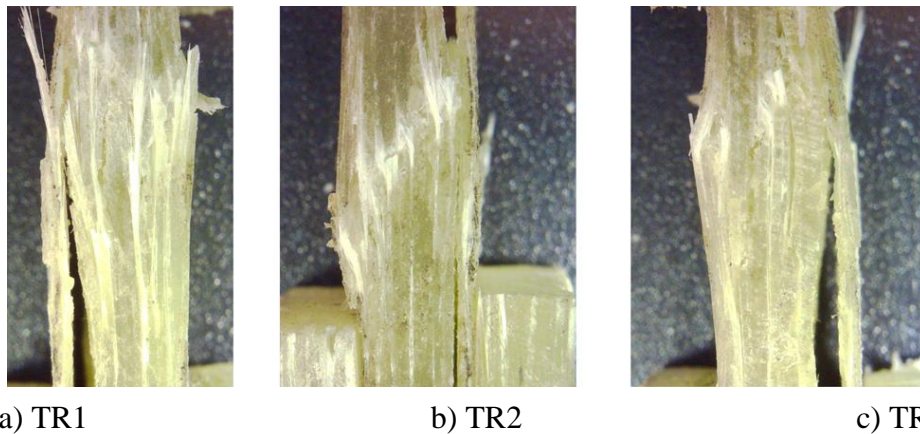


Fig. 2.33 Modul de rupere a epruvetelor prelevate pe direcție transversală, cu orientarea fibrelor la [0°/90°]

Pentru epruveta TR4, pe care s-au amplasat 2 mărci tensometrice unidirecționale pe direcție longitudinală, s-a determinat modulul lui Young, figura 2.34.

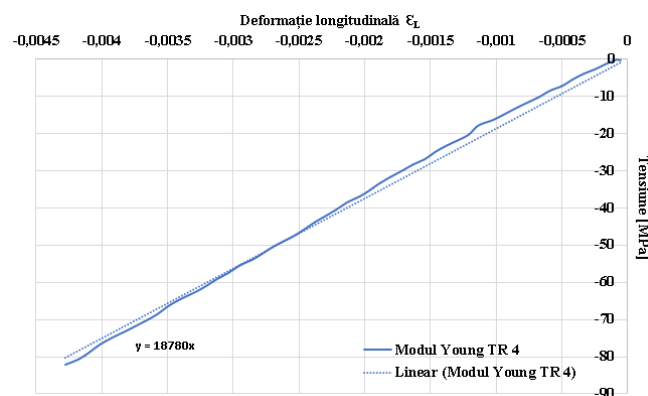


Fig. 2.34 Variația tensiunii cu deformația longitudinală – panta de aproximare pentru modulul de elasticitate longitudinal la compresiune, pentru placa cu orientarea la [0°/90°]

Pentru determinarea coeficientului Poisson al GFRP studiat, s-a efectuat un alt test la compresiune. S-au utilizat rozete tensometrice de tip T. Aceste rozete au o suprafață mai mare decât mărcile tensometrice uzuale (unidirecționale) și necesită un spațiu de montaj mai mare în zona centrală a epruvetei. Pentru a răspunde acestor cerințe, dar având în vedere și necesitatea evitării flambajului, s-a creat un dispozitiv special în care sunt încercate, în același timp, patru epruvete de aceeași formă și aceleași dimensiuni.

Dispozitivul grupează patru eșantioane cu $L \times l = 130 \times 25 \text{ mm}$, decupate din placa de GFRP de 4,4 mm grosime, așezate după laturile unui pătrat, având la fiecare capăt câte un capac din aliaj de aluminiu și opt distanțiere din tablă de aluminiu de 0,5 mm grosime, figura 2.35, în care 1-eșantionul frontal; 2-eșantionul din stânga; 3-eșantionul din dreapta; 4-capac din aliaj de Al; 5-distanțier din tablă de Al; 6-rozeta tip T. Desenul unui distanțier este prezentat în figura 2.36.

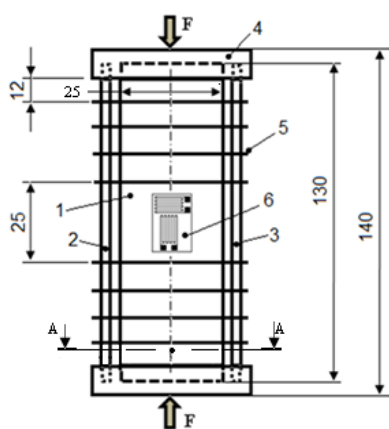


Fig. 2.35 Epruveta/dispozitiv pentru determinarea coeficientului Poisson (eșantionul de GFRP din spate nu se vede)

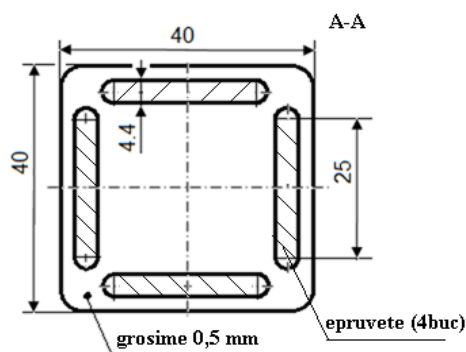


Fig. 2.36 Distanțier

Capacele din aliaj de aluminiu au grosimea de 10 mm. În capace s-au executat canale cu adâncimea de 4,5 mm, dispuse la fel ca cele din distanțierul prezentat în figura 2.36. În aceste canale s-au introdus capetele celor patru eșantioane. Eșantioanele au fost fixate de capace și distanțiere cu ajutorul unui adeziv. Astfel, prin dispunerea celor patru eșantioane după laturile unui pătrat s-a mărit momentul de inerție al secțiunii transversale a epruvetei, iar cu ajutorul distanțierelor s-a micșorat lungimea de flambaj (aceasta rămâne mai mare doar în partea centrală a eșantioanelor, acolo unde se montează rozeta tensometrică). Pe ambele fețe ale eșantionului frontal s-au lipit două rozete tensometrice tip CEA-06-125WT-120, fabricate de Micro-Measurements, având rezistența $R=120\Omega \pm 0.35\%$ și factorul mărcii $k_G=2.025 \pm 0,5\%$.

Încărcarea epruvetei s-a făcut în domeniul elastic, cu o viteză de 0.3 mm/min, până la o forță de 82 MPa pentru un singur eșantion. Pe durata încercării s-au înregistrat diagramele forță-deplasare a traversei mașinii, precum și semnalele de ieșire provenite de la cele patru grile ale rozetelor tensometrice.

Epruveta prezentată în figura 2.37 permite, de asemenea, utilizarea unor metode optice performante pentru monitorizarea deformațiilor și a stării de tensiuni din eșantioanele de GFRP, cum

ar fi Digital Image Correlation (DIC). Celelalte metode standardizate pentru încercarea la compresiune (ASTM D695-15, D 3410/3410M-03, D6641/6641M-09) nu permit utilizarea DIC, din motive constructive.



Fig. 2.37 Dispozitivul de testare și modul de așezare între platane pe mașina de încercat Instron 8801

În figura 2.38 se prezintă curba tensiune-deformație pentru un eșantion supus la compresiune. Solicitarea a avut loc în domeniul elastic, aspectul curbei fiind unul liniar.

În figura 2.39 se prezintă semnalele de ieșire provenite de la cele două grile ale rozetei lipite pe suprafața frontală a eșantionului, înregistrate de durata testului.

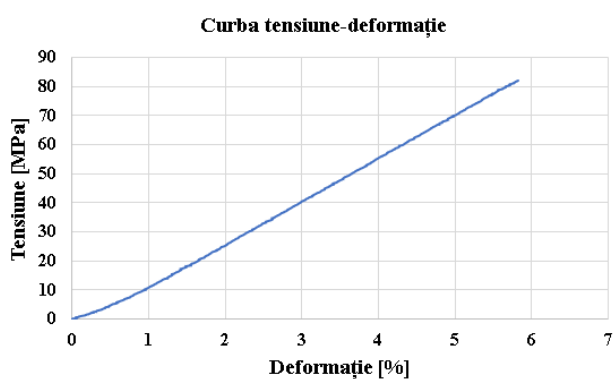


Fig. 2.38 Curba tensiune – deformație specifică la compresiune

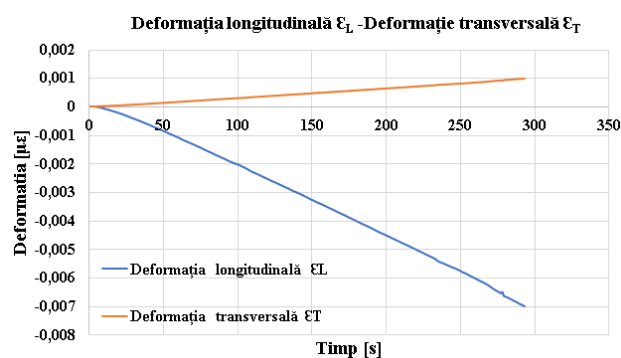


Fig. 2.39 Semnalele de ieșire de la cele două grile ale rozetei lipite pe suprafața frontală a eșantionului

În figura 2.40 se prezintă semnalul de ieșire al grilei transversale în funcție de semnalul de ieșire al grilei longitudinale. Panta acestei drepte, luată în valoare absolută, reprezintă coeficientul Poisson. Pentru GFRP studiat s-a obținut la compresiune coeficientul Poisson $\nu=0.1427$. Pentru încercarea la tracțiune a unor epruvete debitate transversal (direcția bătăturii) din aceeași placă de GFRP s-a obținut $\nu=0.1$, (Morăraș C., ș. a, 2023).

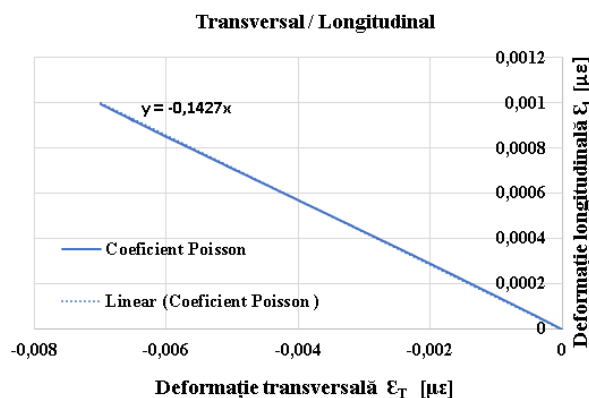


Fig. 2.40 Semnalul de ieșire al grilei transversale funcție de semnalul de ieșire al grilei longitudinale

2.7 Influența umidității asupra caracteristicilor de tracțiune ale materialului GFRP

S-au realizat încercări la tracțiune asupra unor epruvete din același material GFRP, din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$, prezentată în subcapitolul 2.2. Probele au fost imersate în apă preluată din rețeaua de distribuție și în apă de mare. Imersia s-a realizat pentru un anumit număr de zile, respectiv: 7, 14, 21, și 31 de zile. În plus, s-a realizat și o imersie în azot lichid, timp de 4 zile la temperatura inițială de -70°C . Imersarea în azot lichid s-a realizat în vederea posibilei instalări ale turbinelor eoliene la altitudini mari sau în zonele arctice. Forma și dimensiunile epruvetelor respectă standardul ASTM D3039. În figura 2.41 sunt prezentate curbele caracteristice tensiune-deformație specifică pentru toate cazurile de imersie, inclusiv pentru proba imersată în azot. Din analiza acestor curbe se constată următoarele:

- În raport cu proba uscată, toate celelalte probe au rezistența la tracțiune mai mică;
- În raport cu proba uscată, deformațiile celorlalte probe sunt mai mari;
- În aceste condiții se poate afirma că, odată cu imersia în apă normală, în apă sărată sau în azot lichid, sunt schimbări semnificative ale caracteristicilor la tracțiune: rezistența la tracțiune și chiar modulele lui Young.

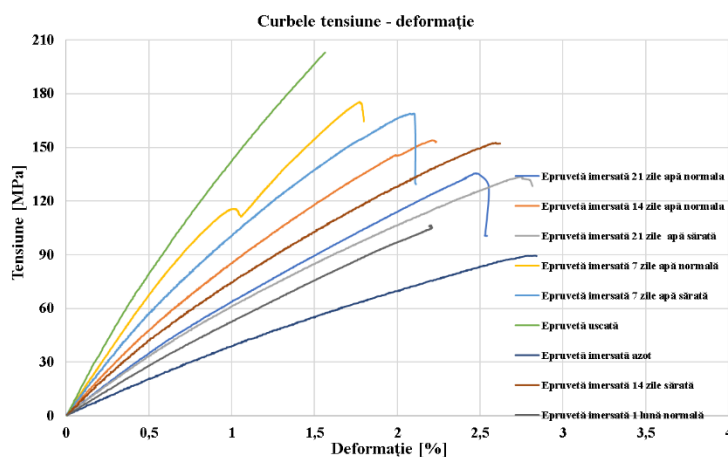


Fig. 2.41 Curbele tensiune-deformație specifică pentru epruveta uscată și cele imersate

În figura 2.42 se prezintă variația rezistențelor la tracțiune pentru fiecare probă imersată, și se constată următoarele:

- Cea mai mare rezistență la tracțiune este pentru proba uscată, neimersată;
- Pe măsură ce probele au fost imersate mai mult timp, rezistența la tracțiune scade;

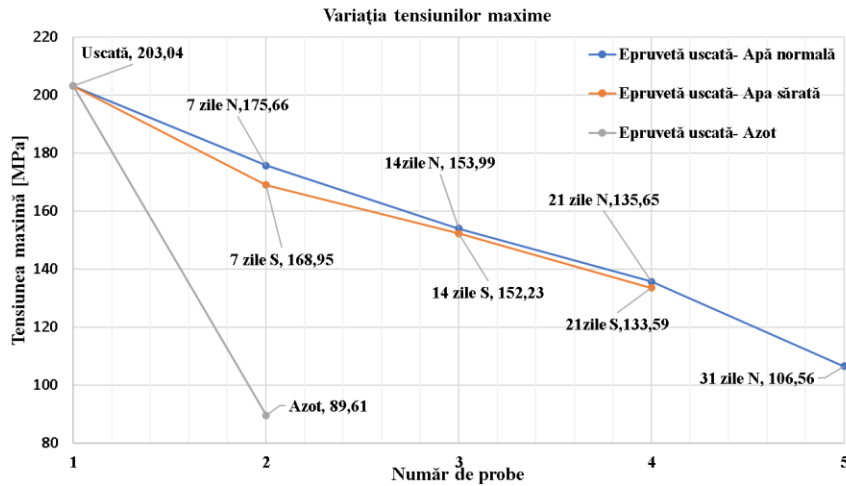


Fig. 2.42 Variația rezistențelor la tracțiune pentru fiecare probă imersată

Pe baza înregistrărilor variație forței de solicitare F [N] în raport cu alungirea Δl [m] a probei, se calculează aria de sub curbele aferente. Având în vedere forma curbelor, se poate spune că aria determinată de variația F - Δl reprezintă energia de deformare, în cea mai mare parte, elastică. Energia de deformare elastică reprezintă un indicator în ceea ce privește capacitatea palelor de turbină eoliană de a absorbi, prin deformare elastică, energia vântului. Observând figura 2.43, se pot trage următoarele concluzii:

- Proba uscată acumulează energia cea mai mare;
- Cu cât numărul de zile de imersare este mai mare energia scade;
- Scăderi semnificative ale energiei le regăsim la proba imersată 31 de zile și azot lichid;
- Variația energiei pentru 7, 14 și 21 zile în cazul celor două tipuri de imersări nu este foarte accentuată;

În figurile 2.44 s-a luat ca referință epruveta uscată și s-au făcut comparații în funcție de soluția de imersare și numărul de zile:

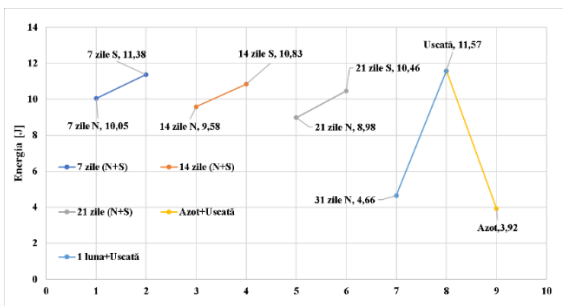


Fig. 2.43 Variația energiei în funcție de numărul de zile

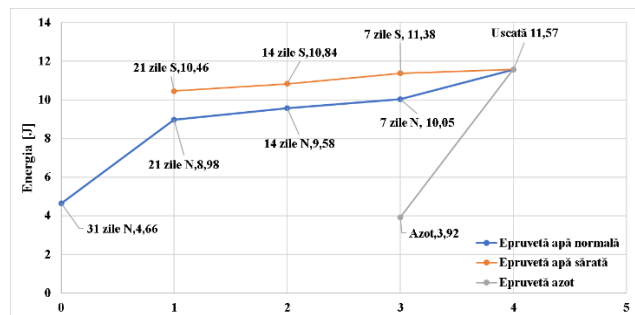


Fig. 2.44 Variația energiei în funcție de numărul de zile

2.8 Analiza structurală a materialului compozit GFRP

2.8.1 SEM pe materialul GFRP cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ - probe supuse la tracțiune

Analizele de microscopie electronică realizate cu ajutorul microscopului electronic SEM Quanta 2003D, au fost efectuate pe probele cu cele mai mari rezistențe obținute în urma încercării la tracțiune. Pentru îmbunătățirea conductivității electrice, a fost utilizat un SEM COATER Luxor Au - CT-2201-0144 care a realizat un strat de aur de 7 nm pe suprafață și în secțiune Scopul a fost acela de a evidenția aspectele clare de rupere a fibrelor și zonele caracteristice. În figura 2.46 se prezintă imaginile secțiunilor transversale ale epruvetelor pe cele trei direcții (LG, TR și 45°).

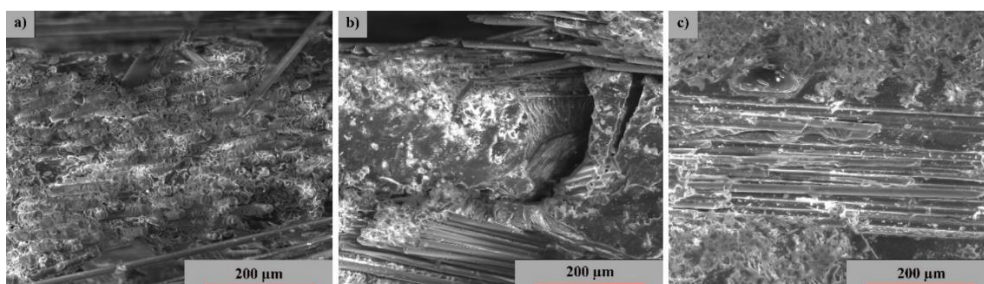


Fig. 2.46 Imagine SEM pe secțiunea transversala pe cele trei direcții (a) transversal, (b) diagonal la 45° și (c) longitudinal

Figurile 2.47-2.49 prezintă morfologia de suprafață a probelor examinate în toate cele trei direcții de solicitare.

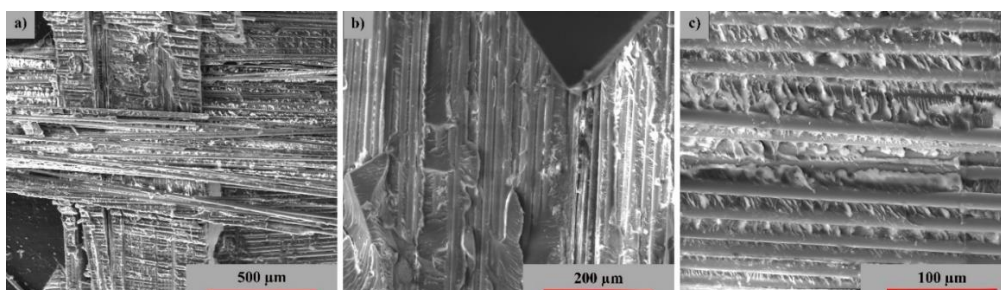


Fig. 2.47 Imagini SEM pe proba transversală cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$: (a) 200X, (b) 500X și (c) 1000X.

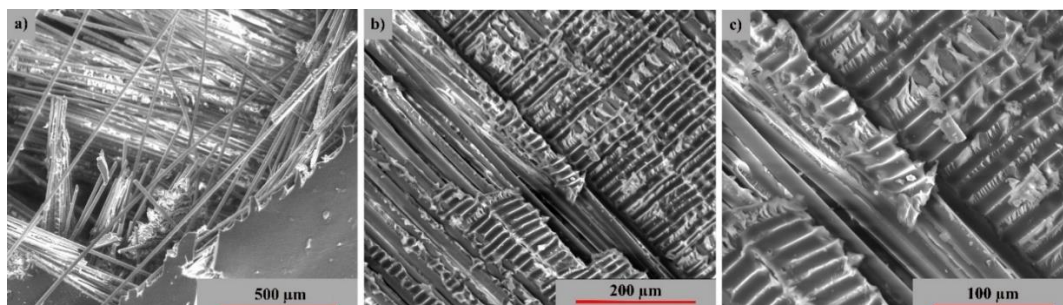


Fig. 2.48 Imagini SEM pe proba la 45° cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$: (a) 200X, (b) 500X și (c) 1000X

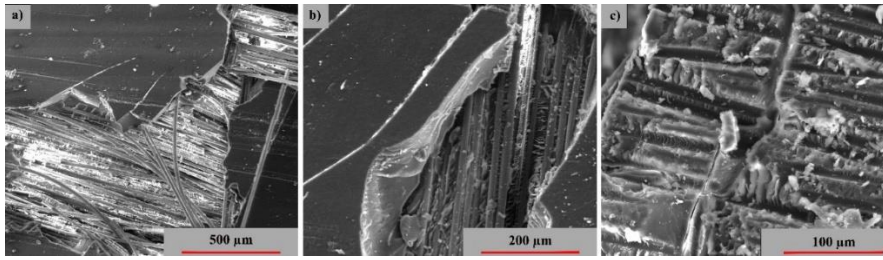


Fig. 2.49 Imagini SEM pe proba longitudinală cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$: (a) 200X, (b) 500X și (c) 1000X

2.8.2 SEM pe materialul GFRP cu orientarea $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ - probe supuse la tracțiune

În cele ce urmează sunt prezentate analizele de microscopie electronică, pe două direcții (LG și TR), pe epruvetele la tracțiune cu deteriorări pronunțate ale stratului. Figura 2.50 prezintă imaginile în secțiune transversală ale probelor testate pe direcția (TR și LG). Figura 2.50a prezintă o rupere a fibrelor pe direcția transversală, în timp ce figura 2.50c evidențiază o rupere a fibrelor pe direcție longitudinală. Aceste două tipuri de rupere au un aspect de deteriorare majoră. Figura 2.51d. prezintă o delaminare parțială la nivelul straturilor intermediare, cedarea prezentând un comportament moderat.

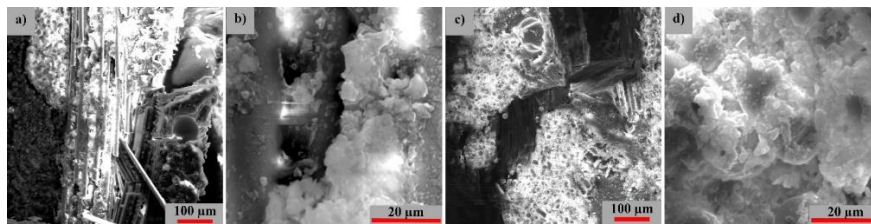


Fig. 2. 50Imagine SEM pe secțiunea materialului GFRP pe 2 direcții: (a) 200 X (TR), (b) 2000 X (TR), (c) 200 X (LG) și (d) 2000 X (LG)

În figurile 2.51 și 2.52 se prezintă morfologia suprafeței probelor studiate în cele două direcții de solicitare, transversal și longitudinal. În fiecare dintre cele două cazuri, atât matricea cât și fibra prezintă un mecanism similar de rupere, de tip fragil. Figura 2.51 ilustrează un model morfologic mai compact și mai uniform al acestor fibre, în timp ce figurile 2.52a și b prezintă o dislocare mai pronunțată. Astfel, inițierea fisurii matricei s-a realizat în jurul porozităților iar propagarea acesteia a fost în lungul fibrelor orientate la 45° față de direcția de încărcare mecanică.

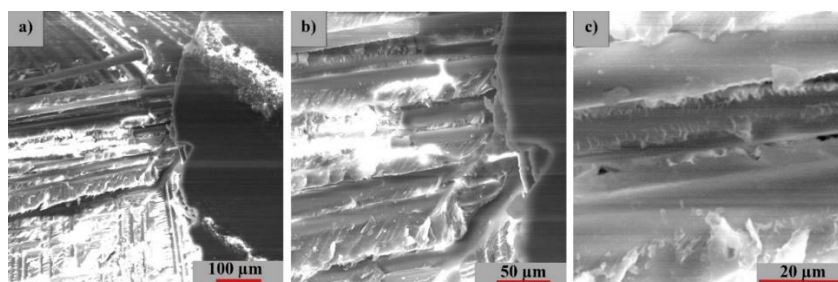


Fig. 2.51 Imagine SEM pe direcția transversală a materialului GFRP $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ (a) 200 X , (b) 500 X și (c) 2000 X

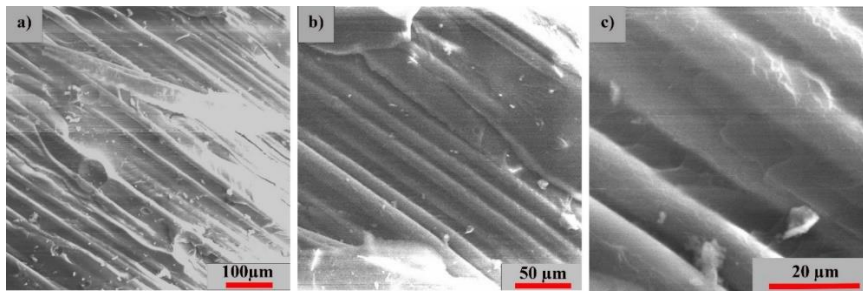


Fig. 2.52 Imagine SEM pe direcția longitudinală a materialului GFRP $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ (a) 200 X, (b) 500 X și (c) 2000 X

2.8.3. SEM pe materialul GFRP cu orientarea $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ - probe supuse la compresiune

Figurile 2.53-2.55 ilustrează caracteristici morfologice la diferite niveluri de mărire, pe suprafață, a epruvetelor investigate care au fost supuse testelor de compresiune.

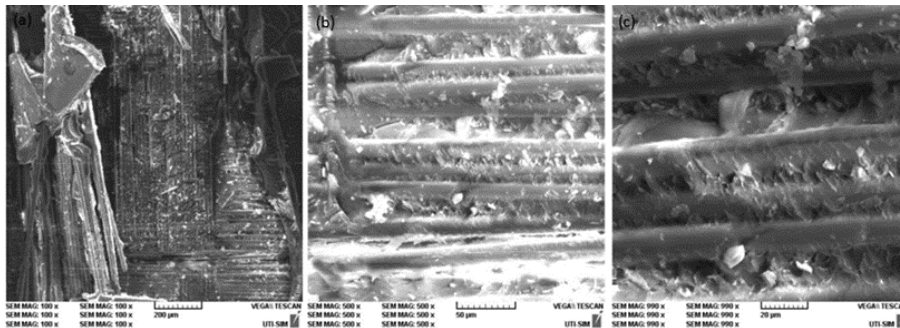


Fig. 2.53 Imagine SEM pe suprafață pentru epruveta TR1 (a) 100X, (b) 500X și (c) 1000X.

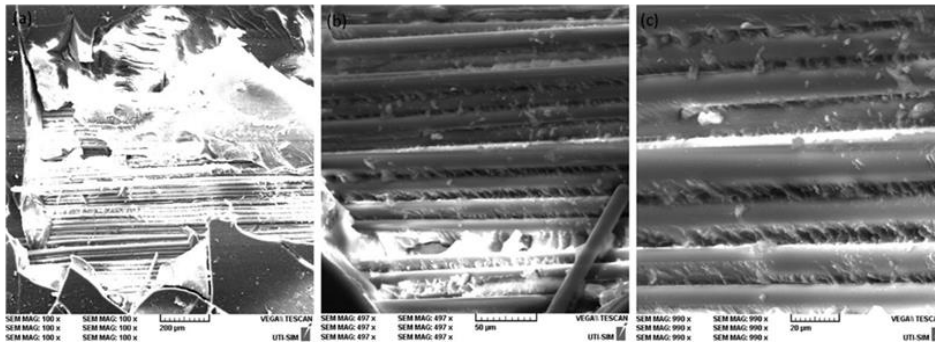


Fig. 2.54 Imagine SEM pe suprafață pentru epruveta TR2 (a) 100X, (b) 500X și (c) 1000X.

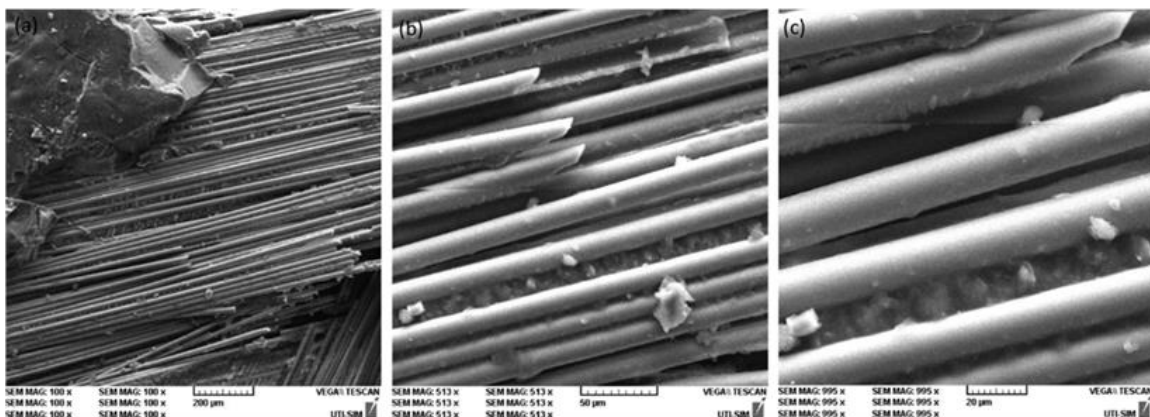


Fig. 2.55 Imagine SEM pe suprafață pentru epruveta TR3 (a) 100X, (b) 500X și (c) 1000X.

2.9 Concluzii generale la capitolul 2

- Încercările la tracțiune demonstrează un comportament ortotrop al materialului, datorită tensiunilor de rupere diferite care apar în direcții diferite, pe cele două plăci GFRP;
- Epruvetele care au fost debitate transversal (pe direcția bătăturii) din placa $[0^\circ/90^\circ]$ au avut cea mai mare rezistență la rupere. Acest lucru este cauzat, în principal, de alinierea fibrelor de armare (ranforsare);
- Rezultatele obținute în urma încercărilor la tracțiune a epruvetelor debitate la 45° din placa $[0^\circ/90^\circ]$ au condus la valori mai mici ale rezistenței la tracțiune decât cele obținute pe celelalte două direcții. Pe de altă parte, alungirea și deformația epruvetelor debitate la 45° au fost mult mai mari decât pe celelalte două direcții;
- O valoare scăzută pentru modulul Young, $E=11479\text{MPa}$ a fost obținută pentru proba tăiată la 45° , din placa cu orientarea fibrelor $[0^\circ/90^\circ]$;
- Pentru placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ s-a obținut o valoare mult diferită a coeficientului Poisson pe direcția de încărcare la 45° , $\nu=0,47$. Această diferență se explică prin faptul că nu există fibre în direcția de încărcare;
- Valorile pentru coeficientul Poisson pentru placa $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ obținute pe cele două direcții de încărcare au fost similare. Cu toate acestea, s-a constatat, de asemenea, că acestea sunt similare cu valorile obținute pentru placa $[0^\circ/90^\circ]$ debitate la 45° . Acest lucru se explică prin faptul că, pe cele două direcții, epruvetele nu conțineau fibre care să fie plasate exact pe direcția de încărcare;
- În consecință, rezultatele obținute arată că dispunerea fibrelor în raport cu direcția de solicitare maximă este foarte importantă. Direcțiile de solicitare în exploatarea palelor de turbină eoliană pot fi relativ aleatorii, iar direcția de solicitare maximă poate să difere substanțial, de exemplu, în raport cu direcția vântului. Dacă luăm în considerare materialul din placa de $[0^\circ/90^\circ]$ și dacă direcția de solicitare maximă ar fi la 45° , s-ar produce o deteriorare rapidă a palelor de turbină, atât din cauza unei scăderi a caracteristicilor de material, cât și a unei modificări substanțiale a coeficientului Poisson în raport cu celelalte două direcții pe $[0^\circ/90^\circ]$. Trebuie acordată o atenție deosebită orientării fibrelor, în special în zonele de tensiune maximă relevate de analiza cu elemente finite. Testele efectuate pe placa $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ demonstrează îmbunătățiri semnificative în ceea ce privește variația mult mai mică a caracteristicilor mecanice și elastice în raport cu direcția de orientare a fibrelor. și în acest caz trebuie să se țină seama de faptul că se pot utiliza în continuare 10 straturi, lăsând mai puține straturi cu o orientare la 90° . Având în vedere că greutatea palei trebuie să fie cât mai mică posibil, adăugarea mai multor fibre nu este o opțiune. Ca urmare, la un volum minim de fibre utilizate, ar trebui să se obțină o rezistență maximă, iar acest lucru se obține prin orientarea corectă a fibrelor;
- Se observă că pentru epruvetele cu orientarea fibrelor la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ au rezultat valori ale modulului de elasticitate transversală și ale rezistenței la rupere mai mari față de valorile înregistrate la încercările pe epruvete cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$. Epruvetele decupate

cu fibrele la $[0^\circ/90^\circ]$ intră în zona deformațiilor plastice la o valoare mai mică a lunecării specifice în raport cu epruveta decupată la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$. Ca urmare, epruvetele cu fibrele la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ rămân în zona liniar/elastică la lunecări specifice mai mari dar și la tensiuni tangențiale mai mari 88 MPa, în raport cu aproximativ 15 MPa pentru epruvetele cu fibrele la $[0^\circ/90^\circ]$;

- Valorile rezultate al modulului de elasticitate transversal $G_{[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]} = 8590$ MPa și ale rezistenței la rupere $\tau_{rf,[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]} = 88.5$ MPa pentru epruveta cu orientarea fibrelor la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ sunt mai mari față de valorile înregistrate la încercarea pe epruveta armată la $[0^\circ/90^\circ]$, $G_{[0^\circ/90^\circ]} = 7824.6$ MPa și $\tau_{rf[0^\circ/90^\circ]} = 54$ MPa;
- Epruveta debitată cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$, intră în zona deformațiilor plastice la o valoare mai mică a lunecării specifice în raport cu epruveta la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$. Ca urmare, epruvetele decupate cu fibrele la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, rămân în zona elastică/liniară la lunecări specifice mai mari dar și la tensiuni tangențiale mai mari, 88 MPa, în raport cu aproximativ. 15 MPa pentru epruvetele decupate cu fibrele la $[0^\circ/90^\circ]$;
- Rezultatele obținute la testele de compresiune pe epruvetele debitate pe direcție transversală din placa cu orientarea la $[0^\circ/90^\circ]$, sunt în bună concordanță cu cele de la tracțiune. Constantele de material ν și E sunt aproximativ apropiate;
- Testul la compresiune de încercare în același timp a patru epruvete dispuse după laturile unui pătrat au mărit momentul de inerție, iar cu ajutorul distanțierelor s-a micșorat lungimea de flambaj. Modul de preluare al deformațiilor în partea centrală a eșantioanelor unde au fost aplicate cele două rozete tensometrice a fost un succes;
- S-a constatat că unele din caracteristicile mecanice și elastice studiate pe baza încercării la tracțiune au suferit variații semnificative funcție de durata imersiei în apă normală, apă de mare și respectiv azot lichid. În toate cazurile, rezistența la tracțiune a avut valori mai mici în cazul probelor imersate. Din acest motiv, se are în vedere că, dacă unei pale de turbină eoliană îi este distrus stratul protector, astfel încât să se poată infiltra apă, rezistența la tracțiune scade în mod accentuat și caracteristicile de material pentru GFRP suferă modificări. În consecință umezeala afectează integritatea structurală a palei de turbină eoliană în timpul funcționării;

CAPITOLUL 3. TESTE EFECTUATE PE PROBE CT PREFISURATE DIN GFRP – VITEZA DE PROPAGARE A FISURII, DETERMINĂRI DEFECTOSCOPICE ȘI TENACITATEA LA FISURARE

3.1 Considerații teoretice privind determinarea vitezei de propagare a fisurii

Pentru orice piesă care poate conține defecte încă din faza de producție tehnologică a materialului sau este susceptibilă de a acumula defecte în exploatare, este importantă determinarea parametrului caracteristic Mecanicii ruperii denumit viteza de propagare a fisurii. Cercetările privind modul de propagare a fisurii, în cazul compozitelor de tipul GFRP, nu sunt foarte numeroase. Propagarea fisurilor în aceste materiale are mai multe cauze, așa cum a fost arătat anterior. Aici amintim câteva:

- Bule de aer care apar în timpul procesului de fabricație;
- Delaminarea, care presupune despărțirea straturilor de matrice de armare, fie între ele fie de armătură;

Rezistența unui material la propagarea în continuare a unei fisuri deja inițiate este furnizată de curba a-N, figura 3.1, în care **a** este lungimea fisurii propagate iar **N** este numărul de cicluri dat prin solicitarea de oboseală, figura 3.2, (Goanță V., 2006).

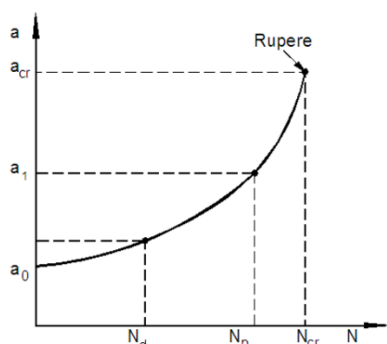


Fig.3.1 Variația lungimii fisurii în timpul solicitării ciclice

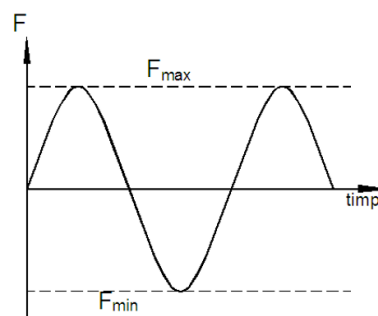


Fig.3.2 Ciclul de solicitarea prin oboseală alternant simetrică

Trasarea curbei de variație a-N constituie o problemă de bază în Mecanica ruperii întrucât, pe baza acesteia se poate aprecia durata de viață a unui element de rezistență sau a unei structuri în care s-a inițiat o fisură. Din figura 3.1 se constată că, pentru propagarea unei fisuri de la lungimea inițială detectată a₀ până la lungimea critică de propagare instabilă a_{cr} sunt necesari N_{cr} cicluri, ce se pot determina, pentru fiecare material pe baza încercărilor pe probe CT (Compact Tension) prefisurate prin oboseală.

Dacă prin metode defectoscopice (utilizarea metodei cu lichide penetrante, de exemplu) se constată că fisura are deja lungimea a₁, pe baza determinărilor anterioare din laborator se poate prezice durata de viață rămasă pentru ca fisura să ajungă la lungimea critică de la care propagarea va fi, în continuare, instabilă.

Pentru diferite lungimi ale fisurii, viteza de propagare a acesteia se poate obține calculând panta diagramei $a-N$. Viteza de propagare a fisurii $\frac{da}{dN}$ depinde de lungimea fisurii inițiale și de nivelul sau amplitudinea tensiunii aplicate, mărimi care intervin în expresia factorului de intensitate a tensiunii, K . În mod obișnuit, odată cu creșterea lungimii fisurii inițiale, respectiv cu creșterea nivelului de solicitare, crește viteza de propagare a fisurii de oboseală. Ca urmare, viteza de propagare a fisurii de oboseală poate fi corelată cu variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK , $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$

3.2 Descriere program de încercări

Metoda de testare prevăzută în standardul amintit prevede încărcări ciclice ale probelor crestate care au fost pre-fisurate prin oboseală. Lungimea fisurii este măsurată în funcție de numărul de cicluri la oboseală efectuate până în momentul respectiv, iar datele sunt supuse analizei numerice pentru a stabili viteza de propagare a fisurii. Viteza de propagare a fisurii este exprimată în funcție de factorul de intensitate a tensiunii, (ΔK), care se calculează pe baza analizei în domeniul linear - elastic. Materiale care pot fi testate prin această metodă nu sunt limitate în grosime sau rezistență, cu condiția ca probele să fie suficient de groase pentru a preveni flambajul și pentru ca în timpul încercării, zona puțin mai depărtată de vârful fisurii să rămână în domeniul elasticitate. Metoda de încercare definește o gamă largă de mărimi, cu dimensiuni proporționale, dar dimensiunea poate fi modificată în funcție de limita de curgere și sarcina aplicată.

Epruveta de tracțiune sau epruveta compactă – CT (compact tension) are o singură crestătură laterală în prelungirea căreia se induce o fisură prin oboseală care să fie, ca aspect, cât mai apropiată de fisurile reale. Configurația și dimensiunile generale ale acestei probe sunt prezentate în figura 3.3.

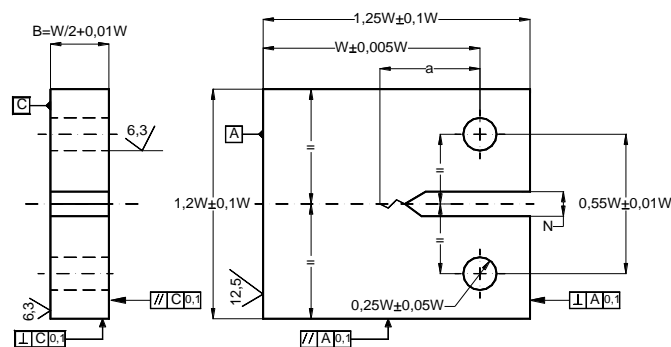


Fig.3.3 Proba de tracțiune – CT (compact tension)

Rezultatele sunt exprimate în termenii factorului de intensitate a tensiunii la vârful fisurii, ΔK , care este definit de teoria elasticității liniare. Programul/Softul „da/dN” conține diferite modalități de a determina propagarea fisurii prin oboseală. Propagarea fisurii este determinată, de obicei, vizual, dar mai există și alte metode cum ar fi diferența de potențial, determinarea complianței la descărcare, etc.

3.3 Materialul utilizat

Pentru determinările privind viteza de propagare a fisurii, și a tenacității s-au utilizat probe CT (Compact Tension) prelevate din două plăci cu grosimea de 10 mm din GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics). Aspecte privind caracteristicile rășinii EPIKOTE MGS LR 385 și modul de elaborare al materialului compozit, au fost prezentate în capitolul 2.

Epruveta de tracțiune sau epruveta compactă – CT (Compact Tension) are o singură creștătură laterală în prelungirea căreia se induce o fisură prin oboseală care să fie, ca aspect, cât mai apropiată de fisurile reale. Configurația și dimensiunile generale ale acestei probe sunt prezentate în figura 3.3. Proba utilizată în cadrul experimentelor a avut grosimea $B=10$ mm, toate celelalte dimensiuni fiind derivate din aceasta.

Prima placă de compozit este compusă din 12 straturi, figura 3.4, care are orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$. Din placă au fost debitate un număr de cincisprezece epruvete prelevate pe trei direcții diferite (5 transversal (TR) pe direcția bătăturii, 5 longitudinal (LG) pe direcția urzelii și 5 pe diagonală la 45°), figura 3.4. S-au confecționat câte 5 probe din fiecare categorie, dar unele dintre probe rupându-se în cadrul prefisurării de oboseală și nu au mai putut fi utilizate.

A doua placă de compozit are tot 12 straturi ca prima, dar orientarea fibrelor este la $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$, din care s-au debitat zece epruvete pe două direcții (5 transversal (TR) și 5 longitudinal (LG)).

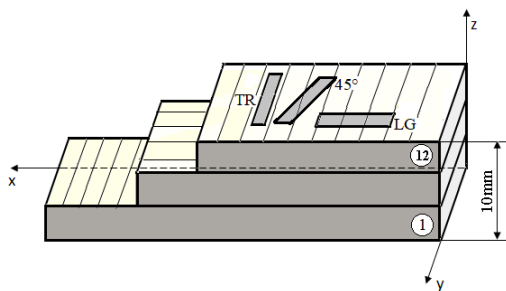


Fig.3.4 Direcțiile de prelevare a probelor de pe placa GFRP $[0^\circ/90^\circ]$

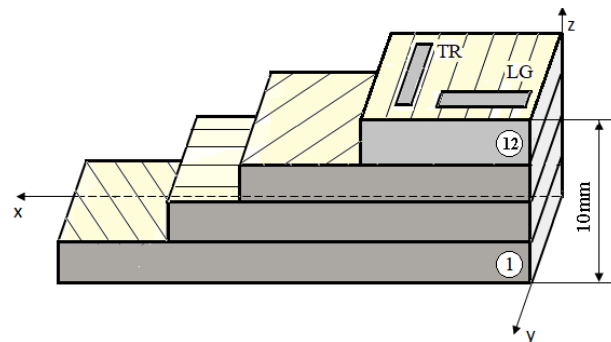


Fig.3.5 Direcțiile de prelevare a probelor de pe placa GFRP $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$

Probe fabricate și prefisurate prin solicitarea de oboseală ciclică, după un ciclu pulsant se pot vedea în figura 3.6.

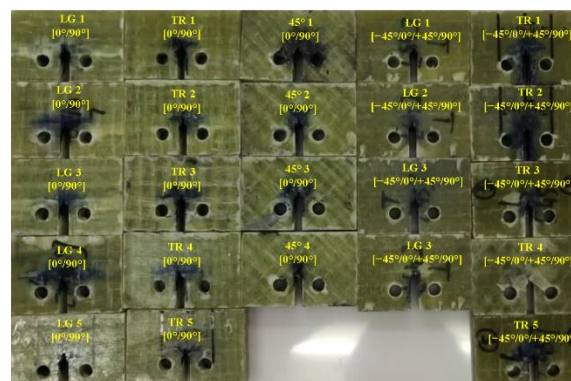


Fig.3.6 Probe prelevate din plăci de GFRP

3.4 Efectuarea încercărilor pentru determinarea da/dN

După prelevarea la modul arătat anterior, probele din GFRP au fost supuse la tracțiune în vederea determinării vitezei de propagare a fisurii. În figura 3.7 se poate observa modul de solicitare la tracțiune a probei CT din GFRP utilizându-se mașina de încercat Instron 8801 din cadrul laboratorului de Rezistența Materialelor. Tot pe această mașină, dar cu ajutorul softului WaveMatrix, s-au efectuat solicitările de oboseală prin tracțiune pulsantă în vederea prefisurării probelor CT cu creștătură laterală, figura 3.8.



Fig.3.7 Tracțiunea pe mașina Instron a unei probe CT din GFRP

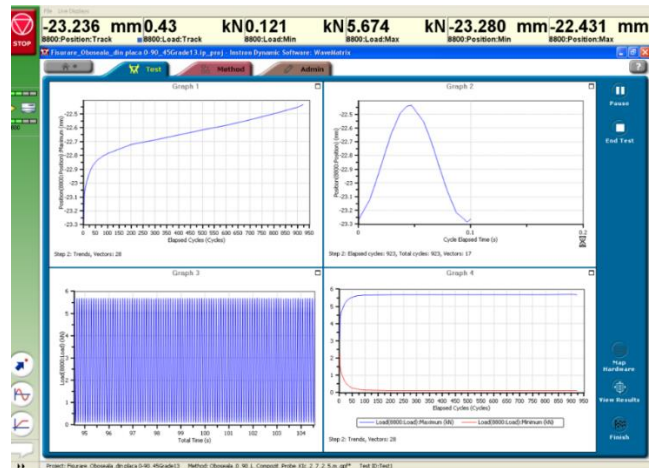


Fig.3. 8 Programul de prefisurare a probelor GFRP

În cadrul softului „da/dN”, în cazul în care se alege metoda de calcul cu ajutorul *Compliancei*, din meniul principal se pot verifica coeficienții ce se utilizează în relația (3.4) pentru calculul lungimii fisurii propagate **a**. Compliancea din relația (3.2) utilizează valorile date în meniul din figura 3.9 pentru E, B și B_{net}. Valoarea pentru v (deplasarea la deschiderea flancurilor fisurii) se preia automat de la extensometrul montat pe fața frontală a probei, a se vedea figura 3.7, (COD – crack opening displacement) iar forța se preia din execuția programului care apare și în meniul secundar – atunci când are loc încercarea.

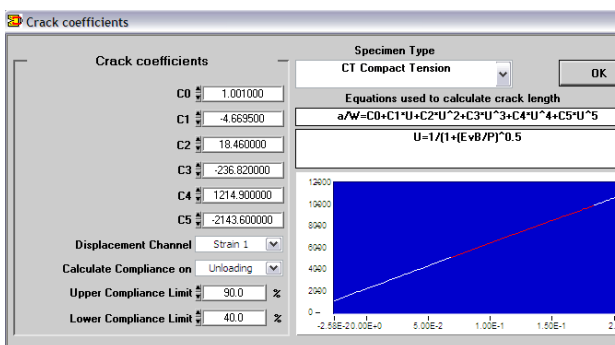


Fig.3.9 Coeficienții utilizați pentru metoda Compliancei

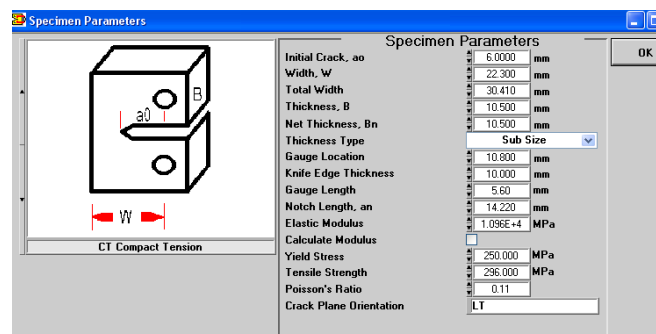


Fig.3.10 Parametrii de lucru – geometrie și caracteristici de material

În figura 3.10 sunt prezentați parametri de lucru ce trebuie furnizați prin softul „da/dN” în legătură cu geometria probei CT și caracteristicile elastice și mecanice ale materialului. Menționăm faptul că, aceste caracteristici au fost determinate anterior pe fiecare direcție în parte și valorile astfel obținute s-au trecut aici, la fel, în raport cu fiecare placă din care a fost prelevată proba și corespunzătoare fiecărei direcții de decupare.

În timpul încercării apare ecranul cu meniul din figura 3.11. În cadrul acestui ecran, în timpul încercării se pot modifica următoarele caracteristici: valorile minime și maxime ale forței de încercare și lungimea fisurii finale. Graficele ce pot apărea aici sunt: graficul de variație a forței în raport cu timpul și un al doilea grafic cuprinde mai multe posibilități pentru abscisă și ordonată: descărcarea în funcție de timp, forța în funcție de deplasare, forța în funcție de LPD redus și forța în funcție de LPD histerzis. Din ecranul de mai jos se observă că valoarea maximă a forței este de 16662 N, în momentul în care trecuseră 26638 cicluri de solicitare. În aceste condiții, la acel moment, tensiunea introdusă în probă (neluând în considerare factorul de concentrare a tensiunilor) era de aproximativ 104 MPa.

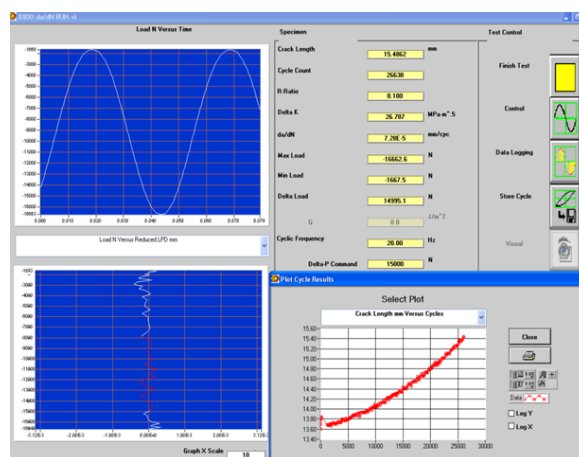


Fig.3. 11 Ecranul de încercare – secundar

Rezultatele sunt prezentate atât sub formă de grafice cât și sub formă de tabele de date, și sunt următoarele: Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare; Variația da/dN în raport cu ΔK ; Variația deplasării flancurilor fisurii în raport cu numărul de cicluri; Variația da/dN în raport cu numărul de cicluri; Variația ΔK în raport cu numărul de cicluri; Tabelul de date.

3.5 Rezultate experimentale

În continuare se vor prezenta rezultatele experimentale obținute la testarea **probelor compacte confecționate GFRP** în vederea determinării vitezei de propagare a fisurii.

Din tabelul de date furnizat de către mașina de încercat, tabelul 3.1, se preiau datele necesare și se trasează unele din graficele prezentate mai sus.

Tabel 3.1 Tabelul de date furnizate de mașina de încercat

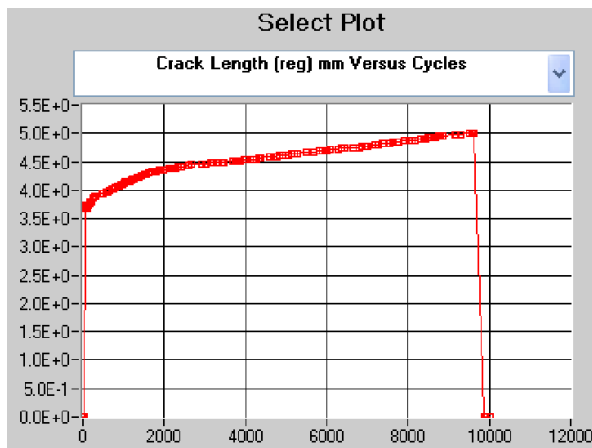
Cycles	Crack Length	EvBP	da/dN mm/cyc	Delta-P N	Delta-K MPa-m	R-ratio	Active Pd	Ref Pd Vo	G J/m ²	Date/Time
1.00E+00	3.18E+00	1.48E+01	0.00E+00	4.90E+02	0.00E+00	7.13E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:20:58
1.10E+01	3.36E+00	1.51E+01	0.00E+00	4.24E+02	0.00E+00	7.53E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:20:59
2.20E+01	3.65E+00	1.57E+01	0.00E+00	4.87E+02	0.00E+00	7.40E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:00
7.70E+01	3.67E+00	1.58E+01	6.82E-04	7.95E+02	1.96E+00	6.71E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:06
8.80E+01	3.68E+00	1.58E+01	1.45E-03	8.46E+02	2.07E+00	6.63E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:07
9.80E+01	3.68E+00	1.58E+01	7.53E-04	9.00E+02	2.20E+00	6.51E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:08
1.19E+02	3.69E+00	1.58E+01	9.15E-04	1.01E+03	2.49E+00	6.29E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:10
1.40E+02	3.75E+00	1.60E+01	9.07E-04	1.13E+03	2.77E+00	6.09E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:12
1.71E+02	3.75E+00	1.60E+01	1.14E-03	1.29E+03	3.18E+00	5.78E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:15
1.81E+02	3.76E+00	1.60E+01	1.22E-03	1.34E+03	3.31E+00	5.70E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:16
1.92E+02	3.76E+00	1.60E+01	1.01E-03	1.40E+03	3.46E+00	5.60E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:17
2.02E+02	3.81E+00	1.61E+01	1.54E-03	1.44E+03	3.59E+00	5.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:18
2.53E+02	3.87E+00	1.62E+01	1.10E-03	1.69E+03	4.23E+00	5.08E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:23
2.95E+02	3.89E+00	1.63E+01	7.91E-04	1.87E+03	4.73E+00	4.75E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:27
3.26E+02	3.92E+00	1.64E+01	4.83E-04	2.01E+03	5.08E+00	4.52E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:31
4.70E+02	3.93E+00	1.64E+01	2.28E-04	2.55E+03	6.46E+00	3.64E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:45
5.00E+02	3.94E+00	1.64E+01	3.01E-04	2.64E+03	6.70E+00	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:48
5.83E+02	3.95E+00	1.64E+01	3.08E-04	2.88E+03	7.34E+00	3.11E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:56
6.04E+02	3.98E+00	1.65E+01	3.59E-04	2.93E+03	7.48E+00	3.05E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:21:58
6.46E+02	4.00E+00	1.65E+01	3.62E-04	3.03E+03	7.75E+00	2.89E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	20230215/15:22:03

Graficele s-au trasat pentru cinci cazuri (tipuri de probe) luate în considerare și vizibile în figura 3.6. Aceste probe, în raport cu modul de armare și modul de debitare a probelor din cele două plăci de compozit, au fost denumite astfel: $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ – longitudinal (direcția de debitare); $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ – transversal (direcția de debitare); $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ – longitudinal (direcția de debitare); $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ – transversal (direcția de debitare); $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ – la 45 grade (direcția de debitare).

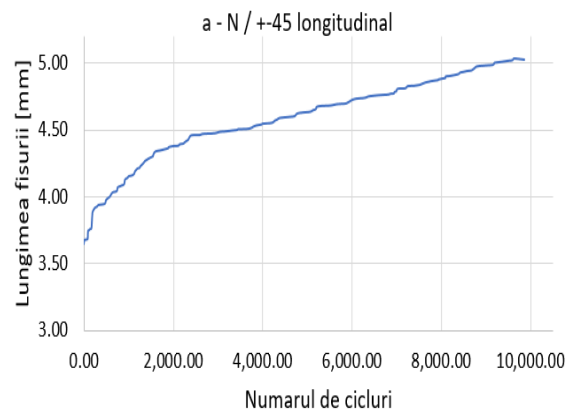
Din cele patru sau cinci probe de același tip avute la dispoziție s-au trasat graficele doar pentru câte una care a fost mai reprezentativă din punct de vedere al rezultatelor obținute. Graficele trasate sunt: variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare, a-N; variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare, da/dN-N; variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii, da/dN-ΔK.

Proba LG 4 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ – debitată longitudinal

În figurile 3.12a și 3.12b avem reprezentarea variației lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare pentru proba cu dispunerea fibrelor la $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ debitată longitudinal. Debitarea longitudinală a fost cu axa geometrică a probei paralelă cu dispunerea fibrelor ce constituie urzeala țesăturii. Avem două reprezentări, respectiv pe cea preluată de la mașina de încercat și o reprezentare în Excel în care datele inițiale, de la pornirea încercării și cele finale de la oprirea testului, au fost eliminate. Există o lungime a fisurii propagate inițial prin oboseală și care, pentru această probă, are lungimea de 3,65 mm. Se observă că, la început, lungimea fisurii crește accentuat după care variația în raport cu numărul de cicluri se stabilizează după o pantă aproximativ constantă. Întrucât ne interesează viteza de propagare a fisurii în zona de propagare stabilă, au fost suficiente aproximativ 10000 de cicluri de solicitare. După un număr relativ mare de cicluri de solicitare ($\gg 10000$) propagarea fisurii va avea loc cu viteză accentuată. Această zonă nu ne interesează pentru că este important pentru componentele ce lucrează în exploatare să nu se ajungă în acest stadiu.



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



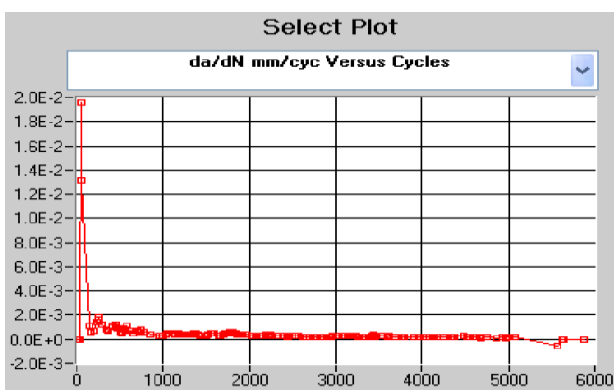
b) variația a-N, prelucrată în Excel

Fig.3.12 Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri pentru proba [-45°/0°/+45°/90°] longitudinal

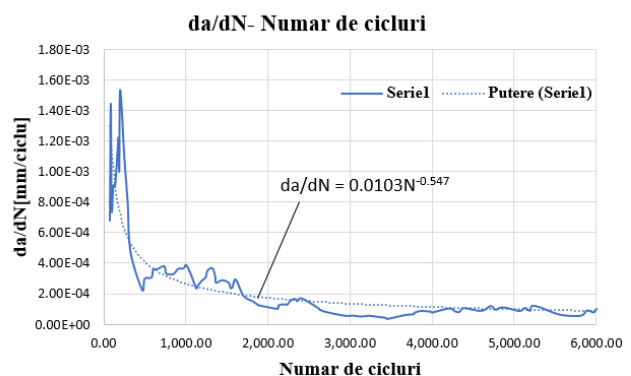
În figura 3.13 este reprezentată variația vitezei de propagare a fisurii, da/dN , în raport cu numărul de cicluri. Viteza de propagare a fisurii variază în timpul încercării. De exemplu, în perioada de sfârșit a încercării viteza de propagare a fisurii crește în mod semnificativ. Totuși, pe noi ne interesează zona în care viteza de propagare a fisurii are o valoare constantă, atunci când suntem cu lungimea fisurii la o valoare intermediară: nici la început cât apar fenomene legate de ecrisare, nici la sfârșit când deja lungimea fisurii a ajuns la o valoare la care aceasta se propagă cu viteză destul de mare, chiar brusc. În consecință, putem considera pentru viteza de propagare a fisurii, calculată cu relația din figura 3.13b la 4500 de cicluri, valoarea

$$da/dN = 0.000103 \text{ mm/ciclu}$$

ca fiind reprezentativă pentru această probă.



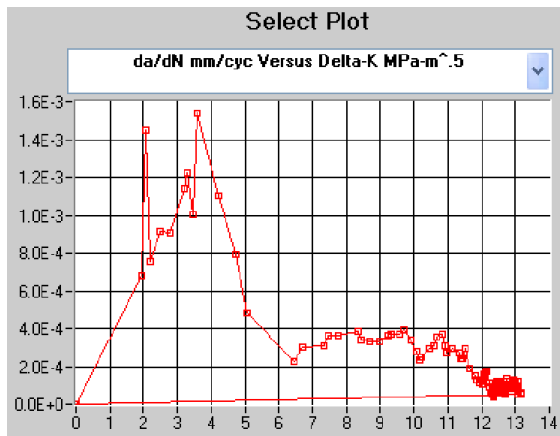
a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



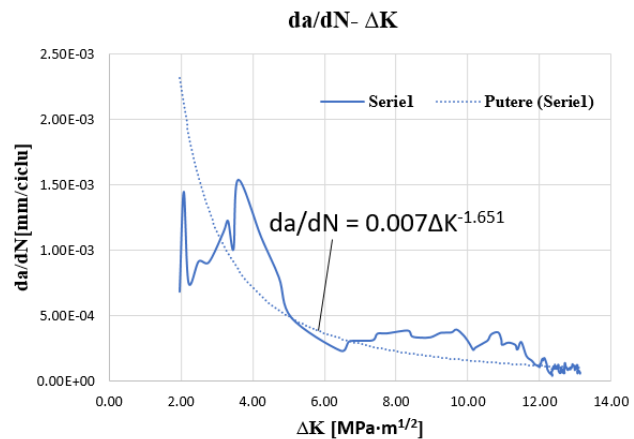
b) variația da/dN-a, prelucrată în Excel

Fig.3.13 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri - pentru proba [-45°/0°/+45°/90°] longitudinal

Din tabelul 3.1 se pot prelua datele și se poate trasa și diagrama de variație a vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii, ΔK , figura 3.14. Și aici, pentru figura 3.14b, cu varianta trasată în Excel, nu s-au luat în considerare primele puncte și ultimele. Pentru partea de început a solicitării se constată o creștere și apoi o scădere a acestei variații. După un anumit număr de cicluri variația da/dN în raport cu ΔK se stabilizează, la valoarea arătată anterior. Este evident că pentru ΔK se înregistrează o creștere continuă atâta timp cât lungimea fisurii propagate crește, conform figurii 3.12.



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



b) variația $da/dN-\Delta K$, prelucrată în Excel

Fig.3.14 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii - pentru proba $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ longitudinal

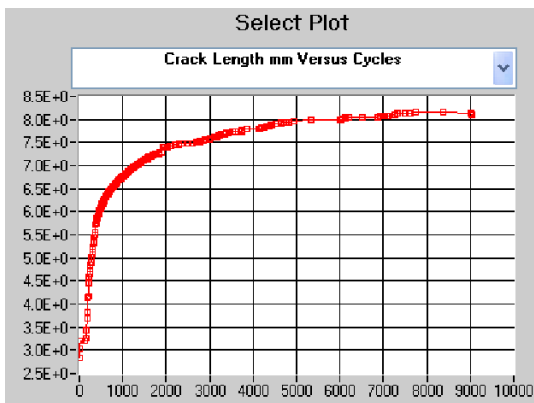
Pentru valoarea anterioară a vitezei de propagare a fisurii, cu ajutorul relației logaritmice din figura 3.14b, $\left[\ln \left(\frac{da/dN}{0.007} \right) \right] \cdot \left(\frac{1}{-1.651} \right) = \ln (\Delta K)$, se calculează variația factorului de intensitate a tensiunii ca fiind:

$$\Delta K = 12,84 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

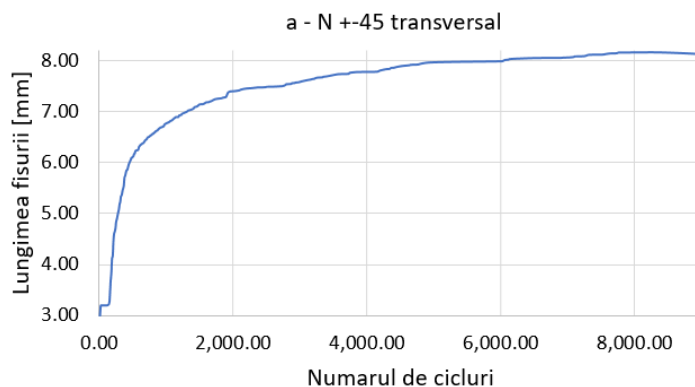
Modul de determinare a variației lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare, $a-N$, variației vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare, $da/dN-N$ și a variației vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii, $da/dN-\Delta K$ pentru următoarele cazuri este identic cu cel prezentat anterior.

Proba TR 3 $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ – debitată transversal

În figura 3.15 se prezintă variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare pentru proba cu dispunerea fibrelor $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ –debitată transversal (cu axa probei paralelă cu bătătura).



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

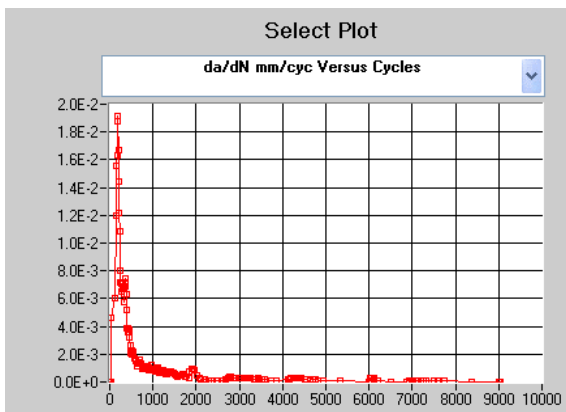


b) variația a-N, prelucrată în Excel

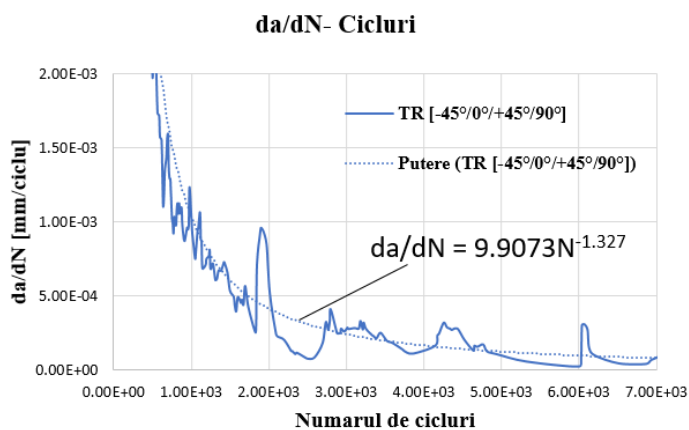
Fig.3.15 Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri pentru proba $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ transversal

În figura 3.16 se prezintă variația vitezei de propagare a fisurii, da/dN , în raport cu numărul de cicluri de solicitare.

$$da/dN = 0.000122 \text{ mm/ciclu}$$



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

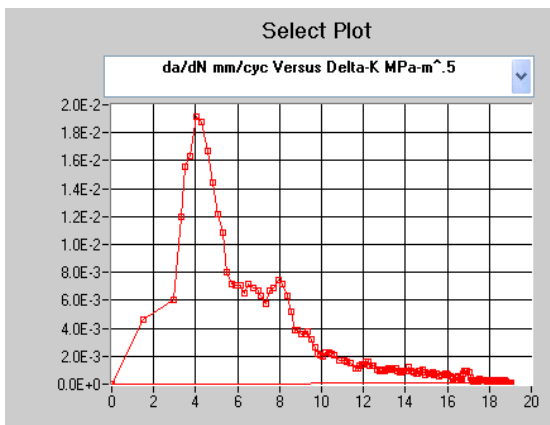


b) variația $da/dN-N$, prelucrată în Excel

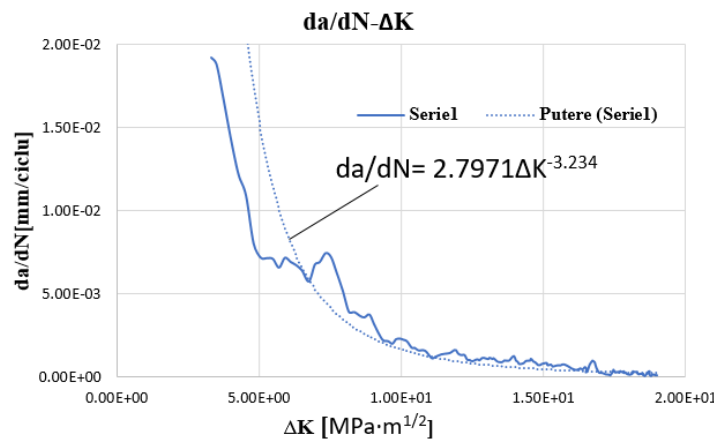
Fig.3.16 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri
- pentru proba $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ transversal

Pentru aceasta avem la dispoziție relația de calcul furnizată în figura 3.17b, procedând la fel ca la proba anterioară. Astfel vom avea:

$$\Delta K = 22,28 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

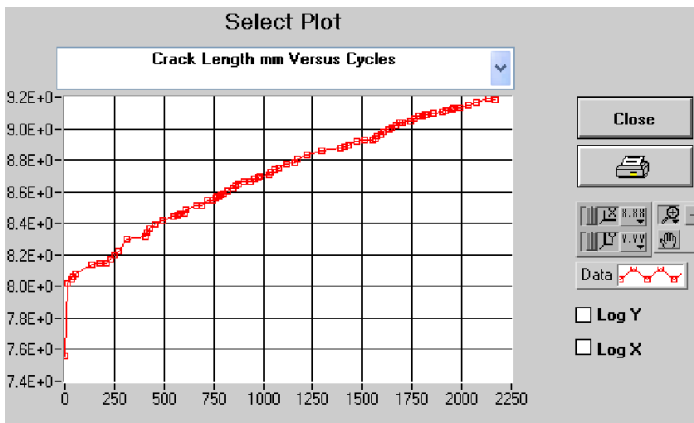


b) variația $da/dN-\Delta K$, prelucrată în Excel

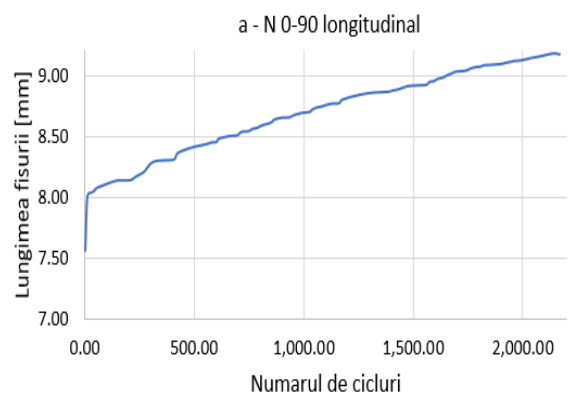
Fig.3.17 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii - pentru proba $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ transversal

Proba LG 1 $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată longitudinal

În figurile 3.18a și 3.18b, pentru proba provenită din placa cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ cu debitare longitudinală (axa geometrică a probei este paralelă cu urzeala) avem variația lungimii fisurii propagate în raport cu numărul de cicluri de solicitare, în cele două variante: prima preluată din figurile furnizate de mașina de încercat și a doua trasată din tabelul de date similar cu tabelul 3.1.



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



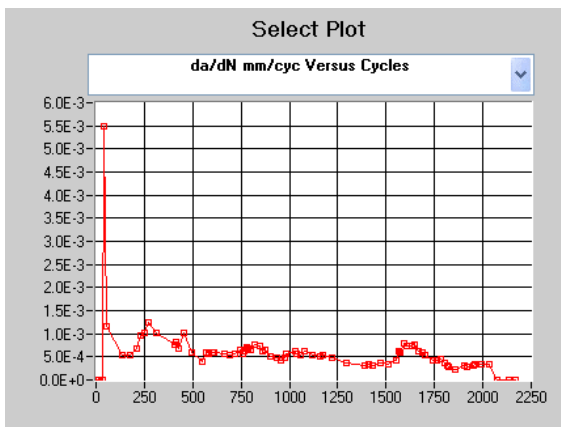
b) variația a-N, prelucrată în Excel

Fig.3.18 Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată longitudinal

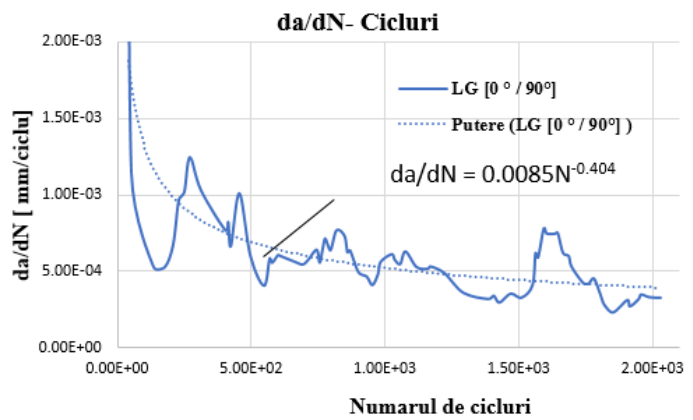
În figura 3.19 avem variația vitezei de propagare a fisurii, da/dN , în raport cu numărul de cicluri de solicitare.

În consecință va rezulta:

$$da/dN = 0.000522 \text{ mm/ciclu}$$



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

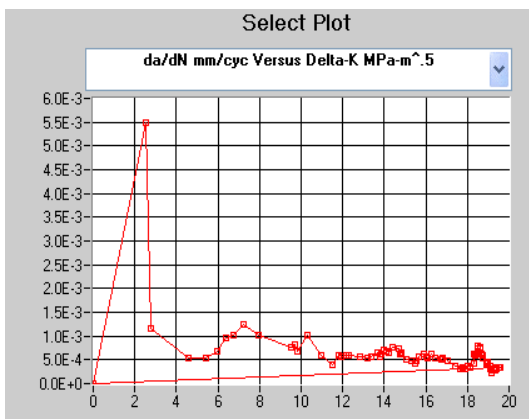


b) variație prelucrată în Excel

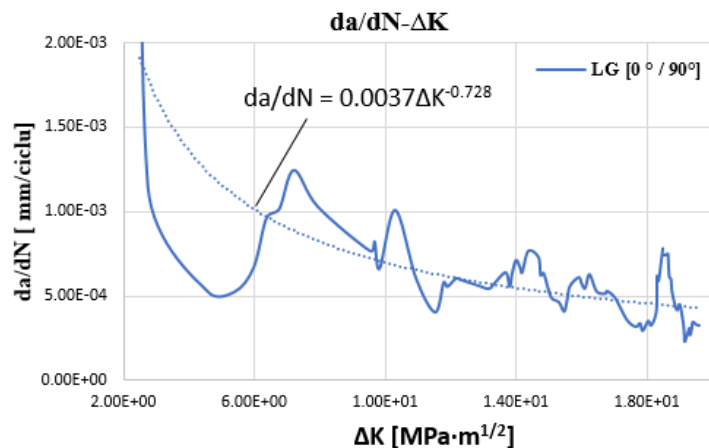
Fig.3.19 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri - pentru proba [0°/90°]– debitată longitudinal

Pentru aceasta avem la dispoziție relația de calcul furnizată în figura 3.20b, procedând la fel ca la proba anterioară. Astfel vom avea:

$$\Delta K = 14,74 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

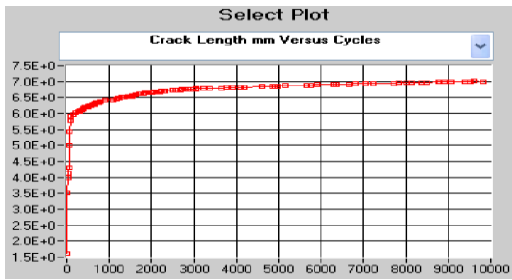


b) variația da/dN-ΔK, prelucrată în Excel

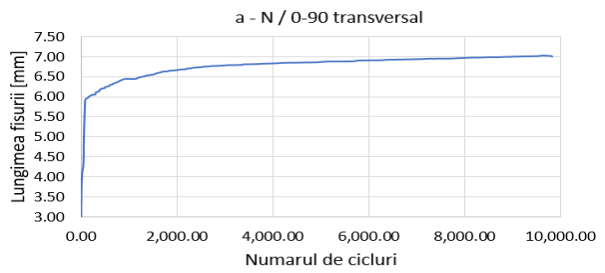
Fig.3.20 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii - pentru proba [0°/90°]– debitată longitudinal

Proba TR 1 [0°/90°]– debitată transversal

În figurile 3.21a și 3.21b avem reprezentarea variației lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare pentru proba cu dispunerea fibrelor la [0°/90°]– debitată transversal.



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



b) variație prelucrată în Excel

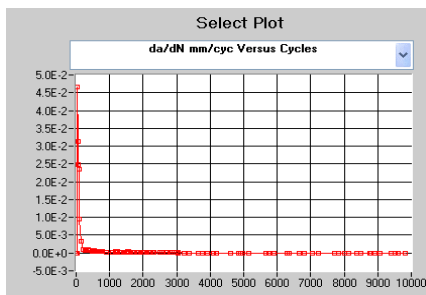
Fig.3. 21 Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri pentru proba [0°/90°]– debitată transversal

În figura 3.22 avem prezentată variația vitezei de propagare a fisurii, da/dN , în raport cu numărul de cicluri de solicitare.

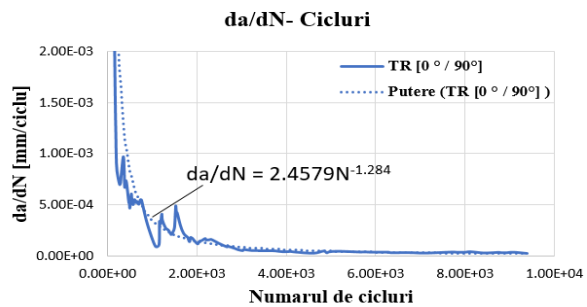
În consecință, putem considera pentru viteza de propagare a fisurii, calculată la $N=4000$, valoarea

$$da/dN = 5.828E-05 \text{ mm/ciclu}$$

ca fiind reprezentativă pentru proba prelevată din placa [0°/90°], debitată transversal.



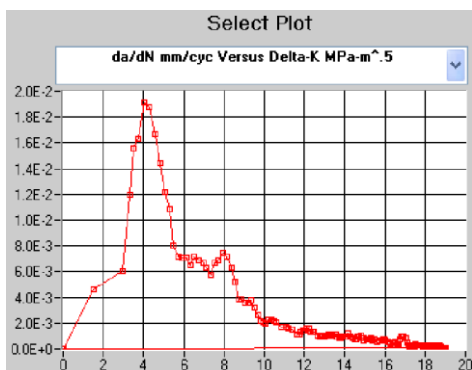
a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



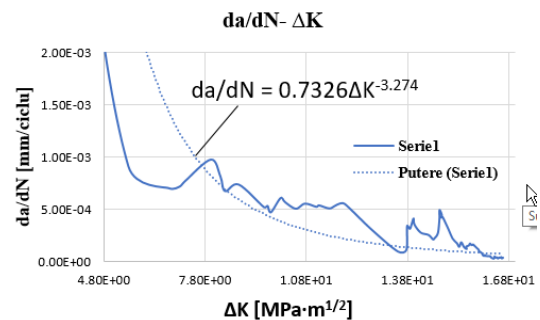
b) variație prelucrată în Excel

Fig.3. 22 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri - pentru proba [0°/90°]– debitată transversal

$$\Delta K = 17,71 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

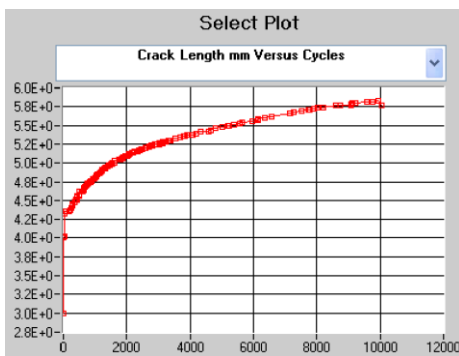


b) variație prelucrată în Excel

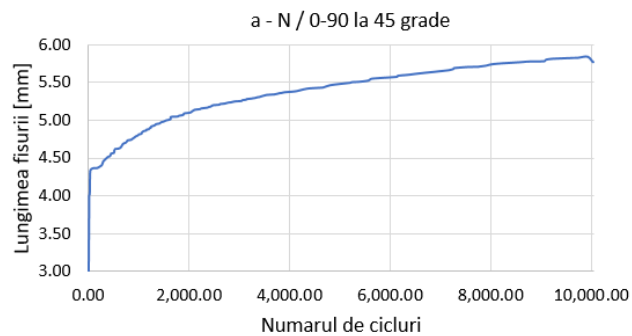
Fig.3.23 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii - pentru proba [0°/90°]– debitată transversal

Proba 4 [0°/90°]– decupată la 45° grade

Ca urmare, zona de după N=2000 de cicluri este de interes pentru noi și o vom considera în continuare în vederea calcului valorii reprezentative a acestei probe pentru viteza de propagare a fisurii, identificabilă în figura 3.25.



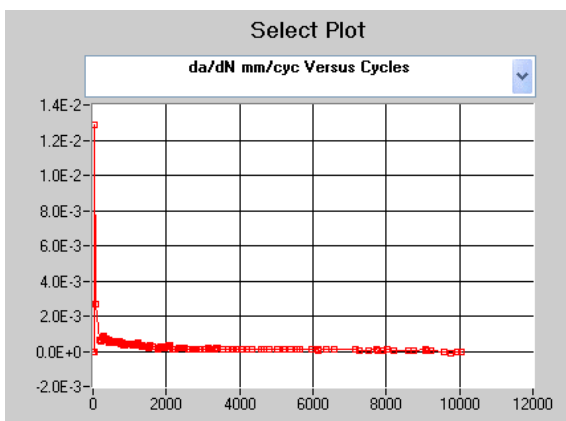
a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



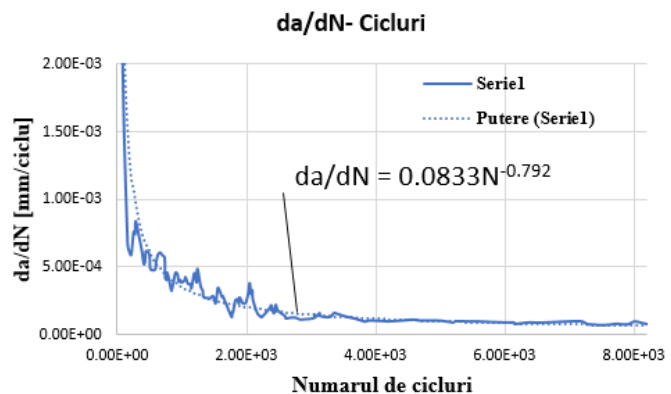
b) variație prelucrată în Excel

Fig.3.24 Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri pentru proba [0°/90°]– debitată la 45°

În figurile 3.25a și b se prezintă variația vitezei de propagare a fisurii, da/dN , în raport cu numărul de cicluri de solicitare, în cele două variante, prima preluată direct de la mașina de încercat, cealaltă fiind trasată în Excel pe baza datelor furnizate de softul mașinii de încercat $da/dN = 0.0001169$ mm/ciclu



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;

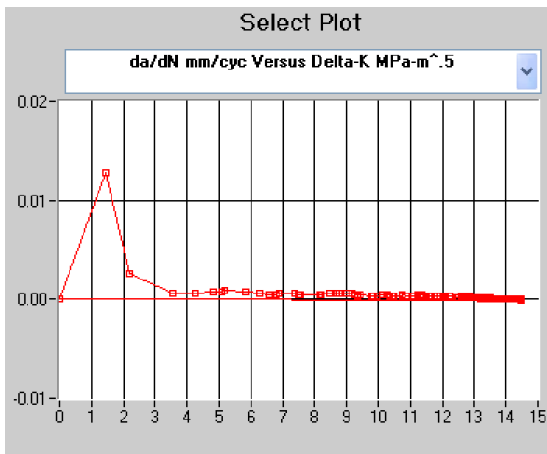


b) variație prelucrată în Excel

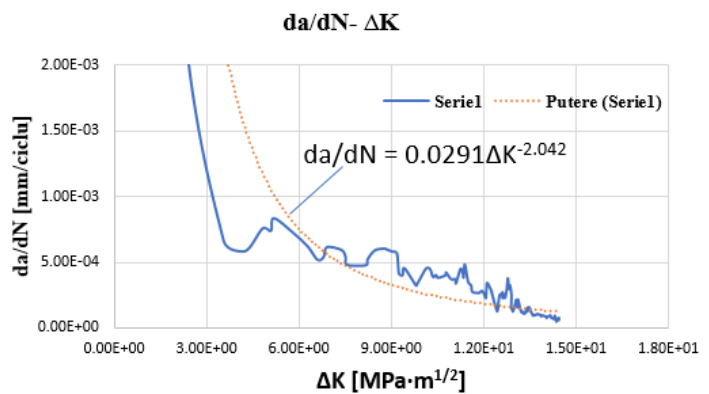
Fig.3.25 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu numărul de cicluri - pentru proba [0°/90°]– debitată la 45°

Pentru aceasta avem la dispoziție relația de calcul furnizată în figura 3.26b. Astfel vom avea:

$$\Delta K = 14,90 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat;



b) variație prelucrată în Excel

Fig.3. 26 Variația vitezei de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii - pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată la 45°

3.6 Concluzii privitoare la determinarea vitezei de propagare a fisurii pe probele fabricate din GFRP

În general, pentru toate probele se constată o creștere mai accelerată a lungimii fisurii la începutul încercării după care urmează o stabilizare, relația dintre lungimea fisurii, a , și numărul de cicluri, N , în a doua etapă de propagare fiind aproape liniară. Numărul de cicluri de solicitare a fost relativ redus pentru că pe noi ne-a preocupat doar zona de propagare stabilă a fisurii, pe care am obținut-o. În tabelul 3.2 se sintetizează valorile obținute pentru viteza de propagare a fisurii, da/dN și, corespunzător, pentru variația factorului de intensitate a tensiunii.

Tabel 3.2 Valori obținute pentru da/dN și ΔK

Nr. crt.	Denumire probă	da/dN [mm/ciclu]	ΔK [MPa·m ^{1/2}]
1	Placa $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ – proba LG 4 debitată longitudinal	0,000103	12,84
2	Placa $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ – proba debitată transversal TR3	0,000122	22,28
3	Placa $[0^\circ/90^\circ]$ – proba debitată longitudinal LG1	0,000522	14,74
4	Placa $[0^\circ/90^\circ]$ – proba debitată transversal TR1	$8,43 \cdot 10^{-5}$	15,96
5	Placa $[0^\circ/90^\circ]$ – proba debitată la 45° grade	0,0001169	14,90

În figura 3.27 s-a trasat un grafic care ilustrează valorile obținute pentru viteza de propagare a fisurii pentru cele cinci tipuri de probe. În figura 3.28 sunt prezentate valorile pentru variația factorului de intensitate a tensiunii. Acestea au fost puse în ordine crescătoare doar pentru o evaluare mai simplă a diferențelor apărute.

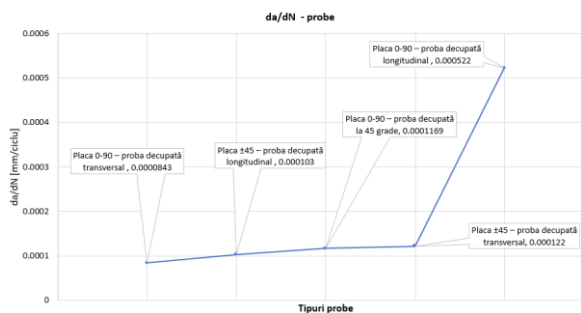


Fig.3. 27 Valori obținute pentru da/dN

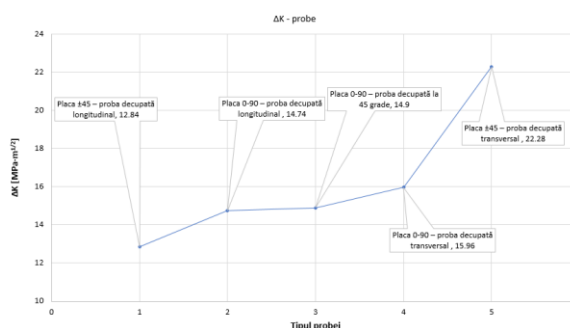


Fig.3.28 Valori obținute pentru ΔK

3.7 Determinări defectoscopice pe probe CT din GFRP

3.7.1 Metoda utilizată pentru determinarea fisurii inițiale propagate prin oboseală

În cadrul acestui subcapitol este prezentată defectoscopia cu lichide penetrante aplicată asupra unor probe de tip Compact Tension, fabricate din GFRP. Configurația și dimensiunile probelor a fost prezentată anterior în cadrul acestui capitol. Acestea au fost confecționate în vederea determinării unor caracteristici de Mecanica ruperii, respectiv, viteza de propagare a fisurii și tenacitatea la fisurare. Decuparea probelor din plăci s-a realizat pe două sau trei direcții diferite, în funcție de tipul de armare al plăcii, în vederea evidențierii diferențelor în ceea ce privește mărimile determinate ulterior. În figura 3.36 se prezintă proba TR 3 [-45°/0°/+45°/90°] și se constată următoarele:

- În toate cele 4 poze se prezintă fisuri propagate prin oboseală;
- În toate cele 4 poze este evidențiat tipul de țesătură bidirecțională;
- În figura 3.36a s-a efectuat o poză în zona de interes, cu puteri diferite de mărire 50X, 100X și 200X analizându-se mai în profunzime fisurile propagate;
- Lungimea fisurilor propagate corespunde cerințelor standardului referitor la determinarea mărimilor de Mecanica ruperii de a fi cuprinse între 2 și 5 mm;
- Toate fisurile sunt propagate în lungul creștăturii formate prin prelucrare mecanică, cu mici devieri de la planul median, pentru unele dintre acestea;
- În figura 3.36b se poate observa fisura propagată paralel cu direcția bătăturii;

În figura 3.37 se prezintă proba LG 4 [-45°/0°/+45°/90°] și se constată următoarele:

- În toate cele 4 poze se prezintă fisuri propagate prin oboseală;
- În toate cele 4 poze este evidențiat tipul de țesătură bidirecțională;

- În figura 3.37a se pot observă 2 fisuri care s-au propagat din direcția creștăturii formate prin prelucrare mecanică;
- În figura 3.37d este evidențiată o rupere a matricei.

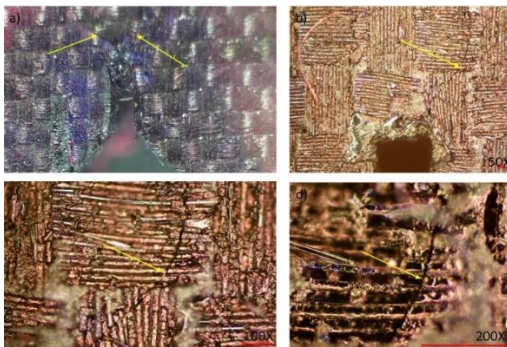


Fig.3.29 Detaliu proba TR 3 [-45°/0°/+45°/90°] – debitată transversal

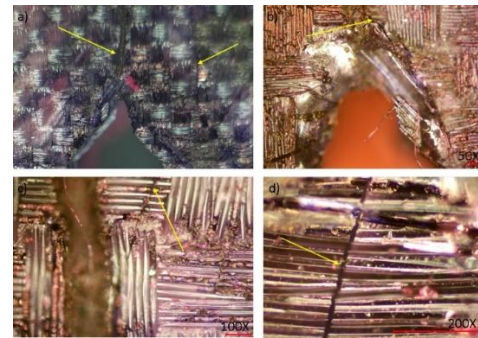


Fig.3. 30 Detaliu proba LG 4 [-45°/0°/+45°/90°] – debitată transversal

În figura 3.38 se prezintă proba LG 1 [0°/90°] și se constată următoarele:

- Există o varietate de moduri de propagare a fisurii;
- În figura 3.38b de constată o rupere a matricei și o deviere inițială în raport cu planul median al fisurii
- În figura 3.38c s-au observat fisuri în stratul de matrice
- Delaminari pronunțate și goluri în stratul de rășină sunt observate în figura 3.38d;

În figura 3.39 se prezinta proba TR 1 [0°/90°]–și se constată următoarele:

- La unele probe fisura nu s-a propagat în lungul planului median al creștăturii;
- Se constată fisuri propagate prin oboseală la toate probele solicitate anterior;
- La probele la care fisura nu s-a propagat drept, măsurarea lungimii fisurii a fost destul de dificilă;
- În figura 3.39b și c se pot observa fisuri ale matricei;

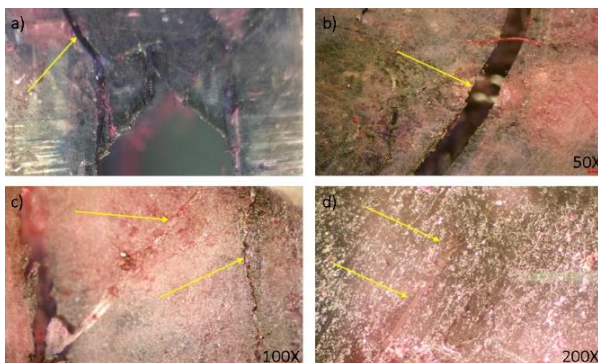


Fig.3.31 Detaliu proba LG 1 [0°/90°] – debitată longitudinal

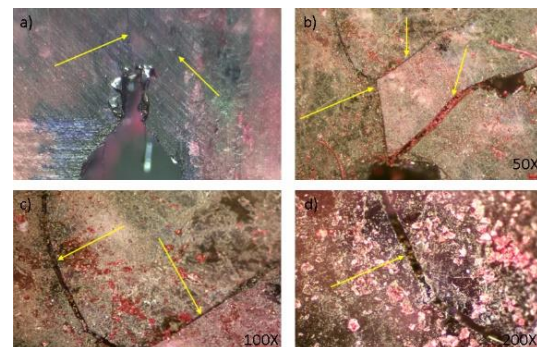


Fig.3. 32 Detaliu proba TR 1 [0°/90°] – debitată transversal

În figura 3.40 se prezintă proba 4 $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată la 45° și se constată următoarele:

- Figura 3.40b prezintă o fisură cu lungime destul de mare dar și o fisură plecând din punctul de aplicație a unei dintre forțe
- În figura 3.40d, după cedarea stratului de matrice, se pot vedea smulgeri de fibră și goluri în interfața fibră-matrice.

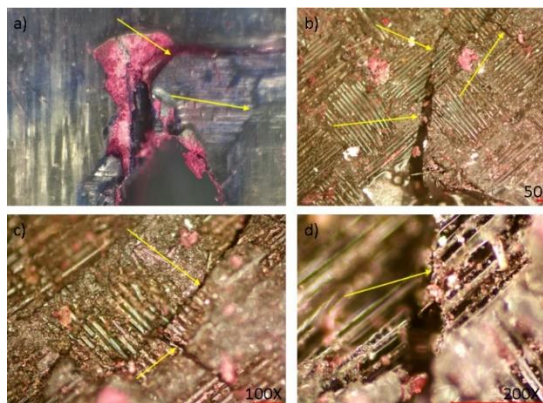


Fig.3.33 Detaliu proba 4 $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată la 45°

3.8 Determinări ale tenacității la fisurare pe probe CT prelevate din plăci de GFRP

3.8.1 Considerații teoretice privind determinarea tenacității la fisurare

Există standardul ASTM E399 (Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials) care se ocupă de determinarea tenacității la fisurare pentru materialele metalice. Există, de asemenea, standardul ASTM E1922 (Standard Test Method for Translaminar Fracture Toughness of Laminated and Pultruded Polymer Matrix Composite Materials) care se ocupă de determinarea tenacității la fisurare translaminară pentru materialele compozite cu matrice polimerică. Fiecare din aceste standarde utilizează o probă compactă la tracțiune cu specificarea că, determinările bazate pe ASTM E1922 trebuie făcute cu mare atenție în sensul în care rezultatele sunt valabile strict pentru condițiile în care zona de deteriorare de la vârful creștăturii este mică în comparație cu lungimea creștăturii iar propagarea fisurii are loc în planul median al creștăturii.

3.8.2. Materiale și probe utilizate

Materialele utilizate sunt același cu cele prezentate anterior. S-au utilizat plăcile din GFRP descrise mai sus, debitarea făcându-se în aceleași condiții și pe aceleași direcții, denumirea probelor fiind: $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ – longitudinal (direcția de debitare); $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ – transversal (direcția de debitare); $[0^\circ/90^\circ]$ – longitudinal (direcția de debitare); $[0^\circ/90^\circ]$ – transversal (direcția de debitare); $[0^\circ/90^\circ]$ – la 45° grade (direcția de debitare).

Geometria și dimensiunile de ansamblu ale probei utilizate sunt cele din figura 3.41, fiind mai aproape de cerințele ASTM E1922.

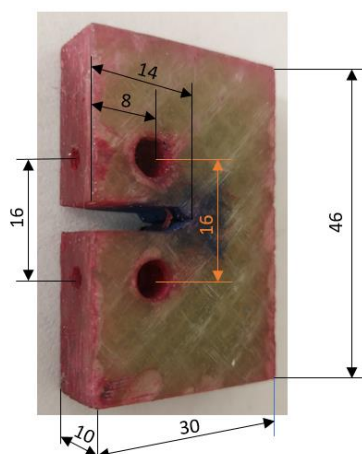


Fig.3.34 Configurația și dimensiunile probei utilizate pentru determinarea tenacității la fisurare.

Încercarea la tracțiune a probelor se face pe mașina universală Instron 8801 așa cum se poate vedea în figura 3.7. Solicitarea este statică, cu înregistrarea variației forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului.

3.8.3. Interpretarea graficului forță-deplasare

Înregistrarea forță – deplasare, obținută în timpul încercării, poate avea una din formele din figura 3.42. Aprecierea rezultatelor încercării pentru determinarea tenacității la rupere K_{Ic} , constă în determinarea valorii *tenacității la rupere calculată* K_Q , pe baza înregistrării forță – deplasare. Valoarea calculată a tenacității la rupere se determină pe baza *forței critice* P_Q , care se obține astfel:

- se trasează o secantă OB având panta cu 5% mai mică decât panta porțiunii inițiale a înregistrării forță – deplasare (OA);
- forța ce corespunde intersecției secantei OB cu curba înregistrată se notează P_5 .

Dacă înregistrarea forță – deplasare este de tipul I, figura 3.42, adică toate valorile forței ce preced pe P_5 sunt mai mici, atunci se consideră $P_Q = P_5$. Dacă se înregistrează un maxim al forței ce precede forța P_5 (înregistrări de tipul II și III în figura 3.42), atunci valoarea forței de calcul P_Q se ia egală cu valoarea forței maxime din înregistrare ce precede P_5 . Neliniaritățile care apar pe porțiunea inițială a înregistrării, datorită așezării traductorului de deplasare, se neglijează.

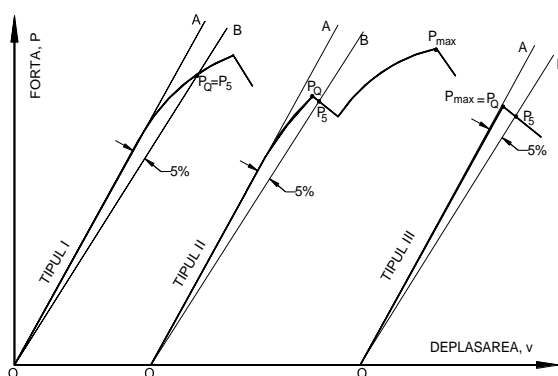


Fig.3.35 Tipuri de variații forță-deplasare la solicitarea pentru determinarea K_{Ic}

3.8.4 Rezultate experimentale obținute la încercările pentru determinarea tenacității la fisurare pe probe GFRP

La pornirea încercării apare fereastra din figura 3.43 în care, pe parcursul încercării, urmează să se traseze graficul forță-deplasare a punctelor de aplicație ale extensometrului (crack opening displacement - COD). După solicitarea până la rupere a probei, graficul este finalizat cu trasarea a două drepte, vizibile și în figura 3.42, și care trebuie să fie: prima dreaptă este tangentă la zona elastică iar a doua dreaptă este înclinată față de prima cu 5%. Așa cum se constată din figura 3.43, softul nu a reușit să identifice corect dreapta tangentă la zona elastică și de aici se produce o eroare în aprecierea forței F_Q ce trebuie considerată și utilizată în relația (3.5) pentru calculul tenacității la fisurare.

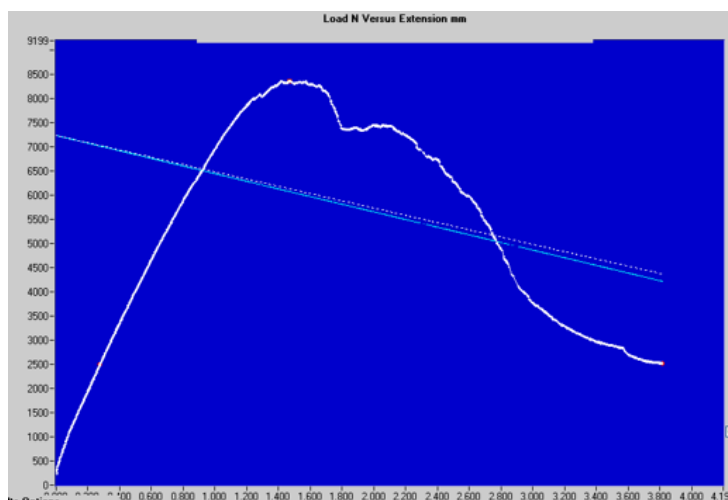


Fig.3.36 Variația forței de tracțiune în raport cu deplasarea punctelor de aplicare a forței - pentru proba $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ longitudinal

Având în vedere observația anterioară se va abandona posibilitatea utilizării determinării automate a tenacității la fisurare de către softul „ K_{Ic} ” și vom face calculele arătate de relațiile (3.5) și (3.6) pe baza datelor primite de la softul mașinii de încercat, cu prelucrarea acestora prin trasarea manuală a celor două drepte menționate mai sus. În aceste condiții, se va obține pentru forța F_Q o valoare mult mai apropiată de realitate, în concordanță cu una din posibilitățile arătate în figura 3.42.

Proba LG4 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ – debitată longitudinal

Așa cum se poate vedea în figura 3.45a și având în vedere considerațiile anterioare, dreptele trasate de softul mașinii de încercat, pentru această probă, sunt plasate incorect. În consecință softul a preluat pentru forța F_Q valoarea de 8,36 kN cu ajutorul căruia a calculat pentru tenacitatea la fisurare: $K_{Ic} = 34,3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Pentru corectare se vor face operațiunile descrise mai jos.

În Excel, din curba de variație a forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului se consideră doar zona elastică, figura 3.44. În mod automat se trasează dreapta de aproximație care oferă ecuația observată în figura 3.44. Ecuația fiind de tipul: $y=mx+n$, se constată că $m=6573.5$ este panta acestei drepte. Ca urmare, dreapta de intersecție cu graficul întreg forța-

deplasare va fi de ecuație: $y = 6244.83d + 622.31$, în care panta noii drepte se obține astfel: $6244.83 = (6573.5 - 5/100 * 6573.5)$.

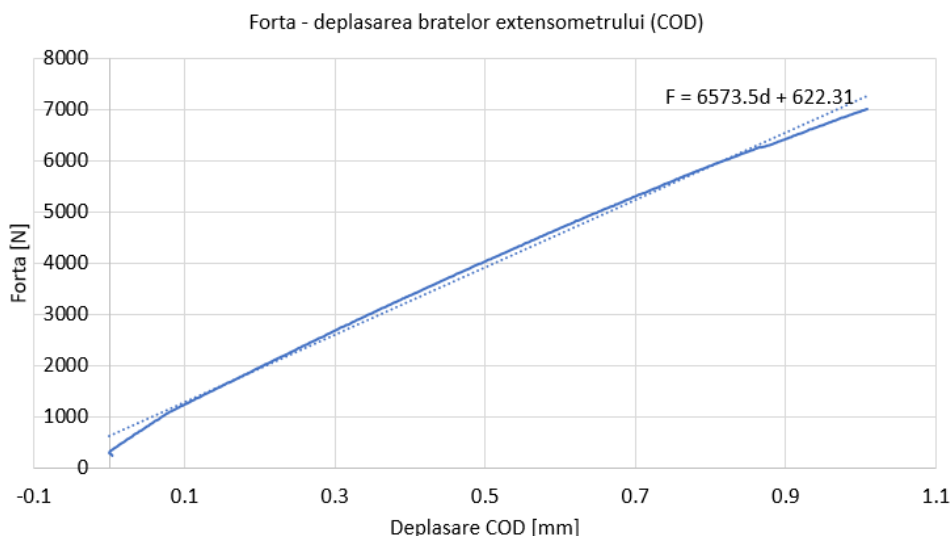
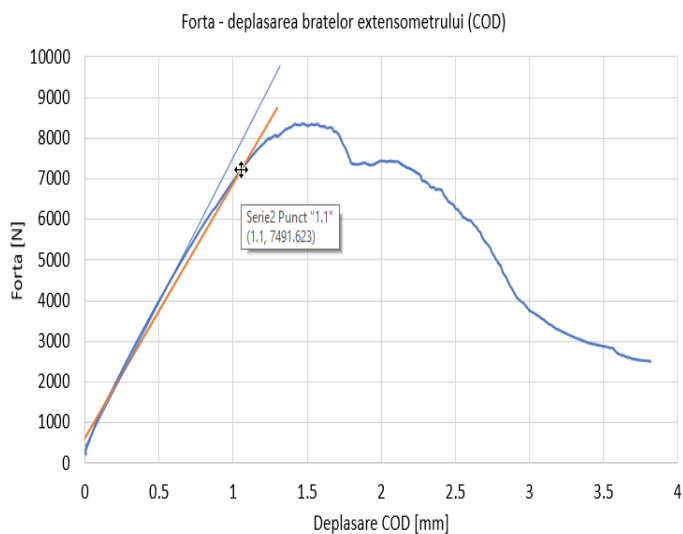
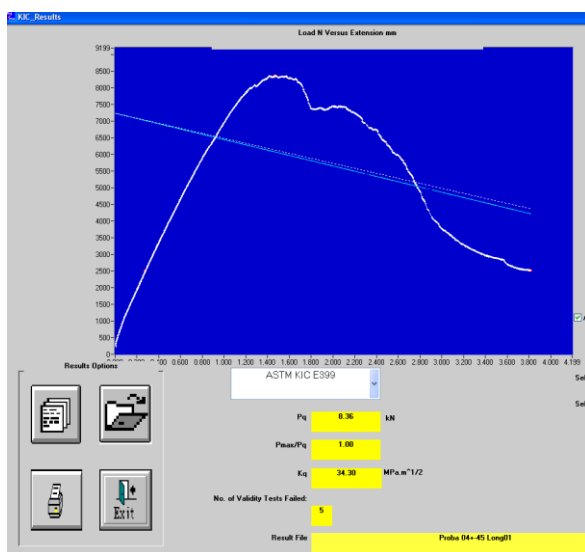


Fig.3.37 Trasarea dreptei de elasticitate cu determinarea ecuației - - proba [-45°/0°/+45°/90°]- decupată longitudinal

Datele pentru trasarea dreptei la înclinare de 5% față de dreapta de elasticitate sunt:

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{elastic}} &= 6753.5d + 622.31 \\
 m_{\text{elastic}} &= 6573.5 \\
 m_{\text{corectat 5\%}} &= 6244.825 \\
 Y_{\text{panta 5\%}} &= 6244.83d + 622.31
 \end{aligned}$$

În graficul forță-deplasare complet, se trasează această dreaptă care intersectează graficul în punctul de coordonate (1.1; 7491.623), vizibil în figura 3.45b. Ca urmare, forța necesară a fi introdusă în relația (3.5) este: $F_Q = 7491.623 \text{ N}$.



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii
de încercat;

b) graficul forță-deplasare cu prelucrare în
Excel

Fig.3.38 Graficele de variație a forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului - pentru proba [-45°/0°/+45°/90°]– debitată longitudinal

Unele din datele necesare pentru calculul $F(a/W)$ și K_{Ic} au fost introduse inițial. Pentru lungimea fisurii se preiau datele din fișierul cu extensia .DAT. În tabelul 3.3 sunt prezentate aceste date pentru proba LG4 [-45°/0°/+45°/90°] debitată longitudinal, calculul tenacității la fisurare făcându-se cu ajutorul relației (3.5).

Observație: se fac transformările necesare pentru ca tenacitatea la fisurare să rezulte în $[MPa \cdot m^{1/2}]$.

Tabel 3.3 Date introduse pentru proba [-45°/0°/+45°/90°] debitată longitudinal

Denumire parametru	Simbolizare	Unitatea de măsură	Valoarea
Forța de intersecție	F_Q	N	7491,623
Lățimea parțială	W	mm	21,23
Grosimea	B	mm	10,34
Lungimea fisurii	a	mm	6,3
Funcția serii	$f(a/w)$	-	5,813
Tenacitatea la fisurare	K_{Ic}	$[MPa \cdot m^{1/2}]$	28,909

În consecință, valoarea de 28.9 $[MPa \cdot m^{1/2}]$ pentru tenacitatea la fisurare poate fi considerată reprezentativă pentru proba [-45°/0°/+45°/90°] debitată longitudinal.

În continuare, pentru celelalte probe, calculele se vor face în mod asemănător și vor fi prezentate doar rezultatele finale.

Proba TR3 [-45°/0°/+45°/90°] – debitată transversal

Pentru această probă, curba din domeniul elastic al variației forței, F, în raport cu punctele de aplicare ale brațelor extensometrului, d, este arătată în figura 3.46. Ecuația dreptei trasată automat din facilitățile oferite de programul Excel este: $F=5368.2d +408.2$. Se constată că aici se face o bună aproximare cu o dreaptă a variației F-d în zona de elasticitate.

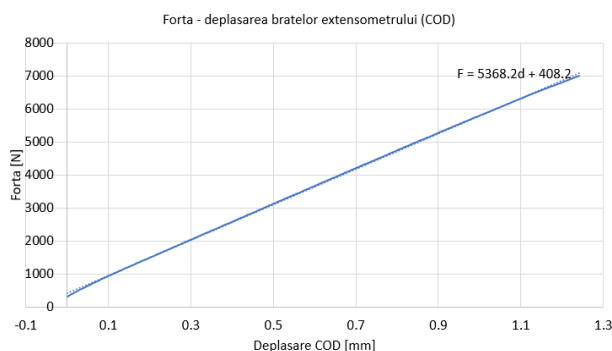
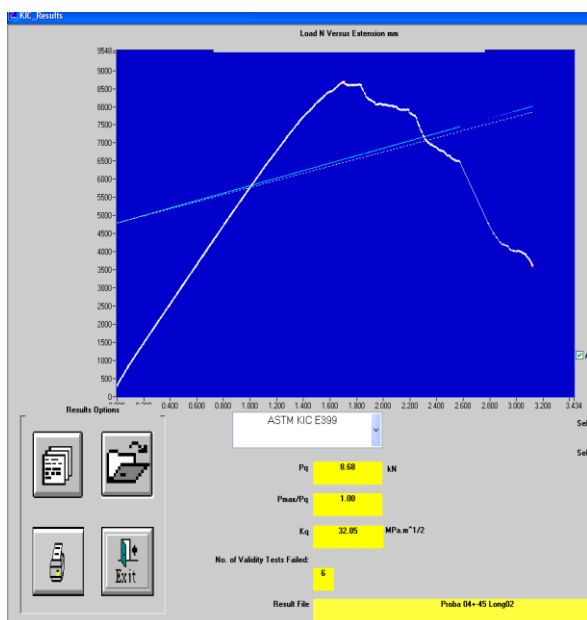
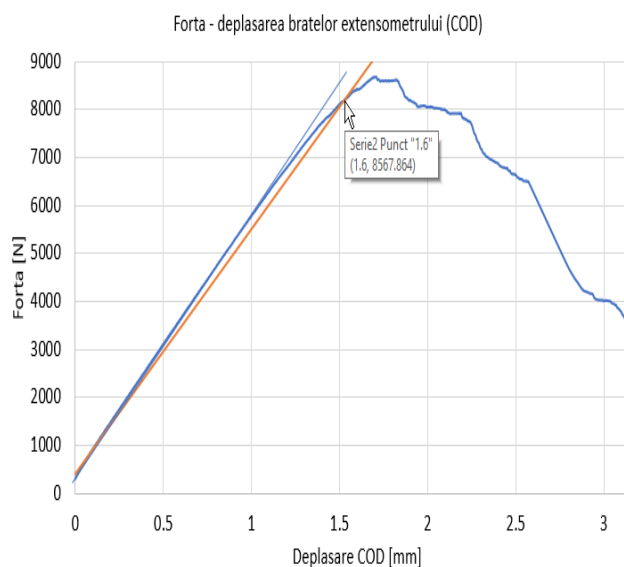


Fig.3.39 Trasarea dreptei de elasticitate cu determinarea ecuației – proba $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ – debitată transversal

În figura 3.47b este trasată această dreaptă, care, la intersecția cu graficul de variație a forței în raport cu deplasarea brațelor extensometrului furnizează punctul de coordonate (1.6;8567.864).



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat



b) graficul forță-deplasare cu prelucrare în Excel

Fig.3.40 Graficele de variație a forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului - pentru proba $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ – debitată transversal

Valoarea forței de 8567,864N se introduce în tabelul de date 3.4, împreună cu alte date caracteristice probei $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ debitate transversal. Automat în Excel se va calcula tenacitatea la fisurare K_{Ic} , făcându-se unele transformări pentru ca valoarea să rezulte în $[MPa \cdot m^{1/2}]$.

Tabel 3.4 Date introduse pentru proba $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ debitate transversal

Denumire parametru	Simbolizare	Unitatea de măsură	Valoarea
Forța de intersecție	F_Q	N	8567,864
Lățimea parțială	W	mm	21,23
Grosimea	B	mm	10,34

Lungimea fisurii	a	mm	7,2
Funcția serii	f(a/w)	-	6,341
Tenacitatea la fisurare	KIc	[MPa·m ^{1/2}]	36,058

În consecință, valoarea de 36.058 [MPa·m^{1/2}] pentru tenacitatea la fisurare poate fi considerată reprezentativă pentru proba [-45°/0°/+45°/90°] debitată transversal.

Proba LG1 [0°/90°]⁰ – debitată longitudinal

Pentru această probă, curba din domeniul elastic al variației forței, F, în raport cu punctele de aplicare ale brațelor extensometrului, d, este prezentată în figura 3.48. Ecuația dreptei trasată automat din facilitățile oferite de programul Excel este: $F = 4847.8d + 495.95$.

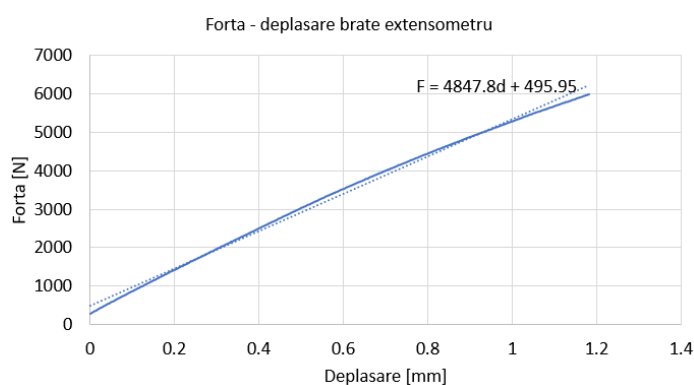


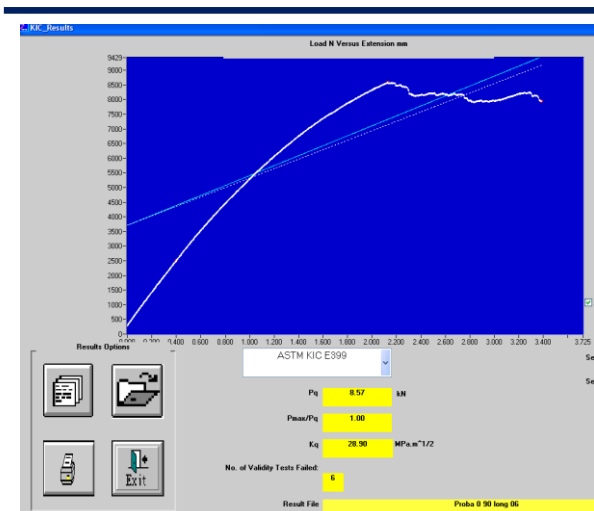
Fig.3.41 Trasarea dreptei de elasticitate cu determinarea ecuației – proba [0°/90°]– debitată longitudinal

Datele pentru trasarea dreptei la înclinare cu 5% față de dreapta de elasticitate sunt:

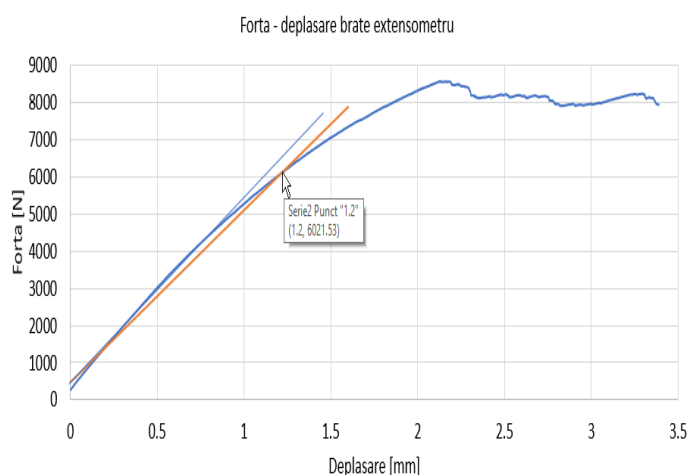
$$\begin{aligned}
 Y_{\text{elastic}} &= 4847d + 495.95 \\
 m_{\text{elastic}} &= 4847 \\
 m_{\text{corectat 5\%}} &= 4604.65 \\
 Y_{\text{panta5\%}} &= 4604,65d + 495.95
 \end{aligned}$$

Tot în Excel se generează un tabel de date ce conține: în prima coloană sunt date deplasările din 0,1 în 0,1 mm (introduse de utilizator); în a doua coloană sunt date valorile forțelor pentru dreapta cu înclinare de 5% rezultate ca urmare a aplicării relației: $F=4847d+495,95$.

În figura 3.49b este trasată această dreaptă, care, la intersecția cu graficul de variație a forței în raport cu deplasarea brațelor extensometrului furnizează punctul de coordonate (1.2;6021.53).



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat



b) graficul forță-deplasare cu prelucrare în Excel

Fig.3. 42 Graficele de variație a forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului - pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ – longitudinal

Valoarea forței de 6021.53N se introduce în tabelul de date 3.5, împreună cu alte date caracteristice ale probei 0-90 cu decupare longitudinală. Automat în Excel se va calcula tenacitatea la fisurare K_{Ic}, făcându-se unele transformări pentru ca valoarea să rezulte în $[\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}]$.

Tabel 3. 5 Date introduse pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ debitată longitudinal

Denumire parametru	Simbolizare	Unitatea de măsură	Valoarea
Forța de intersecție	F _Q	N	6021,53
Lățimea parțială	W	mm	21,23
Grosimea	B	mm	10,34
Lungimea fisurii	a	mm	5,6
Funcția, dezvoltare în serii	f(a/w)	-	5,506
Tenacitatea la fisurare	K _{Ic}	$[\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}]$	22,005

În consecință, valoarea de 22.005 $[\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}]$ pentru tenacitatea la fisurare poate fi considerată reprezentativă pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ debitată longitudinal.

Proba TR1 $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată transversal

Pentru această probă, curba din domeniul elastic al variației forței, F, în raport cu punctele de aplicare ale brațelor extensometrului, d, este prezentată în figura 3.50. Ecuația dreptei trasată automat din facilitățile oferite de programul Excel este: $F = 5480.7d + 553.83$.

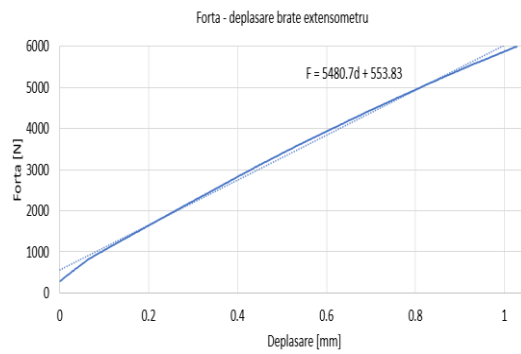
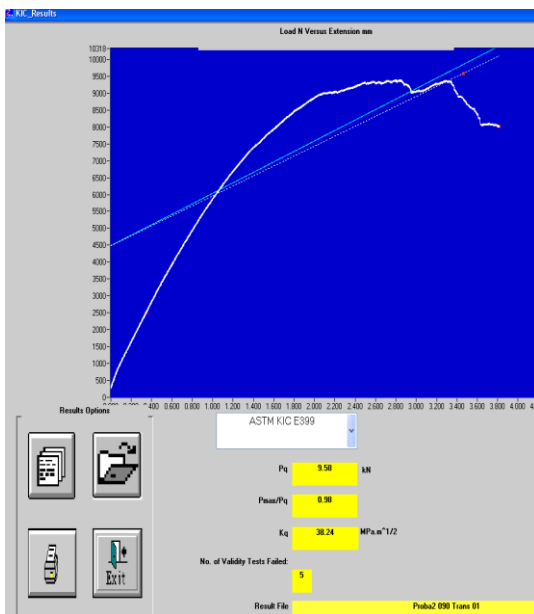


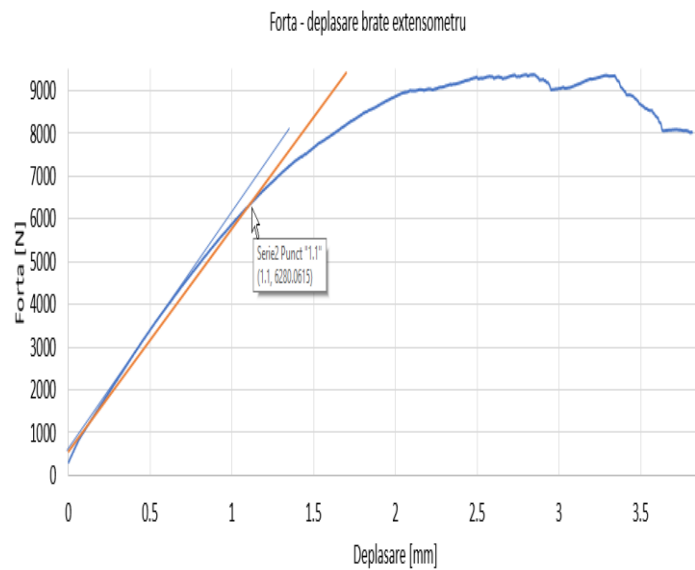
Fig.3.43 Trasarea dreptei de elasticitate cu determinarea ecuației – proba [0°/90°] – decupată transversal

Tot în Excel se generează un tabel de date ce conține: în prima coloană sunt date deplasările din 0,1 în 0,1 mm (introduse de utilizator); în a doua coloană sunt date valorile forțelor pentru dreapta cu înclinare de 5% rezultate ca urmare a aplicării relației: $F=5480.7d + 553.83$.

În figura 3.51b este trasată această dreaptă, care, la intersecția cu graficul de variație a forței în raport cu deplasarea brațelor extensometrului furnizează punctul de coordonate (1.1;6280.06).



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat



b) graficul forță-deplasare cu prelucrare în Excel

Fig.3.44 Graficele de variație a forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului - pentru proba [0°/90°]– debitată transversal

Valoarea forței de 6280.06 se introduce în tabelul de date 3.6, împreună cu alte date caracteristice probei [0°/90°] debitate transversal. Automat în Excel se va calcula tenacitatea la fisurare K_{Ic}, făcându-se unele transformări pentru ca valoarea să rezulte în [MPa·m^{1/2}].

Tabel 3. 6 Date introduse pentru proba [0°/90°] debitată transversal

Denumire parametru	Simbolizare	Unitatea de măsură	Valoarea
Forța de intersecție	F _Q	N	6280,06
Lățimea parțială	W	mm	21,23
Grosimea	B	mm	10,34
Lungimea fisurii	a	mm	6,95
Funcția, dezvoltare în serii	f(a/w)	-	6,181
Tenacitatea la fisurare	KIc	[MPa·m ^{1/2}]	25,763

În consecință, valoarea de 25,763 [MPa·m^{1/2}] pentru tenacitatea la fisurare poate fi considerată reprezentativă pentru proba 0-90 cu decupare transversală.

Proba4 [0°/90°] – debitată la 45° grade

Pentru această probă, curba din domeniul elastic al variației forței, F, în raport cu punctele de aplicare ale brațelor extensometrului, d, este prezentată în figura 3.52. Ecuația dreptei trasată automat din facilitățile oferite de programul Excel este: $F = 3916.3d + 791.5$

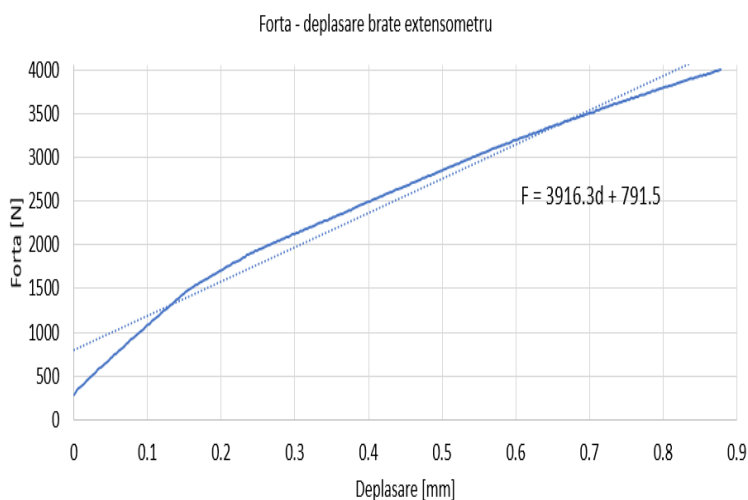
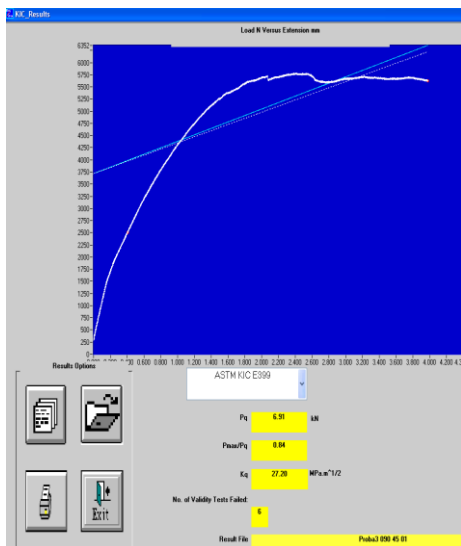


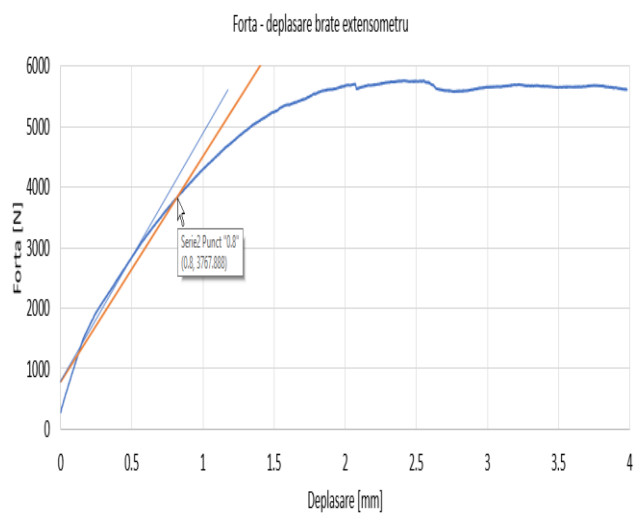
Fig.3.45 Trasarea dreptei de elasticitate cu determinarea ecuației – proba [0°/90°]– debitată la 45° de grade

Tot în Excel se generează un tabel de date ce conține: în prima coloană sunt date deplasările din 0,1 în 0,1 mm (introduse de utilizator); în a doua coloană sunt date valorile forțelor pentru dreapta cu înclinare de 5% rezultate ca urmare a aplicării relației: $F=3720.485d+791.5$.

În figura 3.53b este trasată această dreaptă, care, la intersecția cu graficul de variație a forței în raport cu deplasarea brațelor extensometrului furnizează punctul de coordonate (0.8; 3767.888).



a) imagine preluată de la PC-ul mașinii de încercat



b) graficul forță-deplasare cu prelucrare în Excel

Fig.3.46 Graficele de variație a forței în raport cu deplasarea punctelor de aplicație ale extensometrului - pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ – debitată la 45° grade

Valoarea forței de 3767.888 se introduce în tabelul de date 3.7, împreună cu alte date caracteristice probei $[0^\circ/90^\circ]$ debitată la 45° grade. Automat în Excel se va calcula tenacitatea la fisurare K_{Ic} , făcându-se unele transformări pentru ca valoarea să rezulte în $[MPa \cdot m^{1/2}]$.

Tabel 3.7 Date introduse pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ debitată la 45° grade

Denumire parametru	Simbolizare	Unitatea de măsură	Valoarea
Forța de intersecție	F_Q	N	3767,888
Lățimea parțială	W	mm	21,23
Grosimea	B	mm	10,34
Lungimea fisurii	a	mm	6,83
Funcția, dezvoltare în serii	$f(a/w)$	-	6,107
Tenacitatea la fisurare	K_{Ic}	$[MPa \cdot m^{1/2}]$	15,274

În consecință, valoarea de 15.274 $[MPa \cdot m^{1/2}]$ pentru tenacitatea la fisurare poate fi considerată reprezentativă pentru proba $[0^\circ/90^\circ]$ decupată la 45° grade.

3.9 Concluzii privitoare la determinarea tenacității la fisurare pe probe din GFRP

Pentru cele cinci tipuri de probe vizibile în figura 3.6, diferențiate pe configurația inițială a plăcilor din compozit și în raport cu modul de debitare a probelor, s-a determinat tenacitatea la fisurare prin tracțiune utilizând probe de tip CT (Compact Tension).

În tabelul 3.8 se sintetizează valorile obținute pentru tenacitatea la fisurare pentru cele cinci cazuri de testare.

Tabel 3.8 Tenacitatea la fisurare pentru probe din GFRP

Nr. crt.	Denumire probă	K_{Ic} [MPa·m ^{1/2}]
1	Placa [-45°/0°/+45°/90°] – proba debitată longitudinal	28,909
2	Placa [-45°/0°/+45°/90°] – proba debitată transversal	36,058
3	Placa [0°/90°]– proba debitată longitudinal	22,005
4	Placa [0°/90°]– proba debitată transversal	25,763
5	Placa [0°/90°] – proba debitată la 45° grade	15,274

În figura 3.54 s-a trasat un grafic care ilustrează valorile obținute pentru tenacitatea la fisurare pentru cele cinci tipuri de probe. În acest grafic probele s-au așezat în ordinea crescătoare a valorii K_{Ic} . Se constată că cea mai mică valoare a tenacității la fisurare se înregistrează pentru proba debitată la 45 de grade (nici pe bătătură nici pe urzeală) din placa [0°/90°] iar cea mai mare valoare a K_{Ic} se înregistrează pentru proba debitată transversal (pe direcția bătăturii) din placa [-45°/0°/+45°/90°].

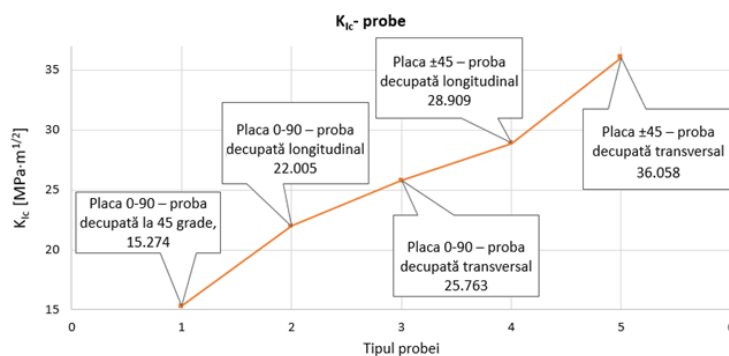


Fig.3.47 Valori obținute pentru K_{Ic} .

Valorile determinate pentru viteza de propagare a fisurii pentru cele cinci cazuri nu sunt neapărat apropiate rezultând un fapt cert: din punct de vedere al tenacității la fisurare are mare importanță modul de așezare a fibrelor în raport cu direcția de solicitare. Pentru materialele cu orientarea fibrelor la [-45°/0°/+45°/90°], cel mai avantajos este să fie așezate fibrele în așa fel încât direcția tensiunilor normale să fie pe direcția bătăturii, unde tenacitatea la fisurare este cea mai mare. Pentru materialele cu țesătura [0°/90°], se recomandă amplasarea acestora astfel încât direcția tensiunilor normale să fie pe direcția bătăturii, unde tenacitatea la fisurare este cea mai mare.

3.10 Concluzii generale la capitolul 3

1. Se constată că cea mai mică valoare a vitezei de propagare a fisurii se înregistrează pentru proba debitată transversal TR3 (pe direcția bătăturii) din placa [0°/90°] iar cea mai mare valoare a da/dN se înregistrează pentru proba debitată longitudinal LG4 (pe direcția urzelii) din placa [0°/90°];

-
2. Diferență semnificativă apare între proba debitată transversal TR3 din placa $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]$ ($12 \text{ MP}\cdot\text{m}^{1/2}$) în raport cu proba debitată transversal TR1 din placa $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ ($22.28 \text{ MP}\cdot\text{m}^{1/2}$)
 3. Scopul acestor determinări a fost de concluziona care dintre probele utilizate în cadrul încercărilor de prefisurare pot fi utilizate în continuare în cadrul încercărilor ulterioare de determinare a mărimilor caracteristice de Mecanica ruperii;
 4. Așa cum s-a menționat anterior, au fost făcute mai multe probe identice pentru aceeași placă și aceeași direcție. Ne-am așteptat de la început la o dispersie a rezultatelor în ceea ce privește modul de propagare a fisurilor din creșătura preformată. Acest lucru se întâmplă din cauză că materialul compozit nu este unul structural, fiind anizotrop, cu straturi de armare dispuse în mod diferit;
 5. În consecință, așa cum s-a constatat și din determinările defectoscopice, a existat o anumită varietate în ceea ce privește direcția propagării fisurilor de oboseală, pentru același tip de probe.

4.1 Preprocesarea modelului palei de turbină eoliană

Configurația palei de turbină eoliană de tipul GE1.5sle a fost determinată prin studierea parametrilor utilizând FEM. Analiza cu elemente finite s-a realizat în soft-ul ANSYS Academic R17.2 în workbench-ul Static Structural.

Rețeaua de discretizare a celor trei componente ale ansamblului palei (pala propriu-zisă, elementul de rigidizare, elementul de prindere cu butucul) s-a obținut prin combinarea unei parametrizări generale cu o parametrizare particulară/individuală pe fiecare componentă în parte.

În parametrizarea generală s-a specificat funcția de dimensiune de tip curbură (în zonele în care curbura este mai pronunțată rețeaua de discretizare va fi mai fină), cu un unghi normal de curbură de 24 grade, tranziție lin/înceată (slow transition), o netezire medie a rețelei și o rată de creștere a celulelor de 1,1.

În cadrul simulărilor s-au folosit două materiale pentru componentele ansamblului:

1. GFRP-pentru pala propriu-zisă și elementul de rigidizare (**caracteristicile de material determinate în capitolul 2 au fost introduse în proprietățile de material al GFRP din Ansys**);
2. Oțel (implicit din ANSYS 17.2) - pentru elementul de prindere cu butucul.

Rețeaua de discretizare, figura 4.3, a ansamblului palei a fost realizată exclusiv din elemente de formă tetraedrală cu un număr de 874815 elemente și 1466508 noduri.

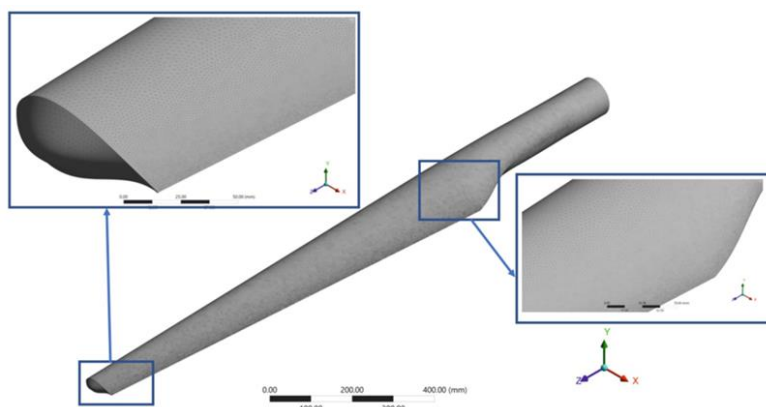


Fig. 4.1 Rețeaua de discretizare a palei

Postprocesarea rezultatelor FEM a fost realizată pentru 5 cazuri de încărcări diferite. Ca urmare a experimentelor efectuate în cadrul proiectului PCCA 2013-4-0656, contract nr. 59/01.07.2014, s-a estimat că încărcarea maximă la care modelul palei de turbină poate fi supus este: $F=1000\text{N}$ (aplicată la vârful palei) și $M_t= 170660\text{ Nmm}$ (aplicată la vârful palei).;

4.2 Cazul 1: Analiza cu elemente finite la încovoiere: $F=1000N$

Starea de încărcare este realizată prin încastrarea butucului și aplicarea unei forțe de 1000N pe direcția intrados-extrados pe suprafața de la vârful palei, figura 4.4.

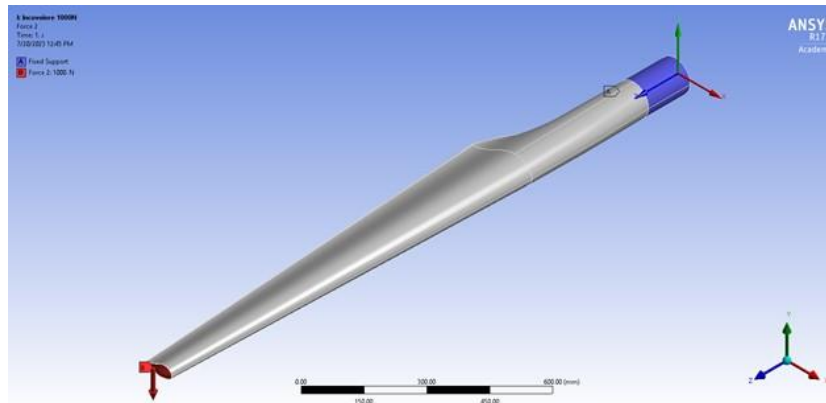


Fig. 4.2 Starea de încărcare la încovoiere

Distribuția tensiunilor echivalente von Mises

Rezultatele analizelor cu elemente finite sunt prezentate față de un sistemul de coordonate atașat palei, cu originea la baza acesteia, cu centrul pe axa de simetrie a butucului, cu axa Z în lungul palei, axa X pe direcția bord de fugă-bord de atac (pozitivă) și axa Y pe direcția extrados-intrados (pozitivă), pentru toate cele cinci cazuri de simulări.

Astfel, forța aplicată pe direcția intrados-extrados este de 1000N. Pentru analizele cu elemente finite, coordonatele sunt date în funcție de același sistem de coordonate.

În figura 4.5 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises, maxima fiind de 60,318 MPa, care apare pe suprafața interioară a extradosului. Coordonatele punctului în care s-a obținut tensiunea von Mises maximă, conform sistemului de coordonate atașat sunt: X: -6,282 mm, Y: -14,13 mm, Z: 1425,93 mm.

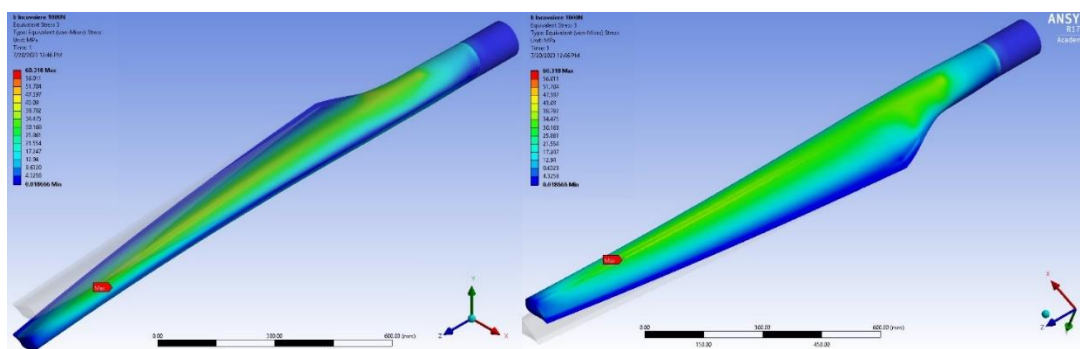


Fig. 4.3 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises-vedere izometrica intrados-extrados și extrados-intrados

În figura 4.6 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises maxime la 130 mm față de vârful palei, $\sigma_{ech \max}=35,16$ MPa. În figura 4.7 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente maxime la 230 mm față de butucul palei, $\sigma_{ech \max}=13,84$ MPa.

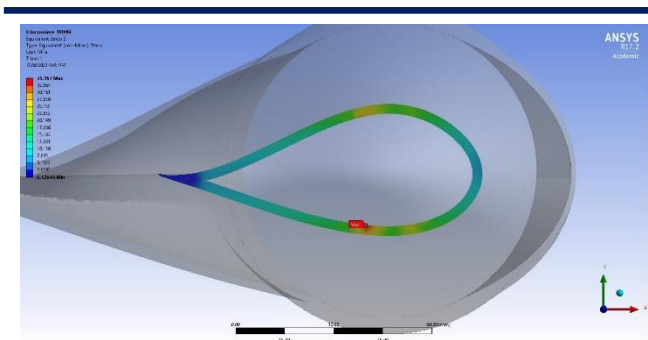


Fig. 4.6 Distribuția tensiunilor echivalente maxime la 130 mm față de vârful palei

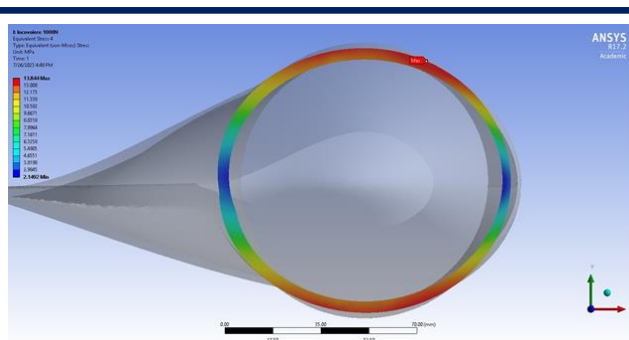


Fig. 4.7 Distribuția tensiunilor echivalente maximă la 230 mm față de butucul palei

Distribuția tensiunilor principale maxime

În figura 4.8 se prezintă harta tensiunilor principale maxime care este de 41,83 MPa și care apare pe intradosul palei în punctul de coordonate X: -5,729mm, Y: 23,85 mm, Z: 1254,23 mm situat, de asemenea pe suprafața interioară a învelișului palei.

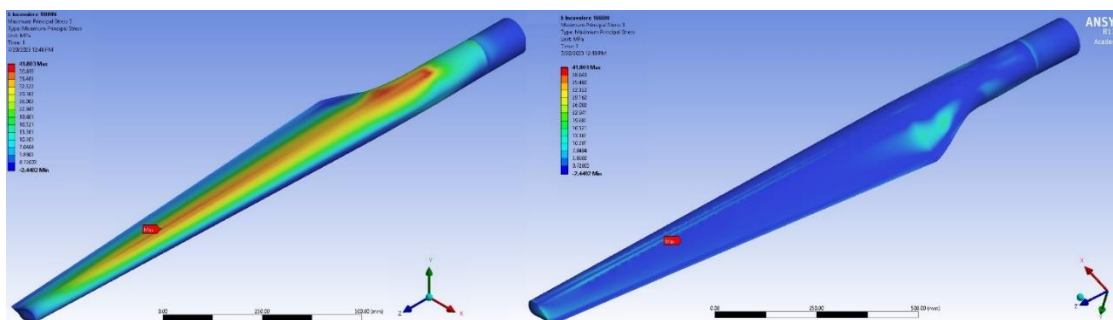


Fig. 4.8 Harta tensiunilor principale maxime -vedere izometrica pe direcția intrados-extrados și extrados-intrados

4.3 Cazul 2: Analiza cu elemente finite la solicitarea de răsucire (sens orar) ($M_t = -170660,646$ Nmm)

În figura 4.9 se prezintă starea de încărcare care este realizată prin încastrarea butucului și aplicarea unei momente de torsiune de $M_t = -170660,646$ Nmm în sensul orar, așa cum ne uităm dinspre capătul liber al palei.

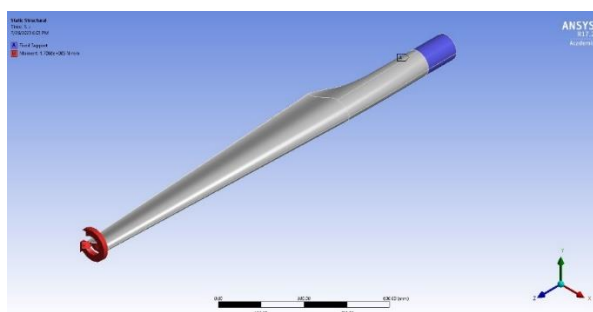


Fig. 4.9 Starea de încărcare la solicitarea de răsucire (sens orar)

Distribuția tensiunilor echivalente von Mises

În figura 4.10 se prezintă harta tensiunilor echivalente având valoarea maximă de 49,15 MPa care apare pe suprafața interioară a extradosului. Coordonatele punctului în care s-a obținut tensiunea von Mises maxima conform sistemului de coordonate atașat, sunt: X: -59,99mm; Y: -3,03mm; Z=1730,83mm.

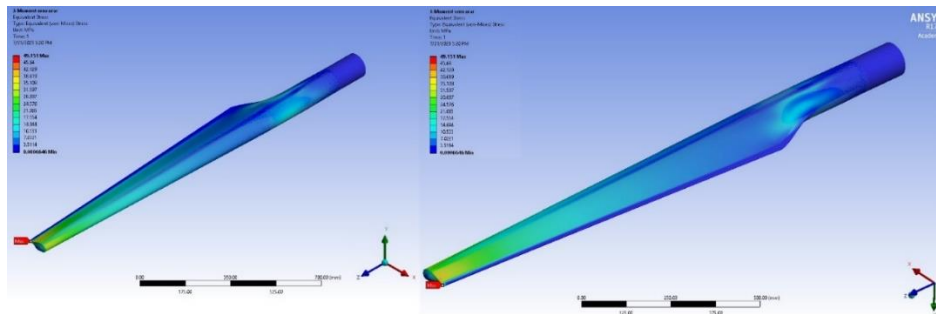


Fig. 4.10 Harta tensiunilor echivalente von Mises - vedere izometrica intrados-extrados și extrados-intrados

Distribuția tensiunilor principale maxime

În figura 4.11 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1 \max} = 46.83$ MPa. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea principală maximă: X: -54,79mm; Y: -3,74mm; Z=1729,83mm.

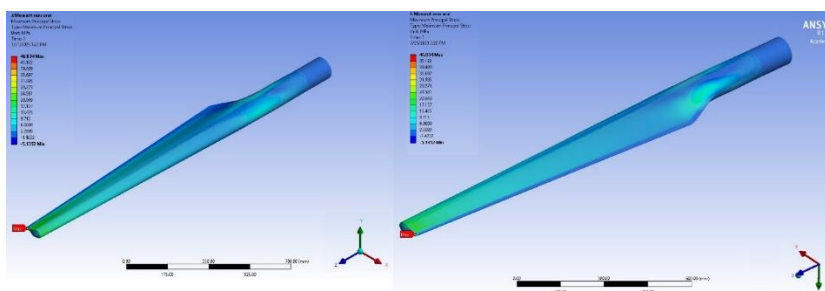


Fig. 4.11 Distribuția tensiunilor principale maxime intrados-extrados și extrados-intrados

4.4 Cazul 3: Analiza cu elemente finite la solicitarea de răsucire (sens antiorar) ($M_t = 170660.646$ Nmm)

În figura 4.12 se prezintă starea de încărcare care este realizată prin încastrarea butucului și aplicarea unei momente de torsiune de $M_t = 170660.646$ Nmm în sensul antiorar, așa cum ne uităm dinspre capătul liber al palei.

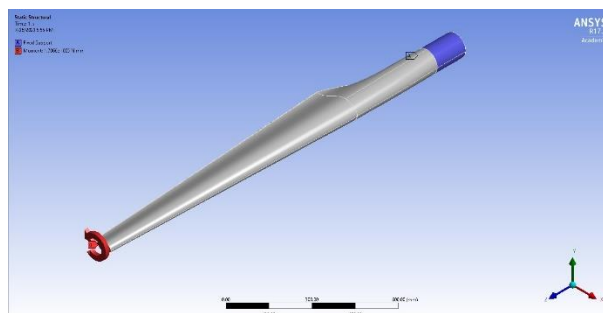


Fig. 4.12 Starea de încărcare la solicitarea de răsucire (sens antiorar)

Distribuția tensiunilor von Mises

În figura 4.13 se prezintă distribuția tensiunilor von Mises, $\sigma_{ech\ max} = 49,15\text{ MPa}$. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea echivalentă von Mises maximă: X: -59,99mm; Y: -59,99; Z=1730,83mm. Același punct obținut și la sens orar și aceeași valoare a tensiunii echivalente von Mises maxime.

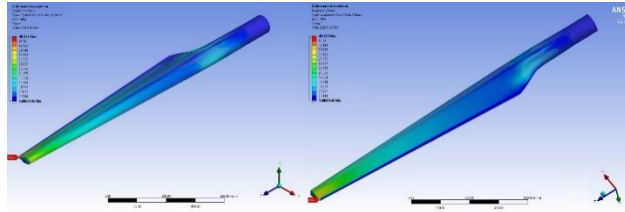


Fig. 4.13 Distribuția tensiunilor von Mises - vedere izometrică intrados-extrados și extrados-intrados

Distribuția tensiunilor principale maxime

În figura 4.14 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1\ max} = 46,81\text{ MPa}$. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea principală maximă: X: -54,79mm; Y: -1,16mm; Z=1729,83mm.

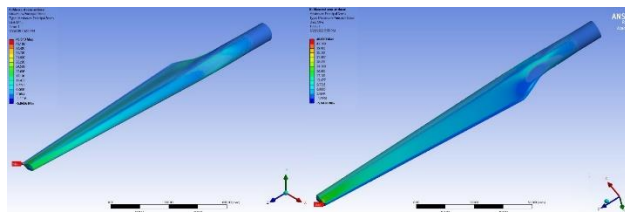


Fig. 4.14 Distribuția tensiunilor principale maxime vedere izometrică intrados-extrados și extrados-intrados

4.5 Cazul 4: Analiza cu elemente finite la solicitarea compusă (încovoiere + răsucire sens orar) (F=1000N + Mt= -170660.646 Nmm)

În figura 4.15 se prezintă starea de încărcare care este realizată prin încastrarea butucului și aplicarea unei forțe de 1000 N pe direcția intrados-extrados pe suprafața de la vârful palei și a unui moment de torsiune $M_t = -170660.646$ în sens orar.

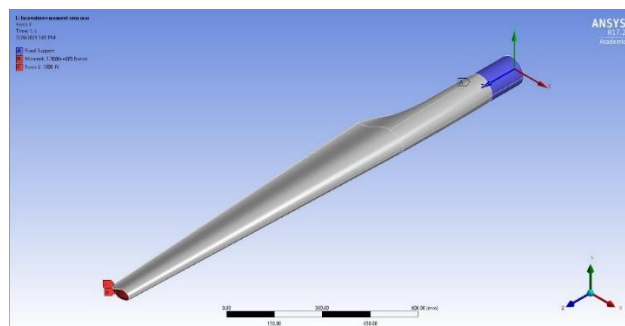


Fig. 4.15 Starea de încărcare la solicitare compusă

Distribuția tensiunilor von Mises

În figura 4.16 se prezintă distribuția tensiunilor von Mises, $\sigma_{ech\ max} = 73.05\text{ MPa}$. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea echivalentă von Mises maximă: X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm.

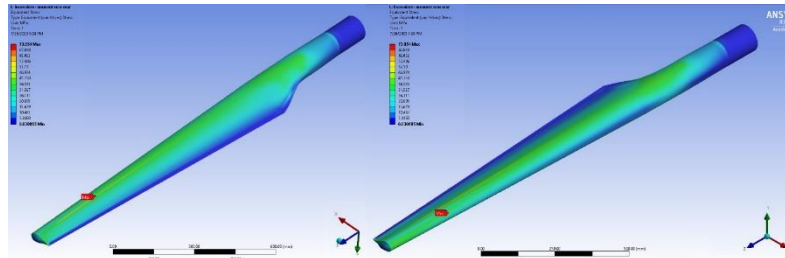


Fig. 4.16 Distribuția tensiunilor von Mises vedere extrados-intrados și intrados-extrados

Distribuția tensiunilor principale maxime

În figura 4.17 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1\ max} = 60.30\text{ MPa}$. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea principală maximă: X: -7,42mm; Y: 18,43mm; Z=1507,13mm.

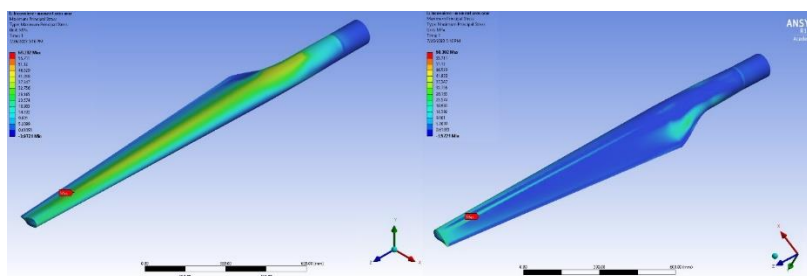


Fig. 4.17 Distribuția tensiunilor principale maxime vedere izometrică intrados-extrados și extrados-intrados

4.6 Cazul 5: Analiza cu elemente finite la solicitarea compusă (încovoiere + răsucire sens antiorar (F=-1000N + Mt= 170660.646 Nmm))

În figura 4.18 se prezintă starea de încărcare care este realizată prin încastrarea butucului și aplicarea unei forțe de -1000 N pe direcția intrados-extrados pe suprafața de la vârful palei și a unui moment de torsiune Mt= 170660.646 în sens antiorar.

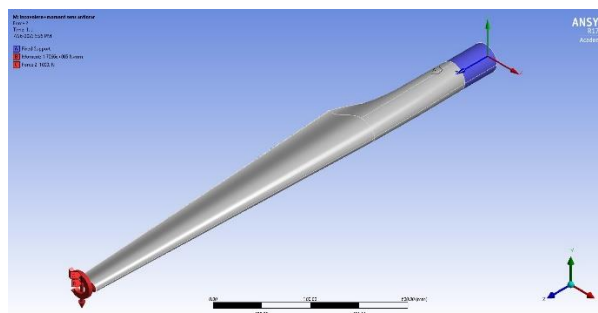


Fig. 4.18 Starea de încărcare la solicitarea compusă

Distribuția tensiunilor von Mises

În figura 4.19 se prezintă distribuția tensiunilor von Mises, $\sigma_{ech\ max} = 67,07\text{ MPa}$. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea echivalentă von Mises maximă: X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm. La simulările numerice compuse (încovoiere + răsucire) tensiunea echivalentă maximă apare în același punct, fiind cu valori diferite

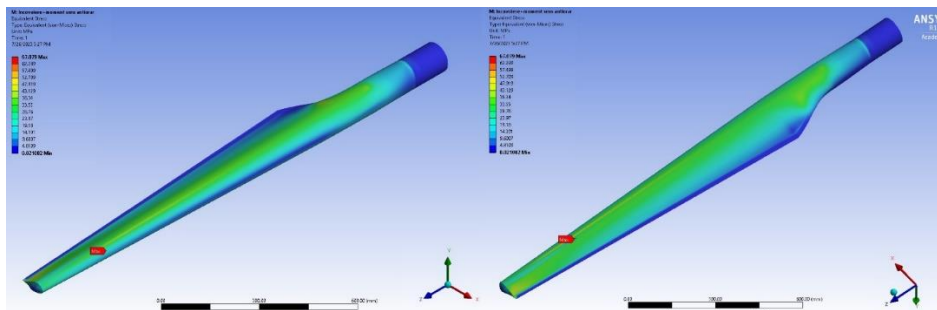


Fig. 4.19 Distribuția tensiunilor von Mises - vedere izometrică intrados-extrados și extrados-intrados

Tensiunile principale maxime

În figura 4.20 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_1\ max = 52,07\text{ MPa}$. Coordonatele punctului în care a apărut tensiunea principală maximă: X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm.

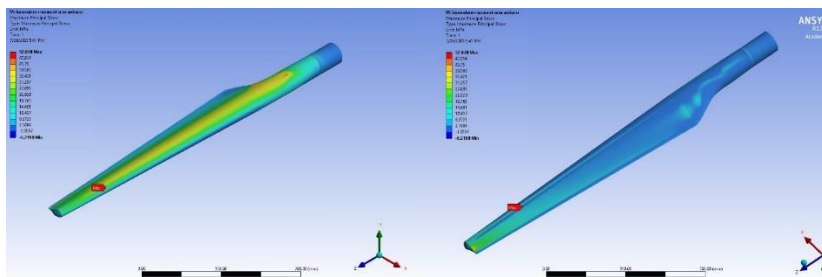


Fig. 4.20 Distribuția tensiunilor principale maxime intrados-extrados și extrados -intrados

În tabelul 4.1 s-au centralizat, atât distribuția tensiunilor echivalente von Mises cât și tensiunea principală maximă pentru cele cinci cazuri de solicitări.

Tabel 4. 1 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises și tensiunea principală maximă

Nt.crt	Caz studiat	$\sigma_{ech\ max}$	$\sigma_1\ max$
1	Încovoiere F=1000N	60,318 MPa X: -6,282 mm, Y: -14,13 mm, Z:1425,93 mm	41,83 MPa X: -5,729mm, Y: 23,85 mm, Z: 1254,23 mm
2	Răsucire sens orar Mt= -170660,646 Nmm	49,15 MPa X: -59,99mm; Y: -3,03mm; Z=1730,83mm	46,83 MPa X: -54,79mm; Y: -3,74mm; Z=1729,83mm
3	Răsucire sens antiorar Mt=170660,646 Nmm	49,15 MPa	46,81 MPa

		X: -59,99mm; Y: -3,03mm; Z=1730,83mm	X: -54,79mm; Y: -1,16mm; Z=1729,83mm
4	Încovoiere + răsucire sens orar F=1000N + Mt=-170660,646 Nmm	73,05 MPa X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm	60,30 MPa X: -7,42mm; Y: 18,43mm; Z=1507,13mm
5	Încovoiere + răsucire sens antiorar F=1000N + Mt= 170660,646 Nmm	67,07 MPa X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm	52,07 MPa X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm

4.9 Concluzii generale la capitolul 4

1. Analiza cu elemente finite a palei de turbină eoliană a fost realizată pe cinci cazuri;
2. Pala a fost încastrată spre butuc iar la vârful palei au fost aplicate forța și momentul de torsiune;
3. Pentru cazul solicitării simple de încovoiere cu aplicarea unei forțe de 1000N la capătul liber al palei s-a obținut o tensiune echivalentă von Mises de 60,31 MPa și o tensiune principală maximă de 41,83MPa care apare pe intradosul palei;
4. Pentru cazul solicitării de răsucire atât în sens orar și antiorar, valorile maxime ale tensiunilor obținute sunt aproximativ aceleași, variațiile tensiunilor fiind similare;
5. Cea mai mare valoare pentru tensiunea echivalentă von Mises se obține în cazul solicitării compuse încovoiere și răsucire sens orar de 73,05 MPa, unde coordonatele punctului în care a apărut tensiunea echivalentă von Mises maximă au fost X: -6,29mm; Y: -20,46mm; Z=1423,93mm. La aceleași coordonate apare și tensiunea echivalentă von Mises , dar în sens antiorar;
6. Tensiunea echivalentă von Mises în cazul solicitării compuse încovoiere și răsucire sens antiorar este de 67,07 MPa.

CAPITOLUL 5. CONCEPEREA, PROIECTAREA ȘI REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL DE TESTARE LA SOLICITARE COMPUSĂ

5.1 Scopul proiectării și realizării standului experimental

Scopul principal al tezei a urmărit, în final, conceperea și dezvoltarea unui stand experimental prin care o pală de turbină eoliană poate fi supusă la solicitarea compusă de încovoiere și torsiune. Prin intermediul standului se va permite testarea modelelor în condiții de solicitare complexe similare cu cele din exploatare. În raport cu alte standuri similare, noutatea constă din faptul că solicitarea palei va fi compusă din torsiune și încovoiere, acestea putându-se aplica individual și simultan.

O parte din costurile de realizare ale standului au fost suportate prin proiectul de sprijinire a finalizării tezelor de doctorat din cadrul TUIASI, competiție organizată în cadrul proiectului RANKup, CNFIS-FDI-2021-0354/ VP -grant intern nr.11/2021, tema proiect : *Evaluarea comportamentului palelor de turbină eoliană supuse la solicitări compuse*, **autorul fiind coordonatorul acestui proiect.**

5.2 Descrierea standului

În vederea testării palei la solicitări statice simple (încovoiere, respectiv torsiune) și compuse (încovoiere cu torsiune) s-a conceput, proiectat și construit standul din figura 5.1. Pala 1 este montată pe cadrul metalic 2. Cadrul este fixat în pardoseală și confecționat din profil 40x40mm. Pala este încastrată în lagărul 3 având montat la capătul liber blocul de prindere 4, care este acționat de subansamblul bloc de actuator 5, comanda făcându-se de la panoul de comandă 6, care conține circuitele electronice. În figura 5.2 se prezintă imaginea reală a standului. În anexa 1 se prezintă desenul de ansamblu, cu cotele de gabarit ale standului.

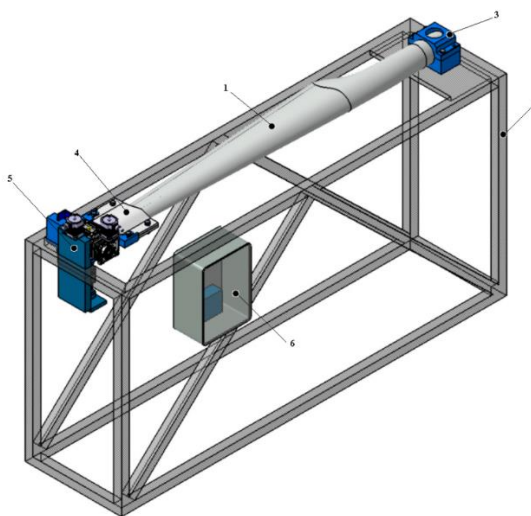


Fig. 5.1 Desen 3D al standului experimental pentru testarea palei

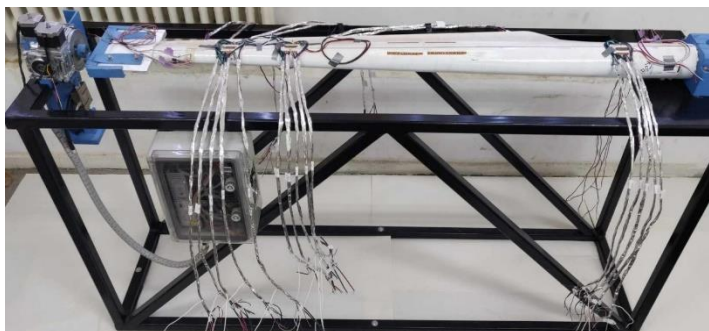


Fig. 5.2 Imagine reală a standului experimental pentru testarea palei

În figura 5.3 se prezintă o vedere de la vârful palei, cu sistemele de acționare. Vârful palei 1 este prins în blocul de fixare 4 care are la capătul liber un ax cu pană. Prin intermediul cuplajului 7 (cilindru cu canal de pană), al raportorului pentru măsurarea unghiului 8 și al celor 2 reductoare 10 prinse între ele cu cuplajul 11, blocul de fixare 4, odată cu întreaga pală, este antrenat în mișcare de translație sau de rotație de motoarele pas cu pas, 9 și 13. De reductorul 10 este fixat profilul 15 care, împreună cu suportul de translație 12 (care este fixat de cadrul 2) formează un ghidaj care împiedică rotirea celor 2 reductoare 10 și a motorului 9. Subansamblul format din reperatele 7, 8, 9, 10 și 11 poate culisa pe verticală în ghidajul 14, acționarea fiind făcută cu motorul pas cu pas 13. În figura 5.4 se prezintă imaginea reală spre vârful palei.

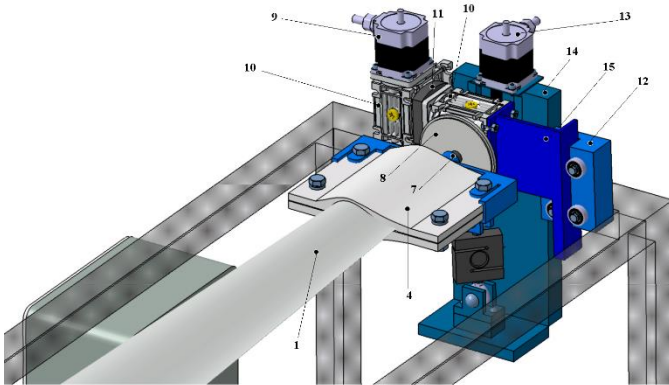


Fig. 5.3 Vedere 3D spre vârful palei

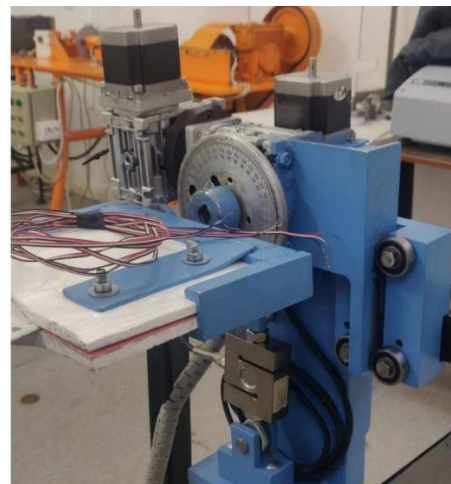


Fig. 5.4 Imagine reală spre vârful palei

În figura 5.5 se prezintă o vedere cu sistemul de măsurare al forței. Doza tensometrică 15 este fixată de batiu și la subansamblul care culisează în ghidajul 14, prin intermediul ochetilor cu articulație sferică 16, a furcilor 17 și al bolțurilor 18. În anexa 2 se prezintă sistemul de măsurare, cu cotele de gabarit.

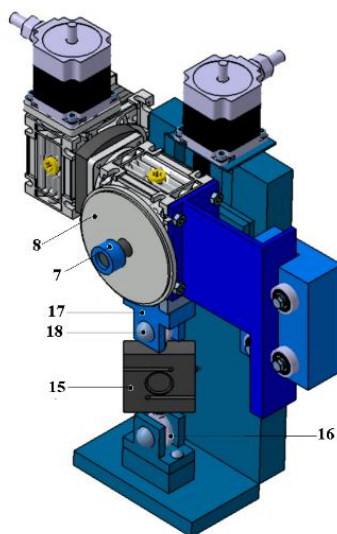


Fig. 5.4 Sistemul de măsurare al forței

5.3 Descrierea funcționării standului

Încovoierea se realizează prin acționarea motorului pas cu pas 13 care rotește șurubul conducător și prin intermediul unei piulițe din componența ghidajului 14 transformă mișcarea de rotație în mișcare de translație. Săgeata la vârful palei, în vederea trasării caracteristicii forță-deplasare, este măsurată cu ajutorul unui senzor de deplasare. Trasarea caracteristicii forță- deplasare se face prin introducerea la vârful palei a unor greutăți calibrate, prin pași, măsurându-se de fiecare dată deplasarea vârfului palei. *Torsiunea* se realizează prin acționarea motorului pas cu pas 9 și a celor două reductoare 10, a căror rotire față de batiu este împiedicată de profilul 15 care culisează în suportul de translație 12, prin intermediul a patru rulmenți. Prin intermediul cuplajului 7 pala este supusă la torsiune. Unghiul în vederea trasării caracteristicii moment de torsiune-rotire este citit cu ajutorul raportorului 8 dar și cu ajutorul unui raportor digital montat pe tija ce constituie brațul momentului de torsiune introdus prin intermediul unor greutăți calibrate. *Încovoierea cu torsiune* se realizează prin acționarea simultană a motoarelor pas cu pas 9 și 13. Pentru realizarea acestui lucru s-a apelat la platforma de dezvoltare Arduino ce este aplicabilă pentru routere CNC și imprimante 3D. S-a constatat că, această platformă open source construită pe baza plăcii de dezvoltare Arduino Uno, permite, la costuri mici, materializarea echipamentului electric de încovoiere și răsucire propus. Utilizând placa Arduino Uno care este conectată la driverele de motoare, conform circuitului electric din figura 5.6, comandată de către laptop prin programul EstlCam, s-a adaptat un program CNC ce va putea efectua operația de răsucire și încovoiere controlată. În figura 5.7 se poate vedea modul de amplasare a celor trei drivere, sursa de tensiune și placa Arduino Uno.

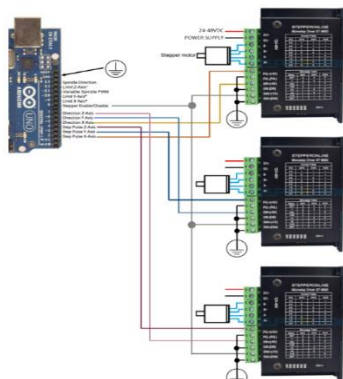


Fig.5.5 Circuitul electric



Fig.5.6 Amplasarea sistemelor electrice

5.4 Concluzii generale la capitolul 5

1. Proiectarea și execuția standului experimental de testare pentru desfășurarea activităților de cercetare experimentală în domeniul palelor de turbină eoliene a avut ca scop determinarea tensiunilor și deformațiilor introduse prin solicitările exterioare de încovoiere, de torsiune și de solicitare compusă de încovoiere cu torsiune;
2. Soluția constructivă este optimă din punct de vedere al funcționalității și fiabilității;
3. Modul de aplicare a deplasării, atât la încărcare și descărcare pentru solicitările amintite, este unul precis.

CAPITOLUL 6. REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND TESTAREA PALEI LA SOLICITARE COMPUSĂ

6.1 Standul experimental și senzorii utilizați

În cadrul acestui capitol se prezintă testele efectuate pe o pală de turbină eoliană, realizată la scara 1:10, confecționată din GFRP.

Pentru a avea atât solicitări simple cât și complexe ale palei, s-a conceput, proiectat și realizat standul prezentat în capitolul 5.

Pe pală au fost montate patru rozete electro-tensometrice rezistive, de tipul C2A-06-062WW-350, fabricate de Micro-Measurements, cu cabluri preatașate, fiecare având câte trei grile, ca în figura 6.1.

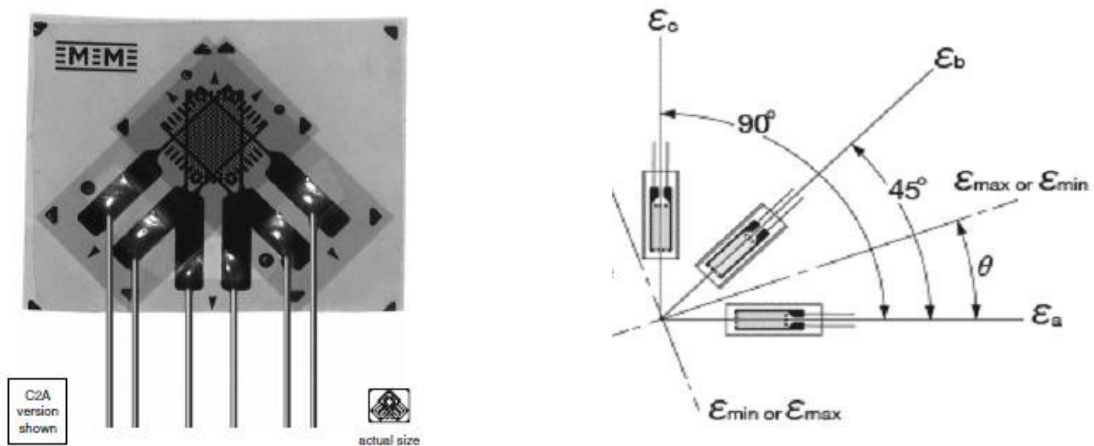


Fig.6.1 Rozetă tensometrică rectangulară cu trei grile suprapuse (a); notațiile folosite în cadrul tezei (b) www.micro-measurements.com: General Purpose Strain Gages—Stacked Rosette, 062WW

Traductoarele au fost aplicate în două secțiuni: secțiunea situată la 1620 mm de capătul de prindere, dincolo de zona butucului de prindere (traductoarele T1 și T2) și secțiunea situată la 230mm de vârful palei (T3, T4), figura 6.2.

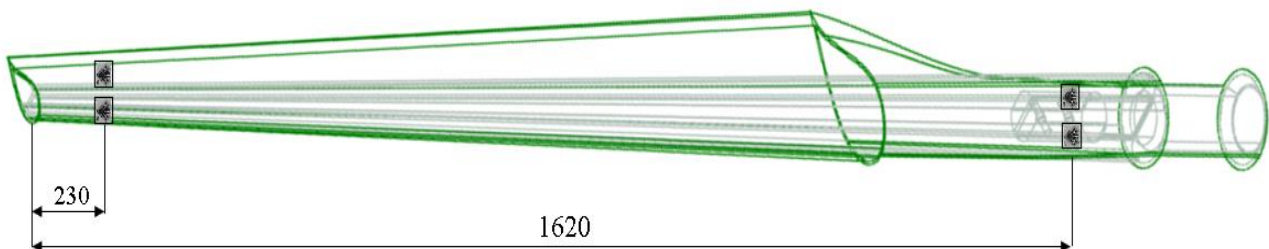


Fig. 6.2 Imagine de ansamblu a amplasării traductoarelor rectangulare

În figura 6.3 se prezintă, în detaliu și în secțiune, modul de amplasare al celor 4 traductoare.

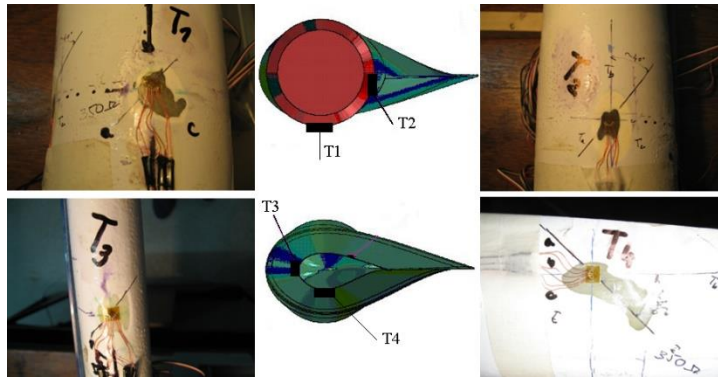


Fig. 6.3 Detalii de amplasare a traductoarelor T1,T2,T3 și T4 pe pală

Achiziția de deformații de la cele 4 traductoare a fost realizată cu punțile tensometrice Vishay P3, figura 6.4. Au fost necesare 12 canale de achiziție iar tipul de montaj utilizat a fost în sfert de punte Wheastone.



Fig. 6.4Puntea tensometrică Vishay P3

Alte patru lanțuri tensometrice de tip 4/120 KY31, fabricate de HBM, figura 6.5, fiecare având câte cinci rozete a câte trei grile fiecare poziționate la $0^\circ/60^\circ/120^\circ$, au fost montate pe pală, în zone de interes, identificate în urma AEF.

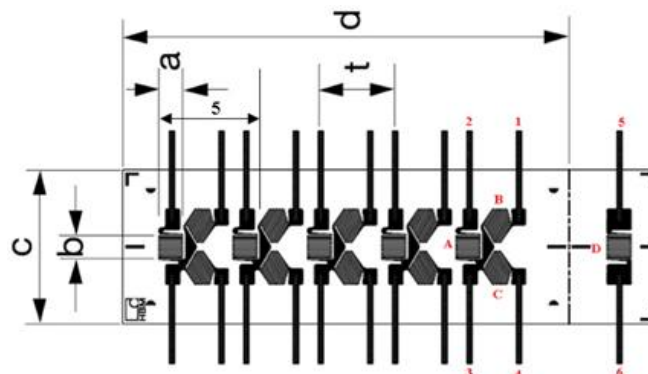


Fig. 6.5 Lanțul tensometric cu 5 rozete tensometrice delta, notarea grilelor și a filamentelor

Lanțurile tensometrice au fost aplicate în două secțiuni: lanțurile 1, 2 și 3 au fost amplasate pe intradosul palei iar lanțul 4 pe extradossul palei, figura 6.6.

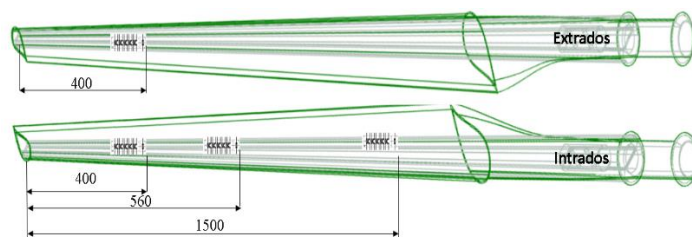


Fig. 6.6 Imagine de ansamblu a amplasării lanțurilor tensometrice pe extrados și intrados

În figura 6.7 se prezintă, în detaliu, modul de amplasare a celor 4 lanțuri tensometrice.

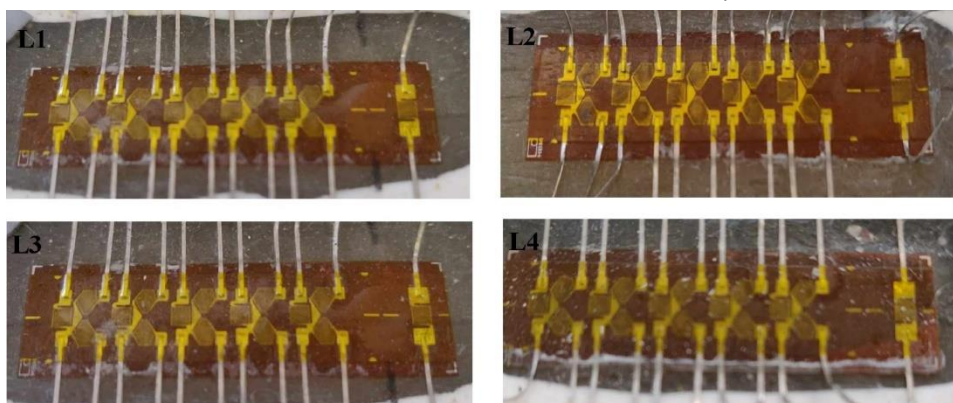


Fig. 6.7 Detalii de amplasare a lanțurilor tensometrice pe pală

Achiziția de deformații de la cele 4 lanțuri (20 de traductoare electrice x 3 mărci pe fiecare traductor) a fost realizată cu 4 sisteme de achiziție de date de tip QUANTUM HBM MX1615B, figura 6.8.



Fig. 6.8 Sistemul de achiziție QUANTUM HBM MX1615B

Măsurătorile s-au realizat în regim dinamic, cu o valoare a frecvenței de eșantionare de 20 Hz, iar conexiunea din interfața software-ului a fost de tipul “sg 3 wire 120”. Prin intermediul cablurilor de conexiune și a unui laptop cu sistem de achiziție de date Catman – AP, figura 6.9, s-au putut înregistra deformațiile. În anexa 3 se poate vedea un exemplu privind interfața cu deformațiile înregistrate pentru fiecare tip de solicitare, care, ulterior, au fost importate în Excel.

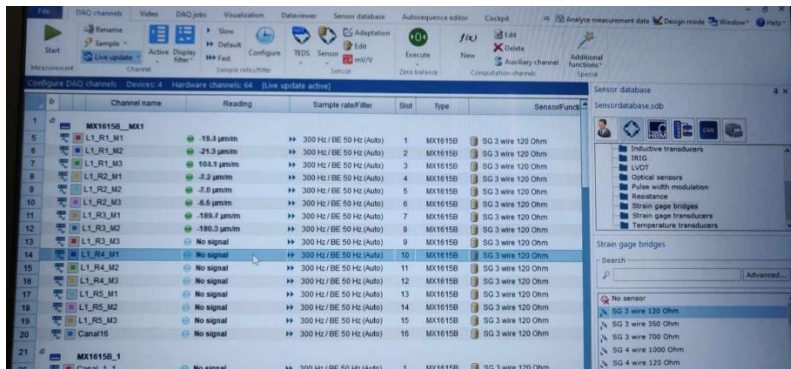


Fig. 6.9 Interfața sistemului de achiziție de date Catman – AP

Grilele rozetelor de tipul C2A-06-062WW-350, la lipirea pe pală au fost orientate astfel: grila b a rozetelor a fost orientată după axa palei, iar grilele a și c, la 90° una față de alta, ca în figura 6.1. Cu ajutorul acestor rozete au fost determinate tensiunile principale și direcțiile acestora din centrul lor.

Lanțurile de rozete de tipul 4/120 KY31, la lipirea pe pală, au fost orientate astfel: grila A paralelă cu axa palei, iar grilele C și B orientate la 120° una față de alta, ca în figura 6.5. Cu ajutorul acestor lanțuri de rozete au fost determinate tensiunile principale și direcțiile acestora din centrele lor, precum și variația acestora (gradientul) pe lungimea lanțului.

În figura 6.10 se prezintă standul experimental în timpul testării și preluării deformațiilor.



Fig. 6.10 Standul experimental în timpul testării palei de turbină eoliană

6.2 Tensometria electrică rezistivă

Tensometria electrică rezistivă se bazează pe fenomenul modificării rezistenței electrice a conductoarelor, atunci când sunt supuse la tracțiune sau compresiune. Relația de bază a tensometriei electrice rezistive este:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

unde:

- R este rezistența electrică inițială a conductorului (traductorului), în stare netensionată;

- ΔR reprezintă variația rezistenței traductorului (mărcii tensometrice), produsă ca urmare a tensionării acestuia;
- ϵ este alungirea specifică medie de sub grila traductorului;
- k este factorul mărcii tensometrie, indicat de producător.

Deoarece variația rezistenței ΔR este foarte mică, de circa $0,00024 \Omega/\mu\epsilon$, pentru mărirea preciziei măsurărilor mărcile tensometrice se montează în punte Wheatstone. Montarea traductoarelor în punte poate fi făcută într-una dintre variantele:

-în sfert de punte, figura 6.11a, când doar în unul dintre cele patru brațe ale punții este montată o marcă tensometrică;

-în semipunte, figura 6.11b, când în două brațe sunt montate mărci tensometrice;

-în punte completă, figura 6.11c, caz în care câte o marcă tensometrică este montată în fiecare braț al punții.

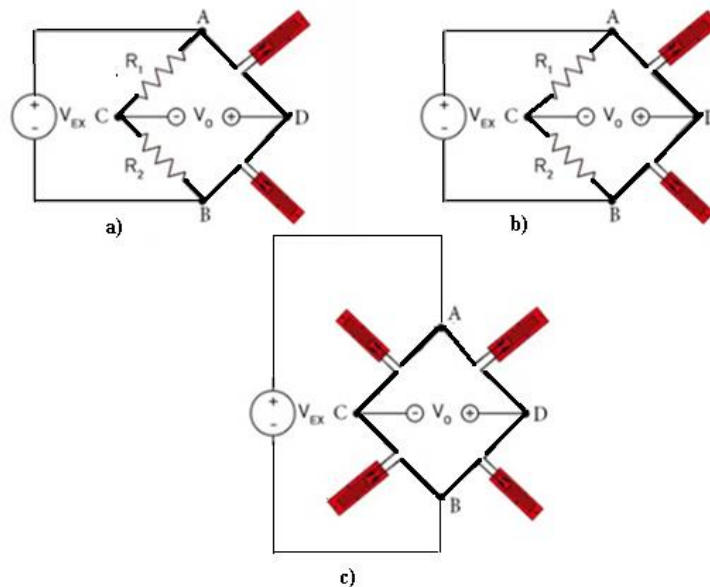


Fig. 6.11 Montarea traductoarelor în punte: a) sfert de punte; b) semipunte; c) punte completă

Datorită numărului mare de traductoare și cabluri, s-a optat pentru montajul în sfert de punte, din considerente practice. Deși acest montaj nu asigură compensarea erorilor introduse de variațiile temperaturii pe durata măsurărilor decât într-un interval limitat de temperatură, totuși precizia rezultatelor experimentale nu a fost afectată semnificativ, din următoarele motive, figura 6.12:

- determinările s-au făcut la temperatura de circa 20°C , temperatura de referință pentru stabilirea erorilor de acest tip;
- pe durata încercărilor temperatura a avut variații de doar $\pm 1^\circ\text{C}$

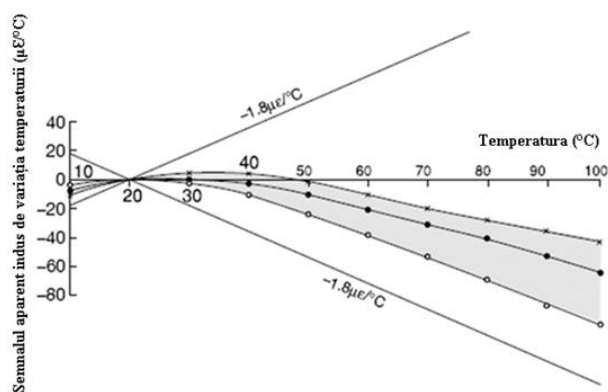


Fig. 6.12 Semnalul aparent indus de variația temperaturii pe durata măsurărilor (zona gri cuprinde determinările experimentale efectuate cu diferite tipuri de mărci tensometrice)

-figură preluată de la Micro Measurements (grupul Vishay)

6.3 Determinarea tensiunilor și deformațiilor pe pala de turbină eoliană

Pentru determinarea tensiunilor principale și a direcțiilor principale la măsurări cu **trductoare rectangulare** din figura 6.1, s-a utilizat *metoda indirectă*, recomandată de Micro Measurements Vishay, care implică parcurgerea următoarelor etape:

- Pornind de la relațiile clasice de variație a deformațiilor în jurul unui punct (pentru materiale ortotrope), se obțin deformațiile pe direcțiile principale ale materialului compozit:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} [\varepsilon_a + \varepsilon_b + \sqrt{2(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}] \quad (1)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} [\varepsilon_a + \varepsilon_b - \sqrt{2(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}] \quad (2)$$

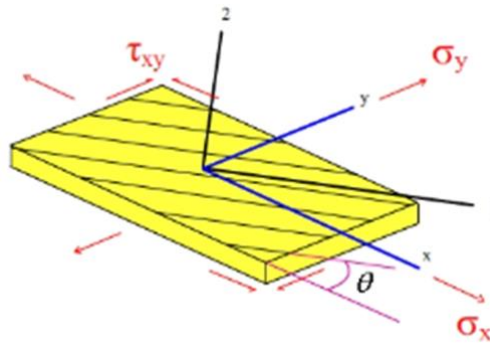
$$\gamma_{xy} = \sqrt{2(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{xx}m^2 + \varepsilon_{yy}n^2 + 2\gamma_{xy}mn \quad (4)$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{xx}n^2 + \varepsilon_{yy}m^2 - 2\gamma_{xy}mn \quad (5)$$

$$\gamma_{12} = (-\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})mn + \gamma_{xy}(m^2 - n^2) \quad (6)$$

unde deformațiile ε_{xx} , ε_{yy} și γ_{xy} au fost calculate pe baza mărimilor măsurate ε_a , ε_b și ε_c iar m și n sunt: $m=\cos\Theta$; $n=\sin\Theta$, unde Θ este unghiul dintre direcția de solicitare și direcția principală de armare.



- Cu ajutorul relațiilor tensiuni-deformații se calculează tensiunile pe axele principale ale materialului

$$\sigma_{11} = \frac{E_{11}(\varepsilon_{11} + \nu_{21}\varepsilon_{22})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (7)$$

$$\sigma_{22} = \frac{E_{22}(\nu_{12}\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (8)$$

$$\tau_{12} = G_{12}\gamma_{12} \quad (9)$$

Unde $E_{11} = 21337$ MPa, $E_{22} = 18711$ MPa, $\nu_{12} = 0,10$, $\nu_{21} = 0,09$ și $G_{12} = 7824$ MPa **au fost determinate și prezentate în capitolul 2.**

- Se calculează tensiunile principale $\sigma_p = \max$, $\sigma_q = \min$ și direcțiile acestora unghiul α

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \tau_{12}^2} \quad (10)$$

$$\sigma_q = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \tau_{12}^2} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg^{-1} \frac{2\tau_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} \quad (12)$$

Unghiul direcției deformației principale maxime, θ ,

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right] \quad (13)$$

Pentru determinarea unghiului direcției deformației principale maxime, θ , se fac următoarele precizări:

- valoarea unghiului determinat cu ajutorul relației (13) este în radiani și trebuie transformat în grade;
- în funcție de semnul numărătorului și al numitorului fracției din relația (13), pentru calculul final al unghiului direcției deformației principale maxime se calculează cu una din următoarele relații:
 - Dacă Numărătorul ≥ 0 și Numitorul > 0 atunci

$$\varphi = |\theta|$$

- Dacă Numărătorul > 0 și Numitorul ≤ 0 atunci

$$\varphi = 90 - |\theta|$$

- Dacă Numărătorul ≤ 0 și Numitorul < 0 atunci

$$\varphi = 90 + |\theta|$$

- Dacă Numărătorul < 0 și Numitorul ≥ 0 atunci

$$\varphi = 180 - |\theta|$$

Pentru **rozeta delta** din figura 6.5, deformațiile ε_{xx} , ε_{yy} și γ_{xy} vor fi calculate pe baza mărimilor măsurate ε_a , ε_b și ε_c , dar cu alte formule față de cele prezentate mai sus:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} + \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{2}\right)^2} + \frac{1}{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2 \quad (14)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} - \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{2}\right)^2} + \frac{1}{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2 \quad (15)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2}{\sqrt{3}}(\varepsilon_b - \varepsilon_c) \quad (16)$$

Calculule se continuă ca mai sus: se determină ε_{11} , ε_{22} și γ_{12} , apoi σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , după care σ_p , σ_q și Θ .

6.4 Calibrarea cu greutateți la solicitarea de încovoiere și răsucire

Înainte testelor la solicitări simple și compuse efectuate cu sistemul de automatizare s-a recurs la o calibrare cu greutateți.

Scopul calibrărilor a fost determinarea caracteristicilor forță – deplasare și moment de torsiune – rotire pe baza utilizării de greutateți calibrate. Pe de altă parte, la introducerea unor astfel de greutateți din care rezultă forța la capătul liber (ce produce momentul de încovoiere) și momentul de torsiune am avut o imagine asupra a două valori: valoarea maximă a deplasării la vârful palei (săgeata) pentru solicitarea de încovoiere și valoarea maximă a rotirii pentru solicitarea de răsucire.

Valorile obținute în urma calibrării au fost parametri de referință: pentru axa X parametrul a fost unghiul care va fi aplicat la vârful palei iar pentru axa Z parametrul a fost deplasarea care va fi aplicată tot la vârful palei. Acești parametri vor fi fost introduși în programului EstlCam, pentru efectuarea atât a solicitărilor simple cât și a solicitărilor compuse.

Calibrarea cu greutateți pentru încovoiere, se prezintă în figura 6.13. Astfel, cu 1 s-a notat traductorul de deplasare liniar și cu 2 platanul pe care au fost așezate succesiv cele 9 greutateți. În figura 6.14, se observă că vârful traductorului liniar este poziționat în dreptul unde va fi aplicată deplasarea produsă de motorul pas cu pas 13, din figura 5.2.

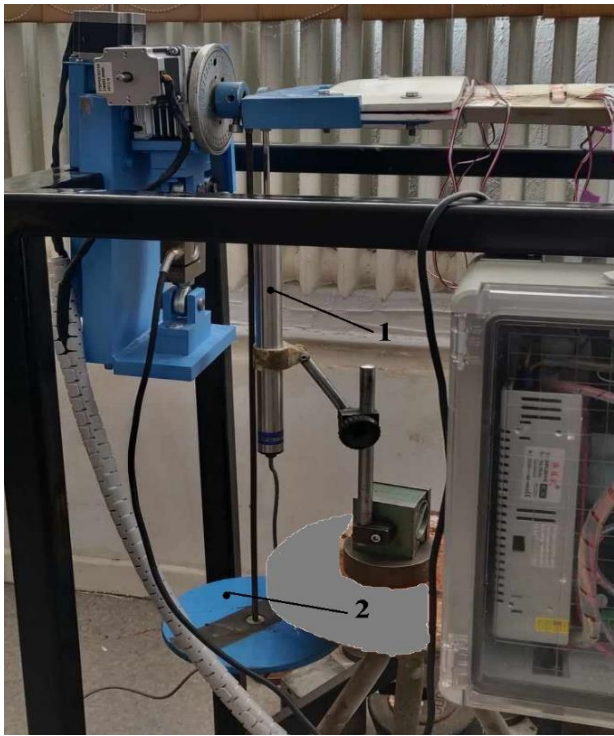


Fig. 6.13 Amplasarea traductorului liniar de deplasare

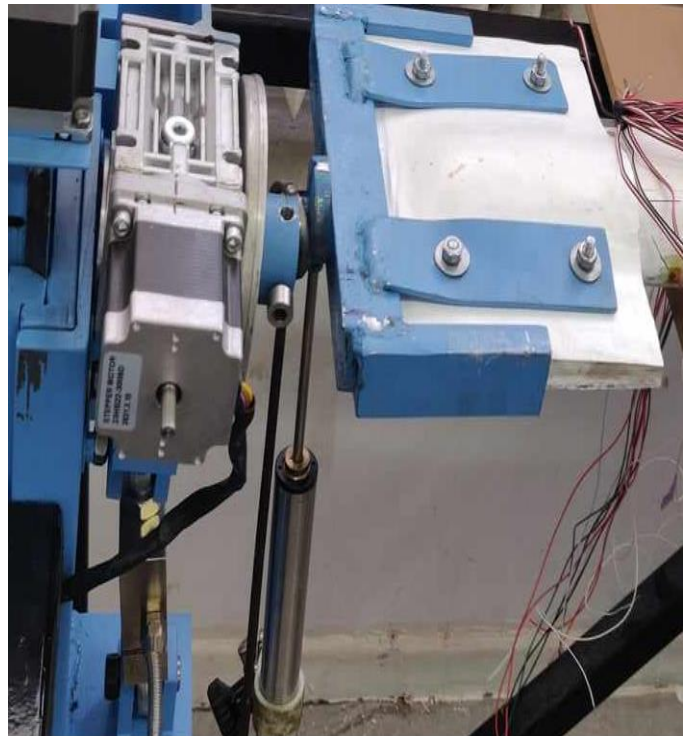


Fig.6.14 Poziționarea traductorului liniar de deplasare

În figura 6.15 s-a trasat dreapta de calibrare forță-deplasare a cărei ecuație este: $y = 5,71 \cdot \text{deplasarea}$. Valoarea maximă adoptată a deplasării pentru solicitarea de încovoiere a fost de 15 mm, pentru o greutate totală de 9,072 kg, tabelul 6.1 Această valoare maximă de 15 mm a fost înmulțită cu 5,71. ceea ce a condus la o forță maximă de aproximativ 86 N.

După această calibrare, valoarea maximă a deplasării de 15 mm pentru solicitarea de încovoiere, va fi introdusă în programul EstlCam pentru toate tipurile de solicitări.

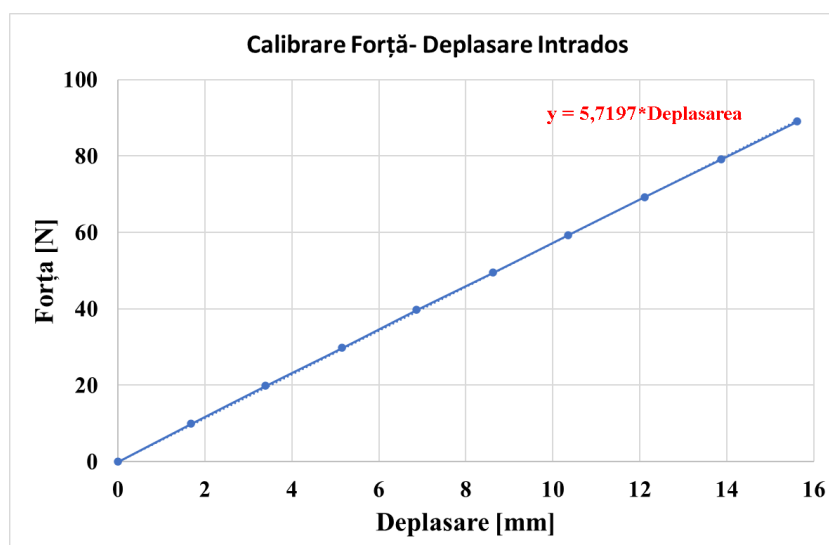


Fig. 6.15 Dreapta de calibrare forță-deplasare

Calibrarea cu greutate pentru răsucire, se prezintă în figura 6.16. Astfel cu 1 s-a notat nivela care a fost poziționată pe brațul echilibrat de greutatele notate cu 2. Cu ajutorul raportorului digital 4 pe care era amplasat un fir cu plumb, a fost posibilă citirea fiecărui unghi, pentru cele 7 greutate care au fost amplasate succesiv pe platanul 4. Pentru ca brațul de încărcare să rămână la orizontală, a fost necesar un braț pe sensul opus de echilibrare a greutății tijei și platanului active.

În figura 6.17 se observă dreapta de calibrare are relația: $y = 14,057 \cdot \text{unghi}$. Valoarea maximă adoptată a unghiului pentru solicitarea de răsucire a fost de 4° , pentru o greutate totală de 7,042 kg, tabelul 6.2. Această valoare a unghiului de 4° a fost înmulțită cu 14,057 ceea ce a condus la un moment de torsiune maxim de aproximativ 56 N·m.

După această calibrare, valoarea maximă a unghiului de 4° pentru solicitarea răsucire va fi introdusă în programul EstlCam pentru toate tipurile de solicitări. În figura 6.17 se prezintă graficul pentru calibrarea la răsucire.

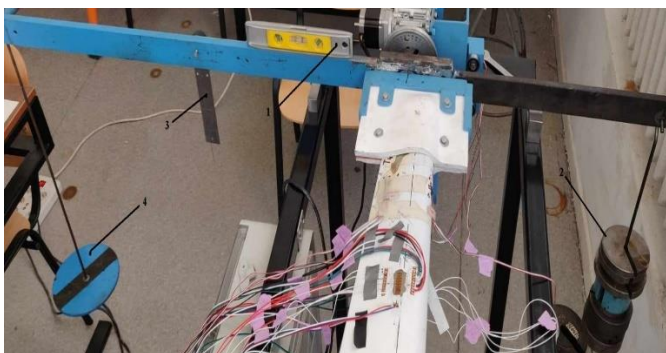


Fig. 6.16 Calibrarea cu greutate pentru răsucire

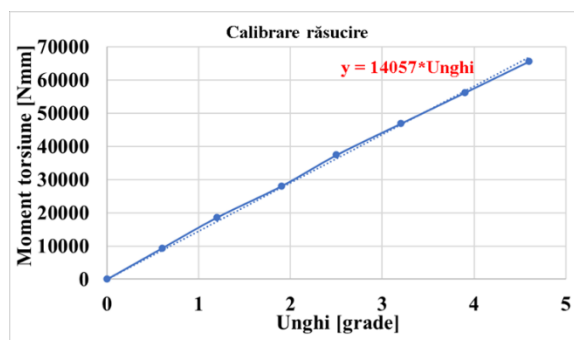


Fig. 6.17 Dreapta de calibrare la răsucire

6.5 Rezultate experimentale obținute pe traductoarele rectangulare

Încărcarea la încovoiere statică s-a efectuat cu ajutorul motorului pas cu pas notat cu 13 în figura 5.2. Acest motor realizează translația vârfului palei inducând o forță perpendiculară pe axa palei ce produce încovoierea acesteia. Pe baza calibrării descrise anterior s-au determinat, pas cu pas, forțele în funcție de deplasările vârfului palei. Momentul încovoietor, de pe axa orizontală din graficele de mai jos, s-a determinat astfel:

$$M_i = F \cdot l_{tr}$$

în care F este forța determinată anterior în raport cu deplasarea vârfului palei iar l_{tr} este distanța de la punctul de încărcare (vârful palei) până la traductorul luat în considerare. Pentru traductoarele 1 și 2 această distanță a fost de 1620 mm iar pentru traductoarele 3 și 4 distanța a fost de 230mm. Achizițiile de date s-au efectuat în ambele sensuri, respectiv, atât la încărcare cât și la descărcare.

Observație: în graficele următoare se va observa o variație oscilantă pentru puncte apropiate din grafic. Se remarcă faptul că încărcarea cu motorul pas cu pas s-a efectuat prin intermediul unui surub conducător. Astfel, la fiecare trecere de la un contact la altul dintre dinții roților dințate există o scădere a momentului de torsiune transmis, ca urmare obținându-se o discontinuitate temporară în deplasarea vârfului palei.

Valoarea maximă a deplasării pentru solicitarea de încovoiere a fost de 15 mm ceea ce, corespunzător cu coeficientul de calibrare obținut anterior a condus la o forță maximă de aprox. 86 N. Valoarea momentului încovoiitor maxim, la capătul cursei, a fost de aprox. 142 N·m. Valoarea maximă a rotirii a fost de 4 grade care a condus la un moment de torsiune maxim de aprox. 56 N·m, calculat pe baza calibrării efectuate anterior cu ajutorul greutăților.

Din figura 6.18, pentru **solicitarea la încovoiere** și tensiunile determinate cu ajutorul traductorului 1, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor, în valoarea absolută, se înregistrează pentru tensiunile minime, valoarea cea mai mare a acestora fiind de aproximativ 7 MPa;
- Valoarea cea mai mare a tensiunii tangențiale maxime a fost de aprox. 2 MPa.

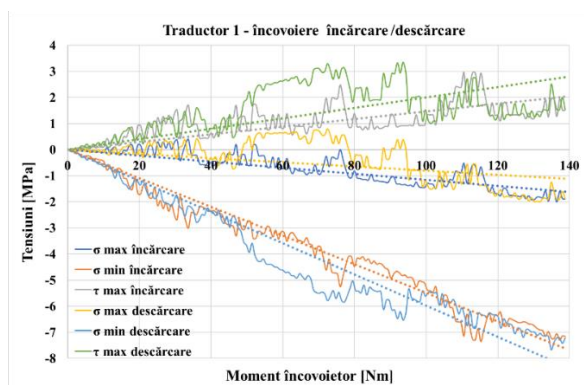


Fig. 6.18 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 1 la solicitarea de încovoiere; încărcare și descărcare.

Din figura 6.19, pentru **solicitarea la răsucire în sens orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente traductorului 1, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor, în valoarea absolută, se înregistrează pentru tensiunile minime, valoarea cea mai mare a acestora fiind de aproximativ 6 MPa iar valoarea cea mai mare a tensiunii normale maxime este de aprox. 2 MPa;
- Valoarea cea mai mare a tensiunii tangențiale maxime a fost de aprox. 3 MPa;

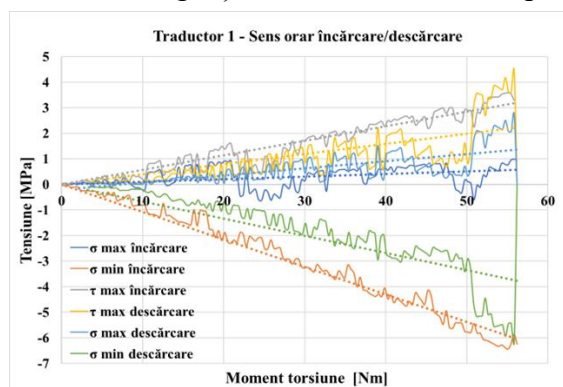


Fig. 6.19 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 1 la solicitarea de răsucire în sens orar; încărcare și descărcare.

Din figura 6.20, pentru **solicitarea la răsucire în sens anti-orar**, se constată următoarele:

- Valorile cele mai mari ale tensiunilor, în valoare absolută, se înregistrează acum pentru tensiunile normale maxime și sunt de aproximativ 6 MPa, față de 3 MPa la sensul orar;
- Tot în valoare absolută tensiunile minime au valori mai mici decât cele obținute pentru solicitarea de răsucire în sens orar, 3 MPa față de 6.5 MPa;

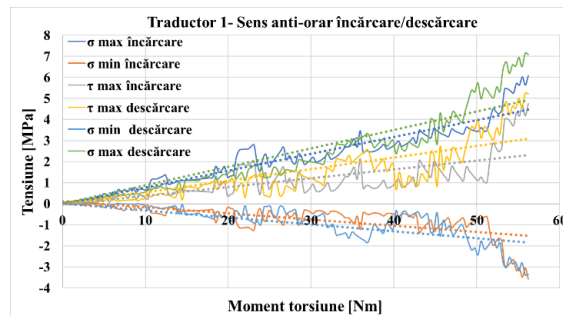


Fig. 6.20 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 1 la solicitarea de răsucire în sens anti-orar; încărcare și descărcare.

În figura 6.21 se prezintă variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 1, atât pentru încărcarea cât și pentru descărcarea la încovoiere + torsiune, în raport cu variația unui moment compus calculat, punct cu punct, cu relația:

$$M_c = \sqrt{M_i^2 + M_t^2}$$

unde:

- M_c este momentul compus ce apare în abscisa graficelor următoare;
- M_i este momentul de încovoiere calculat așa cum s-a arătat în paragraful anterior;
- M_t este momentul de torsiune calculat anterior pe baza procedurii de calibrare.

Din figura 6.21, pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente traductorului 1, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile normale minime (în valoare absolută). Valoarea maximă a acestora este de aprox. 12 MPa, în raport cu valorile de 7 MPa pentru solicitarea de încovoiere și 6 MPa pentru solicitarea de răsucire în sens orar;

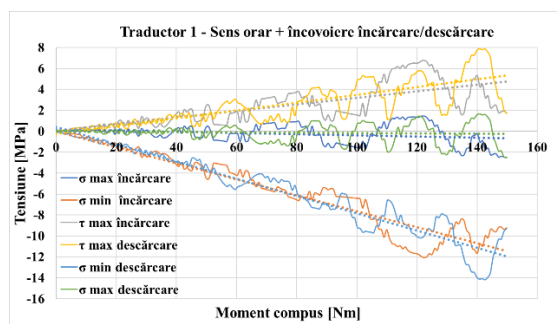


Fig. 6.21 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 1 la solicitarea de răsucire în sens orar; încărcare și descărcare.

Din figura 6.22, pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens anti-orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente traductorului 1, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile normale minime (în valoare absolută). Valoarea maximă a acestora este de aprox. 10 MPa, în raport cu valorile de 7 MPa pentru solicitarea de încovoiere și 6.5 MPa pentru solicitarea de răsucire în sens anti-orar și în raport cu cea mai mare valoare a tensiunii normale principale maxime în cazul solicitării compuse de încovoiere+răsucire **în sens orar** care este de 12 MPa.

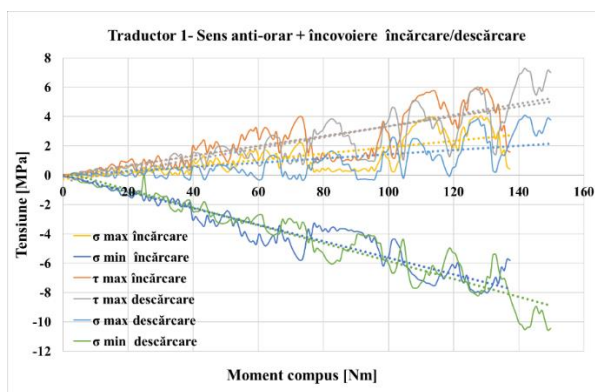


Fig. 6.22 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 1 la solicitarea de răsucire în sens anti-orar; încărcare și descărcare

Din figura 6.23, pentru **solicitarea la încovoiere** și tensiunile determinate cu ajutorul **traductorului 2**, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor, (la $M_i=142 \text{ N}\cdot\text{m}$) în valoarea absolută, se înregistrează pentru tensiunile minime, valoarea cea mai mare a acestora fiind de aproximativ 5 MPa iar valorile tensiunii maxime sunt apropiate de zero ceea ce conduce la concluzia că avem o stare de tensiune monoaxială, cu axa aflată pe direcția tensiunii normale principale maxime.
- Se constată că valoarea maximă a tensiunii (minime) pentru traductorul 2 este mai mică decât cea corespunzătoare pentru traductorul 1 ($\tau_1 = 7 \text{ MPa}$; $\tau_2=5\text{MPa}$);

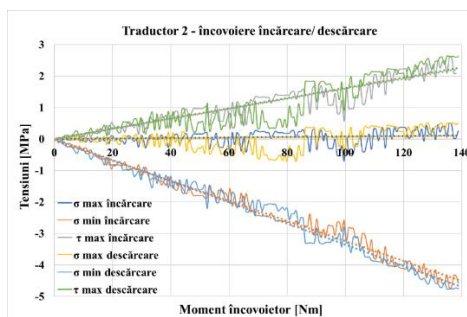


Fig. 6.23 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 2 la solicitarea de încovoiere; încărcare și descărcare

Din figura 6.24, pentru **solicitarea la răsucire în sens orar** și tensiunile determinate cu ajutorul **traductorului 2**, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor, în valoarea absolută, se înregistrează pentru **tensiunile normale minime**, valoarea cea mai mare a acestora fiind de aproximativ 3MPa;
- Valorile cele mai mari (la $M_t=57 \text{ N}\cdot\text{m}$) ale tensiunii maxime sunt de aproximativ 1 MPa. Se constată că valoarea cea mai mare a tensiunii minime pentru traductorul 2 este mai mică decât cea corespunzătoare pentru traductorul 1 ($tr1 = 6 \text{ MPa}$; $tr2=3\text{MPa}$);

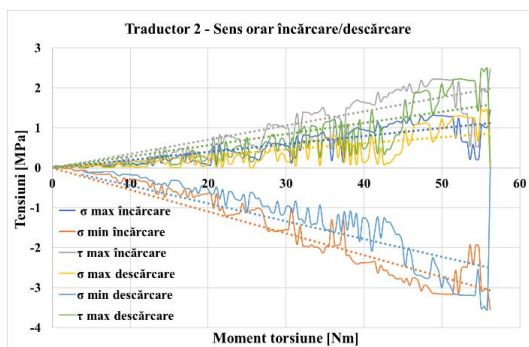


Fig. 6.24 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 2 la solicitarea de răsucire în sens orar; încărcare și descărcare

Din figura 6.25, pentru **solicitarea la răsucire în sens anti-orar**, din datele furnizate de **traductorul 2** și tensiunile calculate, așa cum s-a arătat anterior, se constată următoarele:

- Valorile cele mai mari ale tensiunilor se înregistrează pentru **tensiunile normale maxime** și sunt de aproximativ 3 MPa. Pentru sensul orar valorile cele mai mari ale tensiunilor se înregistrează pentru nu este cea maxima și sunt tot de aprox. 3 MPa;

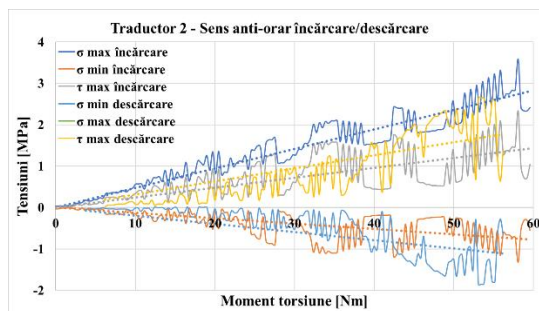


Fig. 6.25 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 2 la solicitarea de răsucire în sens anti-orar; încărcare și descărcare

În figura 6.26, se prezintă variația tensiunilor normale maxime și minime și a tensiunii tangențiale maxime pentru **solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar** a palei, tensiunile fiind calculate cu ajutorul deformațiilor specifice preluate de la **traductorul 2**, aflat la distanța de 1620 mm de capătul palei (zona de aplicare a momentului încovoietor), la distanță mică de așa-zisul plan neutru al secțiunii. Se constată următoarele:

- Tensiunea normală minimă are valoarea de aprox. 6 MPa la rotirea maximă a palei cu 4 grade ($M_t=57 \text{ Nm}$);

- Valorile cele mai mari (la $M_t=57 \text{ N}\cdot\text{m}$) ale tensiunii maxime sunt în jurul valori de 0 MPa. De aici rezultă faptul că, starea de tensiuni normale principale introduse de solicitarea de torsiune conduce la o stare de tensiuni monoaxială, cu axa aflată pe direcția tensiunii normale principale maxime.

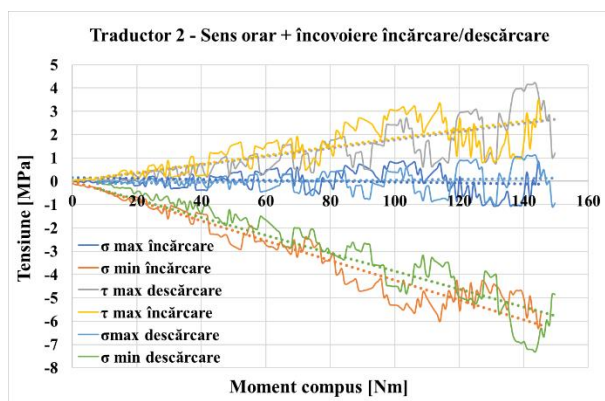


Fig. 6.26 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 2 la solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar; încărcare și descărcare

Din figura 6.27, pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens anti-orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente traductorului 2, se constată următoarele:

- Valorile cele mai mari, la rotirea maximă a palei cu patru grade, se înregistrează pentru tensiunile normale minime (în valoare absolută). Valoarea maximă a acestora este de aprox. 7 MPa, în raport cu cea mai mare valoare a tensiunii normale principale maxime în cazul solicitării compuse de încovoiere+răsucire în sens orar care este de 6 MPa. Ca urmare, pentru traductorul 2 nu se constată diferențe semnificative în ceea ce privește valorile cele mai mari ale tensiunii minime pentru sensurile diferite de rotație ale palei, și, ca urmare, pentru sensurile diferite ale momentului de torsiune.

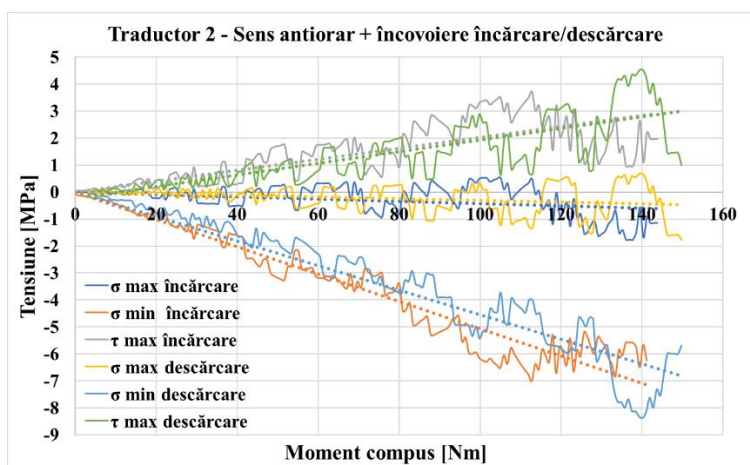


Fig. 6.27 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 2 la solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire în sens anti-orar; încărcare și descărcare

Din figura 6.28, pentru **solicitarea la încovoiere** și tensiunile determinate cu ajutorul **traductorului 3**, se constată următoarele:

- Valoarea cea mai mare (în valoarea absolută) a tensiunilor s-a obținut pentru tensiunea minimă și este de aprox. 4 MPa. Aici trebuie făcută următoarea remarcă: la traductorul 2 pentru care momentul încovoiitor este de 7 ori mai mare aceeași tensiune (având tot cea mai mare valoare) s-a obținut de 5 MPa. Explicația diferenței atât de aici constă în faptul că secțiunea din dreptul traductorului 3 (și 4 – a se vedea în cele ce urmează) a fost mai mică, pala construindu-se, aproximativ ca un **solid de egală rezistență**;

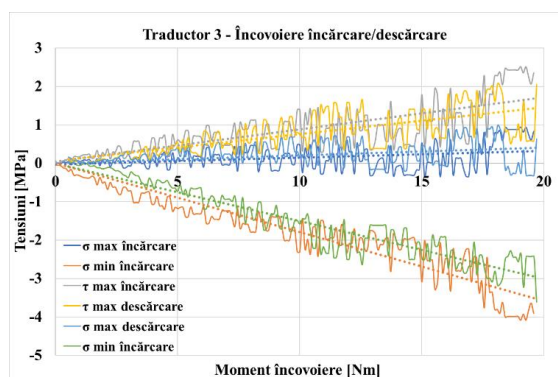


Fig. 6.28 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru **traductorul 3** la solicitarea de **încovoiere**; încărcare și descărcare

Din figura 6.29, pentru **solicitarea la răsucire în sens orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente **traductorului 3**, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor, în valoarea absolută, se înregistrează pentru tensiunile minime, valoarea cea mai mare a acestora fiind de aproximativ 17 MPa. Se remarcă faptul că tensiunile la acest traductor solicitate prin torsiune sunt mai mari decât la traductoarele 1 și 2, solicitate în același mod: **tr. 3 (min)=17 MPa; tr. 2 (min)=3 MPa; tr. 1(min)=6MPa**. Aceste diferențe provin de la secțiunile de mărime și formă diferite existente în cele două locații, momentul maxim de torsiune fiind același (aprox 57 MPa);
- Valoarea cea mai mare a tensiunilor normale maxime este de 8 MPa;

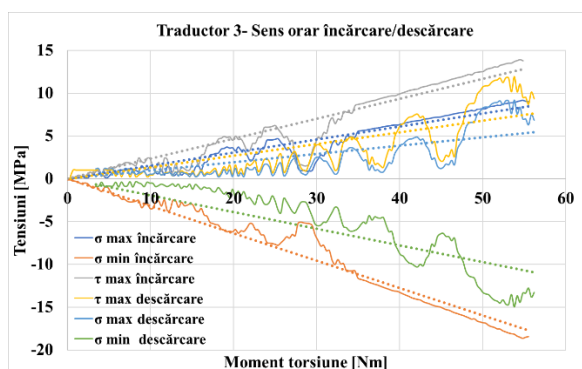


Fig. 6.29 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru **traductorul 3** la solicitarea de **răsucire în sens orar**; încărcare și descărcare

În figura 6.30 se prezintă variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 3, atât pentru încărcarea cât și pentru descărcarea la răsucire, în raport cu variația momentului de torsiune, de la zero la aprox. 58 Nm.

În figura 6.30, se prezintă variațiile tensiunilor normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru **solicitarea la răsucire în sens anti-orar**, calculate cu ajutorul deformațiilor specifice obținute de la mărcile traductorului 3. Se constată următoarele:

- Valorile cele mai mari ale tensiunilor, se înregistrează pentru tensiunile normale minime și sunt de aproximativ 9 MPa, față de 17 MPa la sensul orar. Se constată, așadar, diferențe semnificative în ceea ce privește valorile obținute, pentru aceeași solicitare și același traductor, diferența făcându-se între sensurile de aplicare ale momentului de torsiune;

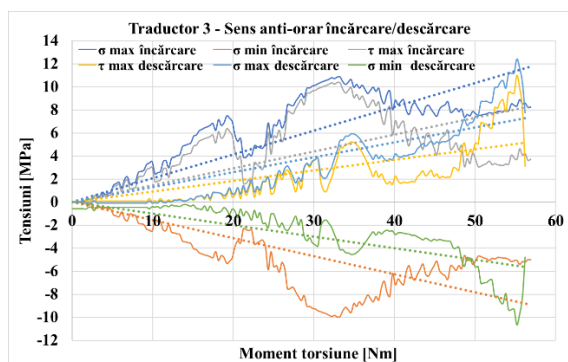


Fig. 6.30 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 3 la solicitarea de răsucire în sens anti-orar; încărcare și descărcare

Din figura 6.31, pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente traductorului 3, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile normale minime (în valoare absolută). Valoarea maximă a acestora este de aprox. 20 MPa, în raport cu valorile de 4 MPa pentru solicitarea de încovoiere și 17 MPa pentru solicitarea de răsucire în sens orar;
- Valorile tensiunilor principale maxime sunt crescătoare, la solicitarea maximă fiind de aprox. 5 MPa

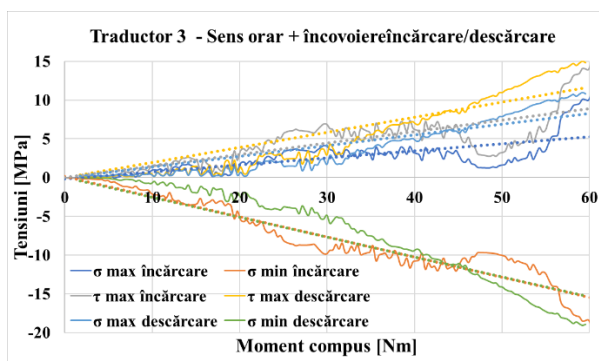


Fig. 6.31 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 3 la solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar; încărcare și descărcare

Din figura 6.32, pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens anti-orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente **traductorului 3**, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile normale maxime. Valoarea maximă a acestora este de aprox. 15 MPa, în raport cu valorile de 0,3 MPa pentru solicitarea de încovoiere și 8 MPa pentru solicitarea de răsucire în sens antiorar și în raport cu cea mai mare valoare a tensiunii normale principale minime în cazul solicitării compuse de încovoiere+răsucire **în sens orar** care este de 20 MPa.

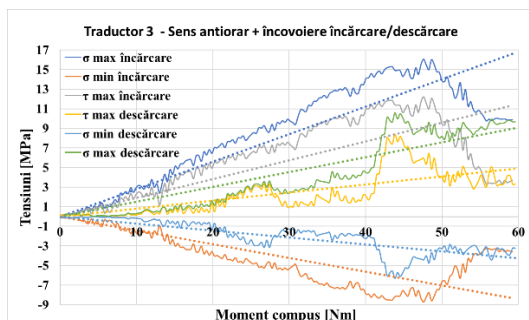


Fig. 6. 32 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru **traductorul 3** la solicitarea **compusă de încovoiere cu răsucire în sens antiorar**; încărcare și descărcare.

Din figura 6.33, pentru **solicitarea la încovoiere** (deplasare cu 15 mm a capătului liber al palei) și tensiunile determinate cu ajutorul **traductorului 4**, se constată următoarele:

- Valoarea cea mai mare (în valoarea absolută) a tensiunilor s-a obținut pentru tensiunea minimă și este de aprox. 3 MPa. La traductorul 3 aceeași valoare a fost de 4MPa. Remarcăm că distanța pe secțiunea verticală dintre traductorul 3 și traductorul 4 este de aprox. 10 mm;
- Valorile tensiunilor maxime sunt oscilante în jurul valorii de zero ceea ce presupune o stare monoaxială de tensiune;

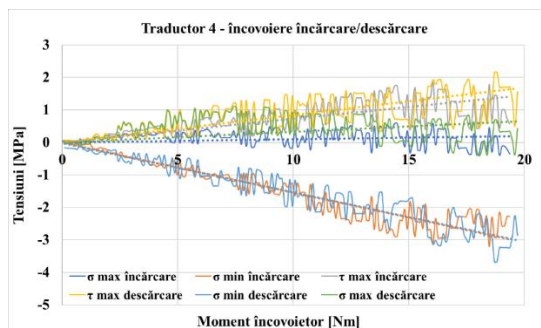


Fig. 6. 33 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru **traductorul 4** la solicitarea **de încovoiere**; încărcare și descărcare.

Rezultatele obținute pentru cele trei tensiuni enunțate anterior, pentru **traductorul 4** supus la solicitarea de **răsucire în sens orar**, sunt prezentate în figura 6.34. Constatăm următoarele:

- Spre sfârșitul încercării la încărcare, se produc căderi inexplicabile ale tensiunilor. Probabil că a fost vorba de probleme apărute în cadrul transmisiei momentului de torsiune. Din acest motiv, vom considera că valorile reprezentative pentru această încercare vor fi cele mai mari întâlnite în jurul valorii de 42 Nm pentru momentul de torsiune.

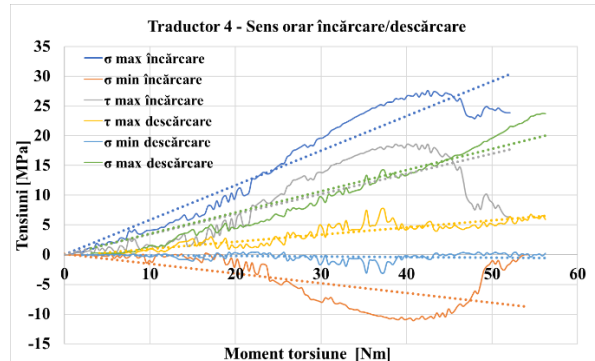


Fig. 6.34 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 4 la sollicitarea de răsucire în sens orar; încărcare și descărcare

În figura 6.35 sunt prezentate graficele de variație a tensiunilor amintite în cazul sollicitării la torsiune, în sens antiorar, calculate pentru deformațiile specifice furnizate de către traductorul 4. Momentul de torsiune este de aprox. 58 Nm. Din observarea variațiilor de mai jos se pot trage următoarele concluzii:

- Valorile cele mai mari ale tensiunilor, în valoare absolută, se înregistrează pentru tensiunile **normale minime** și sunt de aproximativ 40 MPa, față de 27 MPa la sensul orar (tensiunea normală maximă). Se constată, așadar, diferențe semnificative în ceea ce privește valorile obținute, pentru aceeași sollicitare și același traductor dar în sensuri diferite. Pentru sensul antiorar la **traductorul 3** valoarea cea mai mare a tensiunii (normale maxime) a fost de 8 MPa. Așadar, pentru același sens de rotire, la cele două traductoare, 3 și 4, amplasate în aceeași secțiune transversală, se constată valori mult diferite, diferența făcându-se din amplasarea celor două traductoare.

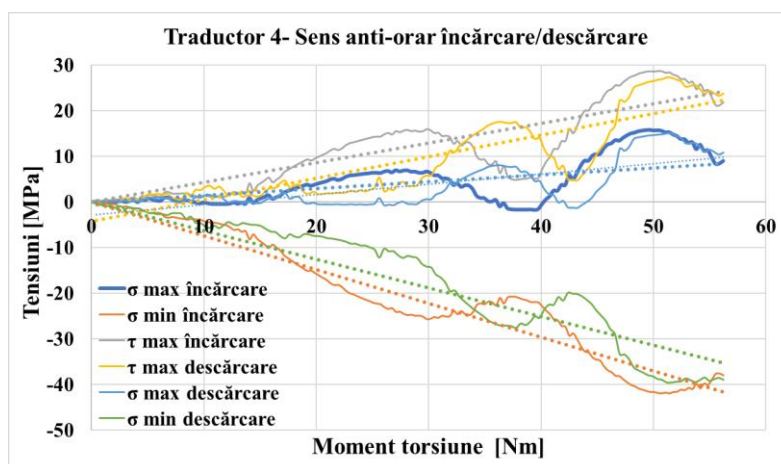


Fig. 6.35 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru traductorul 4 la sollicitarea de răsucire în sens antiorar; încărcare și descărcare.

Din figura 6.36, pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens orar**, având în vedere tensiunile calculate pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente traductorului 4, se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile normale maxime. Cele mai mari valori ale acestora sunt de aprox. 38 MPa, în raport cu valoarea de 20 MPa de la **traductorul 3**, în aceleași condiții de solicitare;

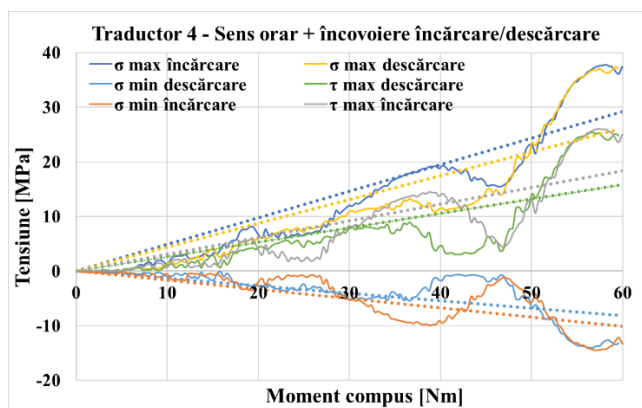


Fig. 6.36 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru **traductorul 4** la solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar; încărcare și descărcare.

În figura 6.37 sunt prezentate variațiile tensiunilor normală maximă, normală minimă și a tensiunii tangențiale maximă pentru **solicitarea la încovoiere+răsucire în sens anti-orar**, pe baza achiziționării deformațiilor specifice de la mărcile tensometrice aferente **traductorului 4**, de unde se constată următoarele:

- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile normale minime, în valoare absolută la solicitarea maximă aceasta fiind de aprox. 50 MPa. Valoarea cea mai mare a tensiunilor normale maxime este de aprox. 8 MPa.

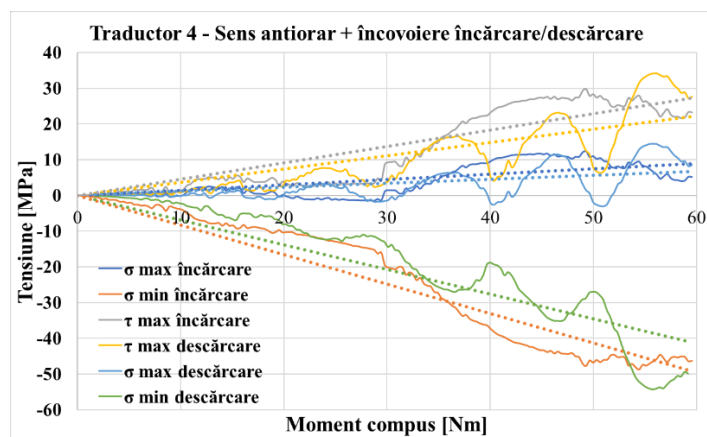


Fig. 6.37 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru **traductorul 4** la solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire în sens anti-orar; încărcare și descărcare.

Concluzii privind determinarea tensiunilor principale cu ajutorul tensometriei electrice rezistive

În tabelele de mai jos sunt furnizate valorile cele mai mari ale tensiunilor normală maximă, tabelul 6.1, normală minimă, tabelul 6.2, și tangențială maximă, tabelul 6.3, pentru cele patru traductoare în cazul celor cinci scenarii de încărcare: încovoiere, răsucire cu rotirea în sens orar, răsucire cu rotirea în sens anti-orar, solicitare compusă de încovoiere cu răsucire având rotirea în sens orar, solicitare compusă de încovoiere cu răsucire având rotirea în sens anti-orar fiecare dintre cei patru traductori au fost amplasați în locații diferite. Chiar dacă, de exemplu, traductorii 3 și 4 au fost amplasați în aceeași secțiune transversală, unul a fost montat la distanță maximă față de așa-zisul plan neutru al secțiunii.

Din aceste motive, graficele bazate pe datele din tabelele următoare nu ar fi semnificative.

Tabel 6.1 Valorile tensiunii normale maxime

	Solicitarea	Traductorul 1	Traductorul 2	Traductorul 3	Traductorul 4
		Valoarea tensiunii normale maxime [MPa]			
1	Încovoiere	-1,89	0,26	0,94	0,59
2	Răsucire – sens orar	0,99	1,45	9,11	23,87
3	Răsucire – sens antiorar	6,07	2,41	10,87	15,74
4	Încovoiere cu răsucire – sens orar	1,46	0,86	10,90	36,52
5	Încovoiere cu răsucire – sens antiorar	4,06	-1,14	16,04	12,41

Tabel 6.2 Valorile tensiunii normale minime

	Solicitarea	Traductorul 1	Traductorul 2	Traductorul 3	Traductorul 4
		Valoarea tensiunii normale minime [MPa]			
1	Încovoiere	-7,16	-4,56	-3,90	-2,28
2	Răsucire – sens orar	-6,43	-3,55	-18,52	-11,11
3	Răsucire – sens antiorar	-3,57	-0,55	-9,97	-41,95
4	Încovoiere cu răsucire – sens orar	-12,05	-6,31	-19,12	-14,45
5	Încovoiere cu răsucire – sens antiorar	-5,80	-6,12	-8,72	-48,66

Tabel 6.3 Valorile tensiunii tangențiale maxime

	Solicitarea	Traductorul 1	Traductorul 2	Traductorul 3	Traductorul 4
		Valoarea tensiunii tangențiale maxime [MPa]			
1	Încovoiere	1,51	2,37	2,34	1,85
2	Răsucire – sens orar	3,55	2,47	13,80	18,57
3	Răsucire – sens antiorar	4,76	1,04	10,39	28,72
4	Încovoiere cu răsucire – sens orar	6,75	3,49	14,96	24,02
5	Încovoiere cu răsucire – sens antiorar	5,99	3,72	12,21	29,85

6.6. Rezultate experimentale obținute pe lanțurile tensometrice de tip delta

6.6.1 Solicitarea de încovoiere a palei

În figura 6.38 se prezintă variația celor trei tensiuni pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare **rozetei 1 din lanțul 1**. Se pot constata următoarele:

- Pe parcursul încărcării, tensiunile cresc continuu ceea ce sugerează o achiziție corectă a datelor, cu excepția împrăștierii de care s-a amintit anterior;
- Cele mai mari valori ale tensiunilor se înregistrează pentru tensiunile maxime, valoarea cea mai mare a acestora fiind de aproximativ 3,7 MPa;

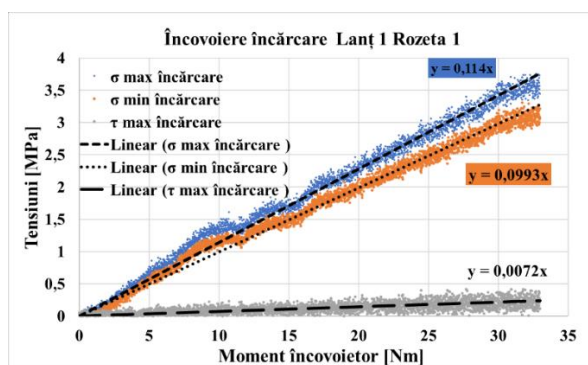


Fig. 6.38 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

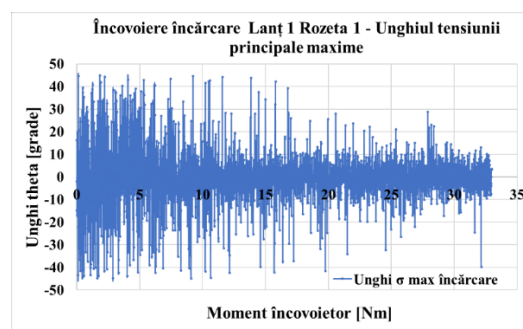


Fig. 6.39 Variația unghiului tensiunilor normale principale maxime în raport cu axa A, rozeta 1 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În figura 6.39 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime odată cu solicitarea de la valoarea zero la valoarea maximă. Se constată că tendința este ca unghiul să fie în jurul valorii de zero grade. Am văzut anterior că tensiunile principale sunt cu valori apropiate pozitive

cea ce conduce la concluzia că direcția tensiunii normale principale maxime este apropiată de direcția mărcii aflate pe direcția A, așa cum este prezentată în figura 6.5.

În figura 6.40 este prezentată variația tensiunilor enumerate anterior pe **descărcarea** la încovoiere. Având în vedere că, pentru toate cazurile de descărcare s-a obținut cam aceeași tendință de a trece prin zero și a ajunge la tensiuni negative se poate presupune că, ajungând la solicitare zero, pala se mai deformează puțin în sensul descărcării, ajungându-se astfel la tensiuni negative. Pe de altă parte, era posibil ca după descărcare să avem o remanență a tensiunilor introduse, respectiv, la încetarea solicitării să rămână valori mici de tensiuni pozitive, așa cum au fost pe tot parcursul încercării. Din figura 6.41 în care este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime, se constată că valorile acestuia se așează în jurul valorii de zero grade, ca și la încărcare, observându-se și la descărcare apropierea valorilor tensiunilor normale principale maxime de cele minime.

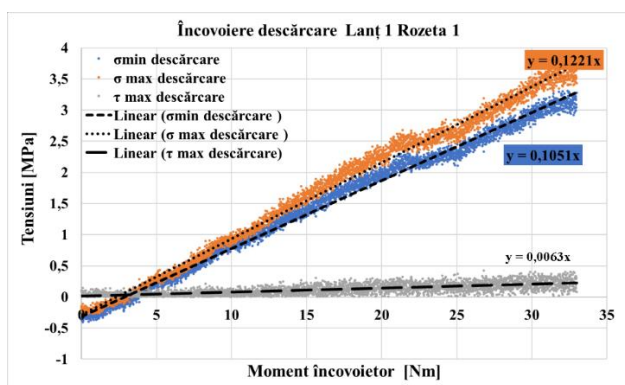


Fig.6.40 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - descărcare.

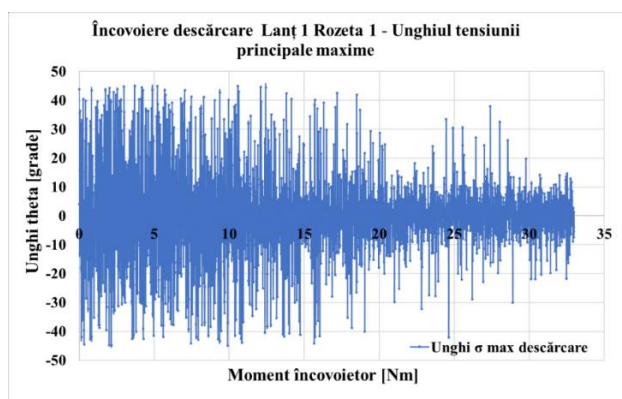


Fig. 6.41 Variația unghiului tensiunii normale maxime în raport cu axa 1 rozeta 1 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - descărcare.

În figura 6.42 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la **încărcare**, corespunzătoare rozetei 2 din lanțul 1. Rozeta 2 este situată la distanță puțin mai mare față de capătul palei în raport cu rozeta 1, distanța dintre rozete fiind de 5 mm.

În figura 6.43 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime pentru solicitarea la încovoiere cu date preluate de la rozeta 2 din lanțul 1.

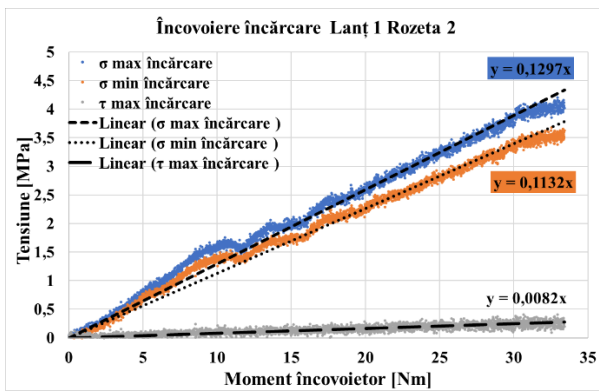


Fig. 6.42 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 2 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

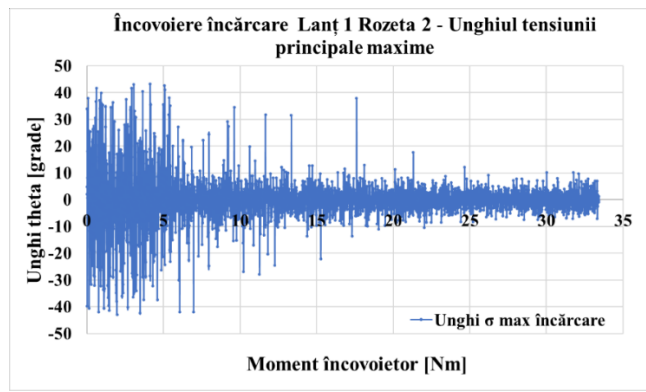
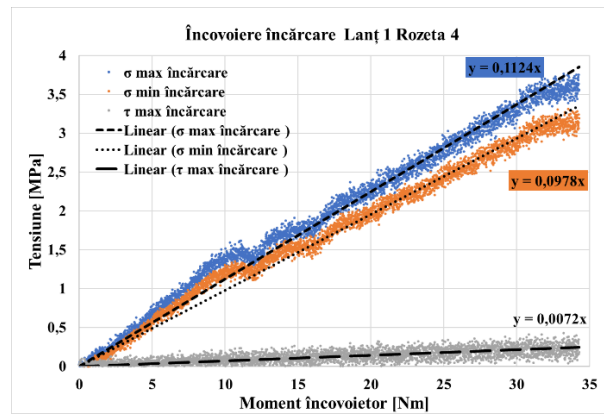
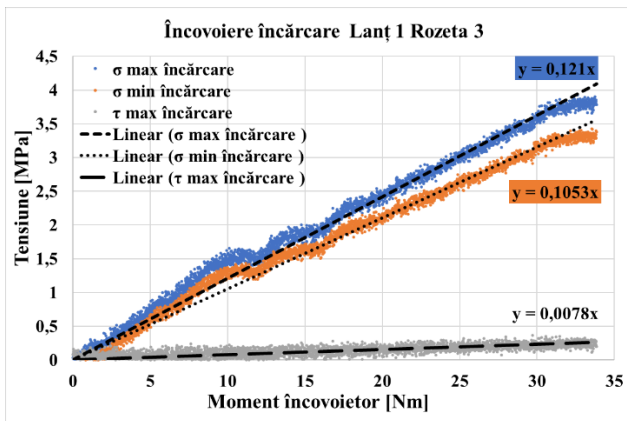


Fig. 6.43 Variația unghiului tensiunilor normale maxime în raport cu axa 1 rozeta 2 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În figura 6.44 se prezintă variația tensiunilor enunțate anterior, respectiv, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 3 din lanțul 1. Se constată aceleași mici oscilații în jurul variației liniare ca la rozetele 1 și 2, în dreptul valorilor de 12 Nm și 16 Nm. Cum datele au fost preluate în aceleași condiții de solicitare, este posibil ca aceste oscilații să provină din cadrul neconformităților apărute pe lanțul de încărcare, respectiv mici scăpări de contact la reductorul cu roți dințate. În figura 6.45 se prezintă variația tensiunilor principale normale, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 4 din lanțul 1. Rozeta 4 este situată în continuarea rozetei 3, la distanță mai mare cu 5 mm față de rozeta 3.



În figura 6.46 se prezintă variația tensiunilor principale normale, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 5 din lanțul 1.

În figura 6.47 se prezintă variația tensiunilor enunțate anterior, respectiv, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 1 din lanțul 2.

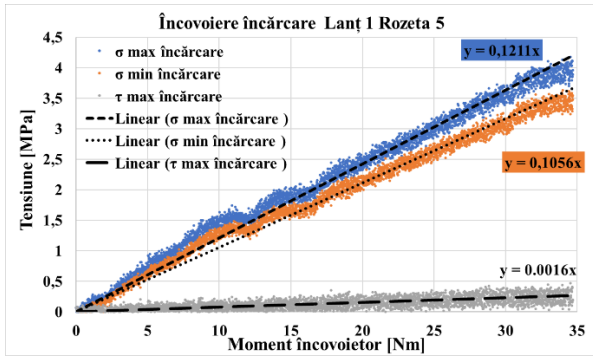


Fig. 6.44 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 5 din lanțul 1 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

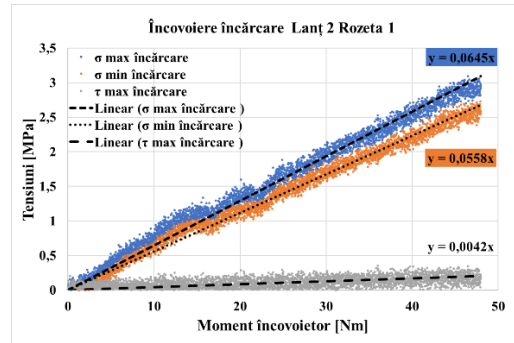


Fig. 6.45 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - încărcare

În figura 6.48 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime pentru solicitarea la încovoiere, la încărcare, cu date preluate de la rozeta 1 din lanțul 2. În figura 6.49 este prezentată variația tensiunilor pe descărcarea la încovoiere.

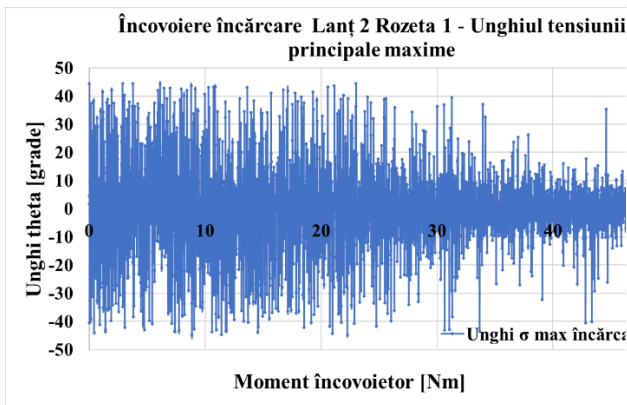


Fig. 6.46 Variația unghiului tensiunilor normale maxime în raport cu axa 1 rozeta 1 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - încărcarea

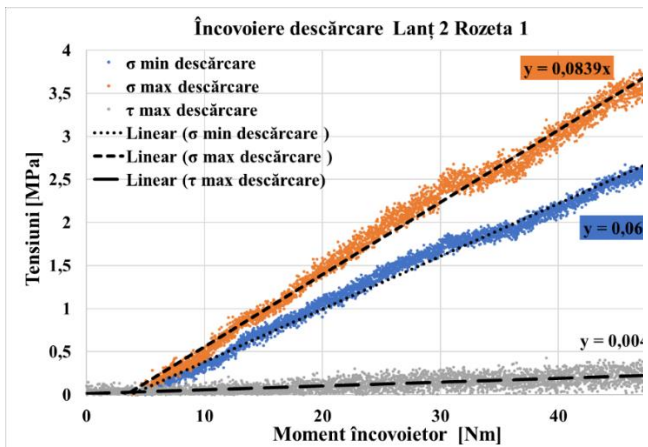


Fig. 6.47 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - descărcare.

Evident că la descărcare ($M_i=0$), din cauză că tensiunile trec în partea negativă, unghiul tensiunii normale principale maxime se abate puțin de la zero, lucru observabil în figura 6.50. În figura 6.51 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 2 din lanțul 2

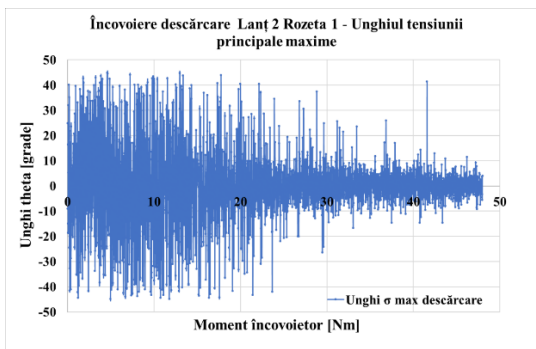


Fig. 6.48 Variația unghiului tensiunilor normale maxime în raport cu axa 1 rozeta 1 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - descărcare.

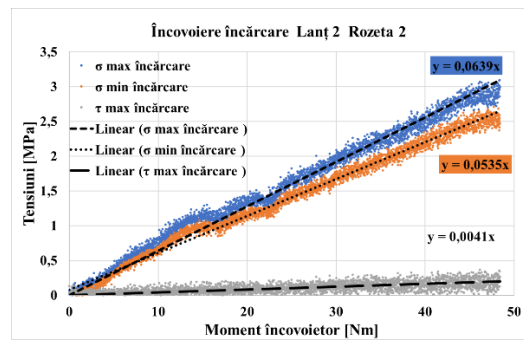


Fig. 6.49 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 2 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - încărcare

În figura 6.52 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 3 din lanțul 2. În figura 6.53 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 4 din lanțul 2.

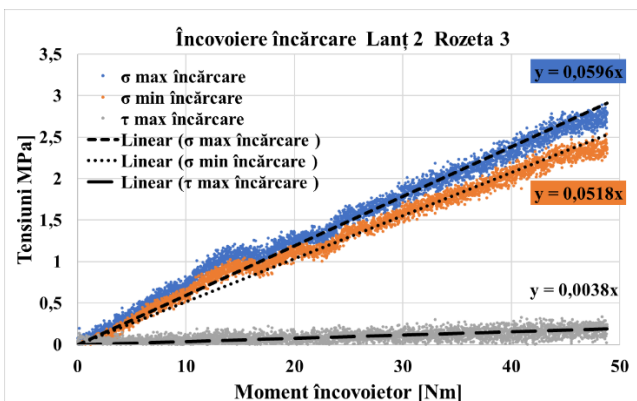


Fig. 6.50 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 3 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - încărcare

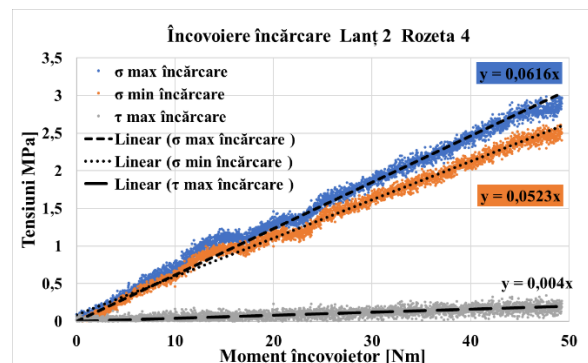


Fig. 6.51 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 4 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În figura 6.54 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 5 din lanțul 2. În figura 6.55 se prezintă variația tensiunilor enunțate anterior, respectiv, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 1 din lanțul 3.

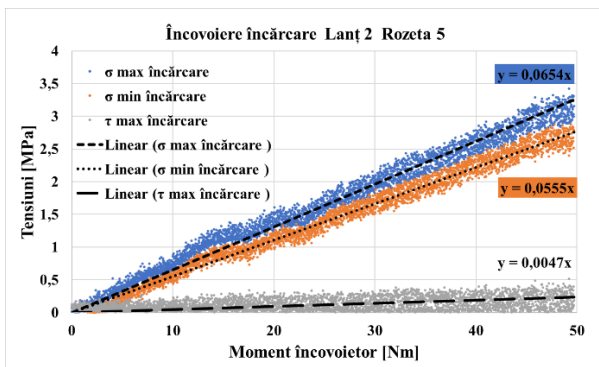


Fig. 6.52 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 5 din lanțul 2 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

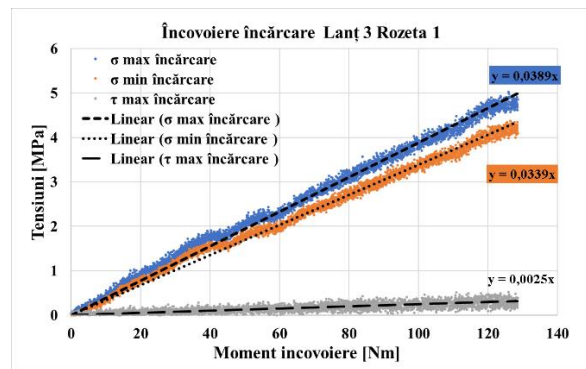


Fig. 6.53 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 3 la solicitarea de încovoiere - încărcare

Din figura 6.56, ale cărei grafice sunt furnizate pe **descărcare** pentru rozeta 1 din lanțul 3, se constată din nou că valorile deformațiilor specific (aici tensiuni calculate) nu revin perfect la zero. Totuși diferențele sunt mici, pentru tensiuni, sub 0,2 MPa. În figura 6.57 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, **la încărcare**, corespunzătoare **rozetei 2 din lanțul 3**.

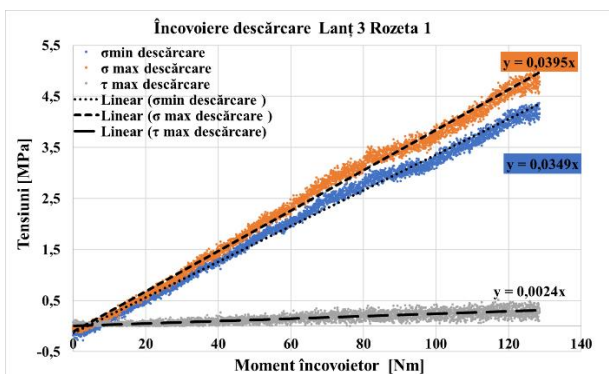


Fig. 6.54 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 3 la solicitarea de încovoiere - descărcare.

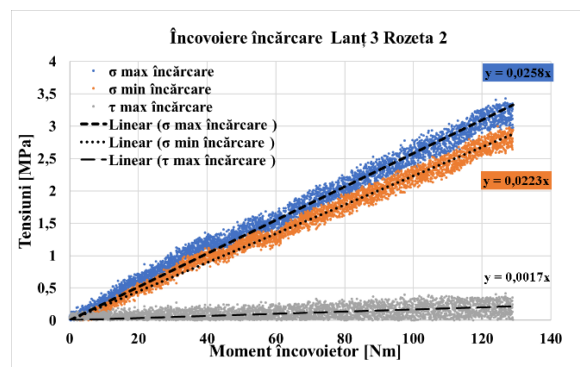


Fig. 6.55 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 2 din lanțul 3 la solicitarea de încovoiere - încărcare

În figura 6.58 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, **la încărcare**, corespunzătoare **rozetei 3 din lanțul 3**. În figura 6.59 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, **la încărcare**, corespunzătoare **rozetei 4 din lanțul 3**.

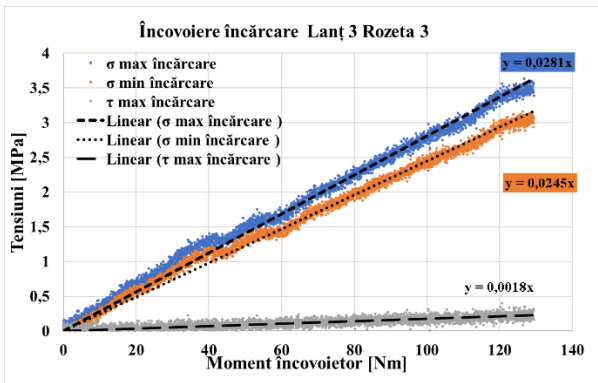


Fig. 6.56 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 3 din lanțul 3 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

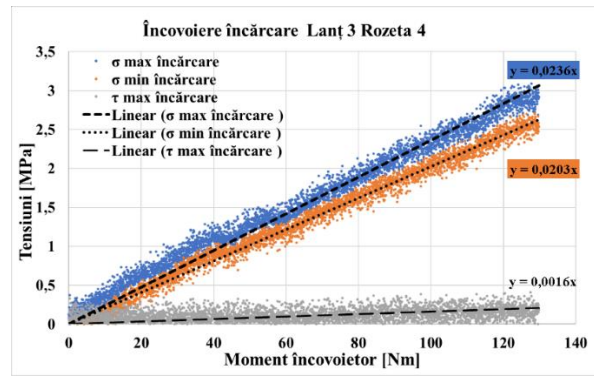


Fig. 6.57 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 4 din lanțul 3 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În figura 6.60 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, **la încărcare**, corespunzătoare **rozetei 5 din lanțul 3**. În figura 6.61 se prezintă variația tensiunilor principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, **la încărcare**, corespunzătoare **rozetei 1 din lanțul 4**.

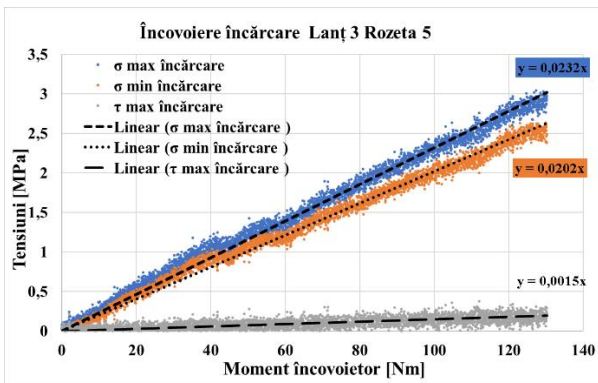


Fig. 6.58 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 5 din lanțul 3 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

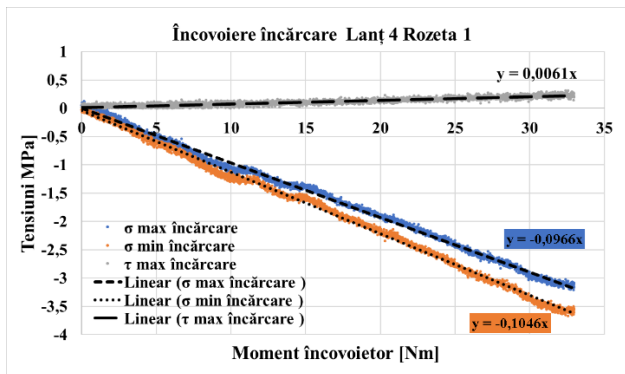


Fig. 6.59 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 4 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În figura 6.62 este prezentată variația acelorși tensiuni pe **descărcare** la încovoiere. În figura 6.63 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, **la încărcare**, corespunzătoare **rozetei 2 din lanțul 4**.

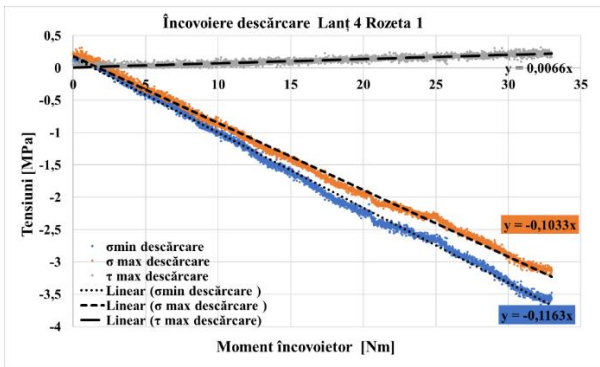


Fig. 6.60 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 1 din lanțul 4 la solicitarea de încovoiere - descărcare.

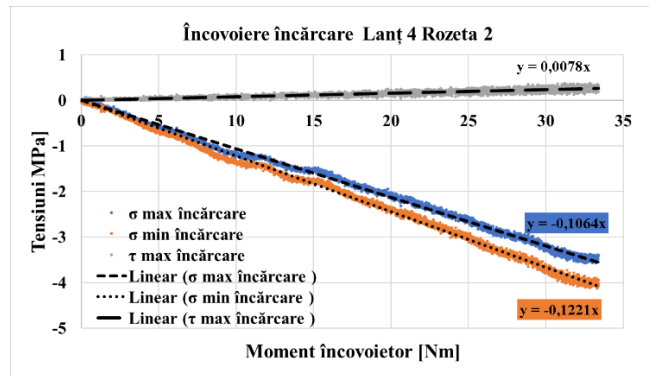


Fig. 6.61 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 2 din lanțul 4 la solicitarea de încovoiere - încărcare

În figura 6.64 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 3 din lanțul 4. În figura 6.65 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 4 din lanțul 4.

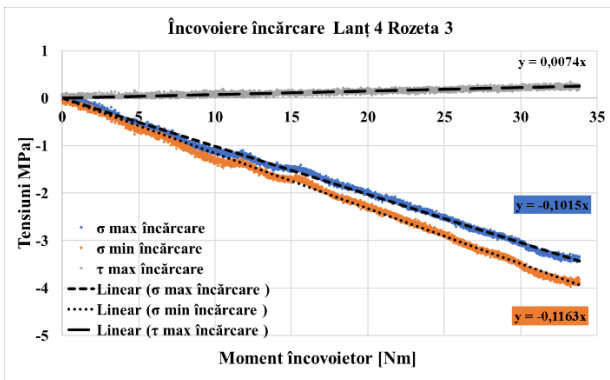


Fig. 6.62 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 3 din lanțul 4 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

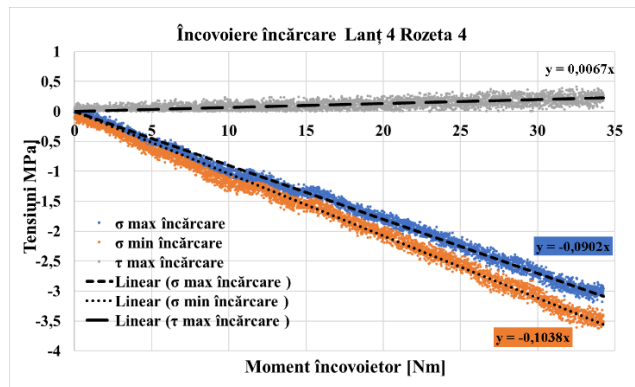


Fig. 6.63 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 4 din lanțul 4 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În figura 6.66 se prezintă variația celor trei tensiuni, principală normală, maximă și minimă și tangențială maximă pentru solicitarea de încovoiere, la încărcare, corespunzătoare rozetei 5 din lanțul 4.

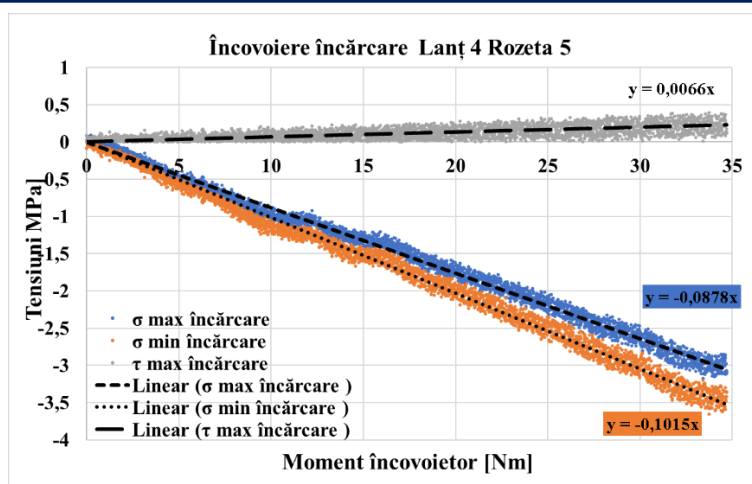


Fig. 6.64 Variația tensiunilor normale maxime și minime, și a tensiunii tangențiale maxime pentru rozeta 5 din lanțul 4 la solicitarea de încovoiere - încărcare.

În cele ce urmează se prezintă tabelul 6.4 ce sumarizează cele mai mari valori obținute în cadrul solicitării de încovoiere a mărcilor tensiometrice aparținând lanțurilor de tip 4/120 KY31. Se constată, pentru rozetele din același lanț, că valorile maxime ale tensiunilor de același tip sunt apropiate. De exemplu, pentru rozetele din lanțul 1, valorile cele mai mari ale tensiunii normale principale maxime sunt:

Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
3,74	4,2	3,92	3,76	4,18

Deși rozeta 1 este mai apropiată de capătul liber al palei, acolo unde se introduce forța ce produce încovoierea, nu se constată o creștere liniară a σ_{\max} înspre rozeta 5 (având în vedere că brațul forței crește). Acest lucru are loc ca urmare a faptului că și secțiunea transversală este diferită, modulul de inerție axial, W_z , crescând, de asemenea pe măsură ce ne depărtăm de capătul liber al palei.

Tabel 6.4 Valorile maxime ale tensiunilor normale principale maxime și minime și ale tensiunii tangențiale maxime

Tensiuni [MPa]	Încovoiere rozete din lanțuri				
	LANT 1				
	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
σ_{\max}	3,74	4,2	3,92	3,76	4,18
σ_{\min}	3,3	3,67	3,42	3,3	3,63
τ_{\max}	0,41	0,4	0,36	0,42	0,47
	LANT 2				
σ_{\max}	3,09	2,99	2,88	2,98	3,42
σ_{\min}	2,72	2,7	2,53	2,61	2,87

τ_{\max}	0,35	0,36	0,33	0,34	0,51
LANT 3					
σ_{\max}	5,02	3,42	3,63	3,18	3,04
σ_{\min}	4,36	2,99	3,15	2,7	2,63
τ_{\max}	0,52	0,41	0,39	0,4	0,37
LANT 4					
σ_{\max}	-3,21	-3,57	-3,45	-3,18	-3,17
σ_{\min}	-3,67	-4,12	-3,97	-3,62	-3,65
τ_{\max}	0,31	0,34	0,34	0,41	0,39

6.6.2 Solicitarea de răsucire a palei

6.6.2.1 Solicitarea la răsucire în sens orar

În figura 6.67 se prezintă variația tensiunilor: normală principală maximă, normală principală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 2 din lanțul 1, la solicitarea de răsucire în sens orar pentru varianta de încărcare de la zero la valoarea de aprox. 56 Nm. În figura 6.68 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime (în raport cu direcția mărcii A din rozetă) pe parcursul încărcării de la solicitarea de răsucire cu moment zero până la momentul de aprox. 56 Nm.

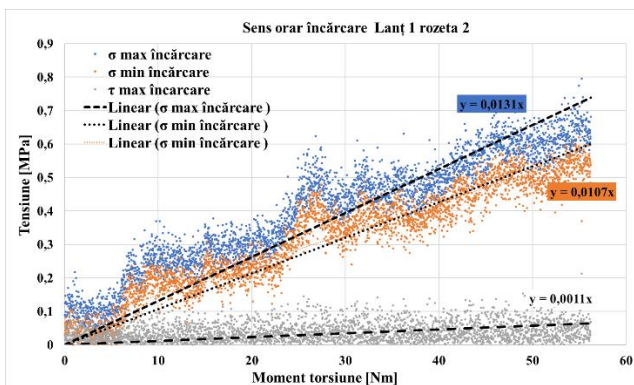


Fig. 6.65 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 2 din lanțul 1 – răsucire orar - încărcare

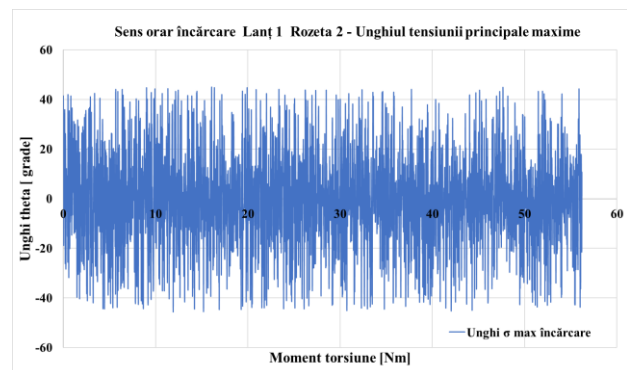


Fig. 6.66 Variația unghiului tensiunii normale principale maxime cu momentul de răsucire, pentru rozeta 2 din lanțul 1 – răsucire orar - încărcare

În figura 6.69 se observă variația tensiunilor amintite anterior pe perioada de descărcare la răsucire. În figura 6.70 se prezintă graficele de variație cu momentul de torsiune ale tensiunilor normală principală maximă, ale tensiunilor normală principală minimă și ale tensiunilor tangențiale maxime pentru una din rozetele aparținând lanțului 4, care este așezat pe extradados.

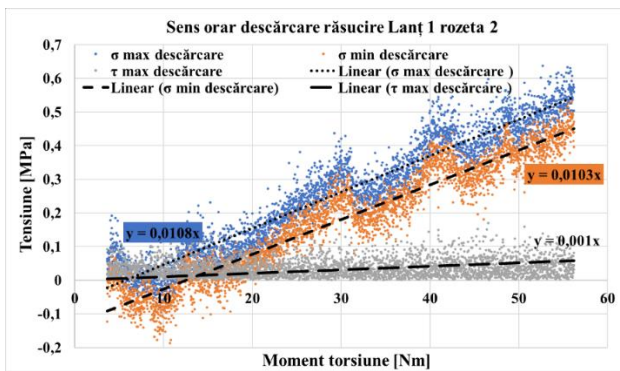


Fig. 6.67 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 2 din lanțul 1 – răsucire orar - descărcare

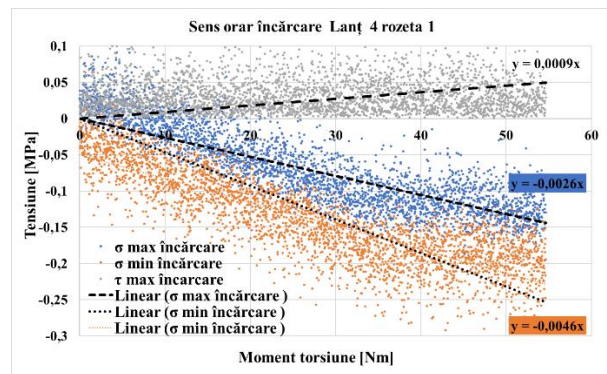


Fig. 6. 68 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 2 din lanțul 1 – răsucire orar - încărcare

Datorită faptului că variațiile celor trei tensiuni este similară, luându-se în considerare și diferențele de semne între lanțurile L1, L2, L3 și L4, în continuare nu se mai prezintă toate graficele obținute prin încercări. Totuși, în tabelul 6.5 prezentăm valorile cele mai mari obținute în cadrul solicitării de răsucire în sens orar a mărcilor tensiometrice aparținând lanțurilor de tip 4/120 KY31. Nu se constată vreo tendință de scădere a tensiunilor pe măsură ce modulul de rezistență polar, W_p , crește, adică pe măsură ce ne depărtăm de capătul liber al palei, având în vedere că momentul de torsiune este constant.

Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
0,44	0,79	1,01	0,79	1,23

Tabel 6. 5 Valorile maxime ale tensiunilor normale principale maxime și minime și ale tensiunii tangențiale maxime – solicitare răsucire sens orar

Tensiuni [MPa]	Sens orar încărcare rozete din lanțuri				
	LANȚ 1				
	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
σ_{\max}	0,44	0,79	1,01	0,79	1,23
σ_{\min}	0,31	0,6	0,7	0,67	0,96
τ_{\max}	0,21	0,21	0,29	0,16	0,27
	LANȚ 2				
σ_{\max}	0,43	0,34	0,29	0,32	0,45
σ_{\min}	0,27	0,22	0,16	0,15	0,17
τ_{\max}	0,19	0,15	0,17	0,22	0,29
	LANȚ 3				

σ_{\max}	0,70	0,48	0,73	0,34	0,83
σ_{\min}	0,52	0,33	0,56	0,42	0,68
τ_{\max}	0,20	0,16	0,21	0,24	0,24
LANȚ 4					
σ_{\max}	-0,18	-0,15	-0,20	-0,13	0,13
σ_{\min}	-0,33	-0,25	-0,32	-0,37	-0,23
τ_{\max}	0,14	0,11	0,12	0,25	0,11

6.6.2.2 Solicitarea în sens antiorar

În figura 6.71 se prezintă variația tensiunilor: normală principală maximă, normală principală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 5 din lanțul 1, la solicitarea de răsucire în sens antiorar pentru varianta de încărcare de la zero la valoarea de aprox. 56 Nm. În figura 6.72 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime (în raport cu direcția mărcii A din rozetă) pe parcursul încărcării de la solicitarea de răsucire cu moment zero până la momentul de aprox. 56 Nm. Valorile oscilează în jurul valorii de zero grade, oscilațiile prezente în figură fiind date de modul de transmisie a momentului de către motorul pas cu pas prin intermediul celor reductoare cu roți dințate.

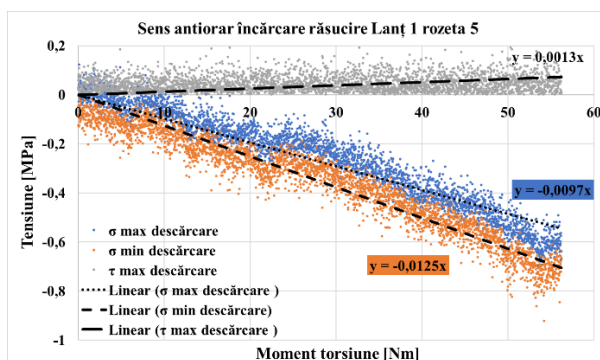


Fig. 6.69 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 5 din lanțul 1 – răsucire antiorar - încărcare

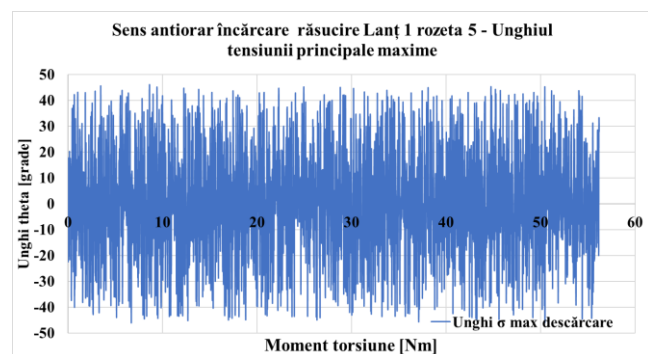


Fig. 6.70 Variația unghiului tensiunii normale principale maxime cu momentul de răsucire, pentru rozeta 5 din lanțul 1 – răsucire antiorar - încărcare

În figura 6.73 se observă variația tensiunilor normale maxime, normale minime și tangențiale maxime de descărcare la răsucire, pentru rozeta 5 din lanțul 1, la solicitarea de răsucire în sens antiorar, pe descărcare. Se constată că valorile nu revin exact la zero, explicațiile furnizate la solicitarea de încovoiere fiind valabile și aici. În figura 6.74 se dau graficele de variație cu momentul de torsiune ale tensiunilor normală principală maximă, ale tensiunilor normală principală minimă și ale tensiunilor tangențiale maxime pentru una din rozetele aparținând lanțului 3, care este așezat pe

extrados (toate celelalte lanțuri fiind așezate pe intrados). Se constată că tensiunile normale maxime sunt pozitive în timp ce valorile tensiunilor minime sunt foarte apropiate de zero.

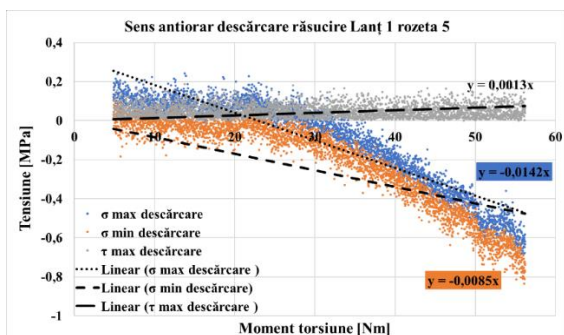


Fig. 6.71 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 5 din lanțul 1 – răsucire antiorar - descărcare

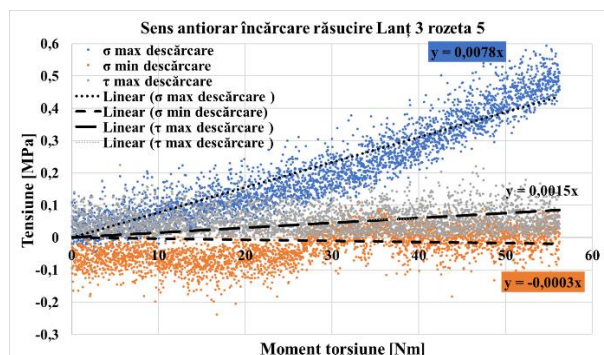


Fig. 6.72 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 5 din lanțul 3 – răsucire antiorar - încărcare

Datorită faptului că variațiile celor trei tensiuni este similară, luându-se în considerare și diferențele de semne între lanțurile L1, L2, L3 și L4, în continuare nu se mai prezintă toate graficele obținute prin încercări. Totuși, în tabelul 6.6 prezentăm valorile cele mai mari obținute în cadrul solicitării de răsucire a mărcilor tensiometrice aparținând lanțurilor de tip 4/120 KY31.

Nu se constată vreo tendință de scădere a tensiunilor pe măsură ce modulul de rezistență polar, W_p , crește, adică pe măsură ce ne depărtăm de capătul liber al palei, având în vedere că momentul de torsiune este constant. Dimpotrivă, se constată că pornind de la rozeta 1 până la rozeta 3 tensiunea crește (în valoare absolută) după care la rozeta 4 se constată o scădere a tensiunii

Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
-0,12	-0,22	-0,40	-0,38	-0,69

Pentru celelalte valori nu se constată o tendință evidentă de variație a tensiunilor normale principale.

Tabel 6.6 Valorile maxime ale tensiunilor normale principale maxime și minime și ale tensiunii tangențiale maxime – solicitare răsucire sens antiorar

Tensiuni [MPa]	Sens antiorar încărcare rozete din lanțuri				
	LANȚ 1				
	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5

σ_{\max}	-0,12	-0,22	-0,40	-0,38	-0,69
σ_{\min}	-0,26	-0,34	-0,54	-0,53	-0,92
τ_{\max}	0,23	0,15	0,16	0,13	0,25
LANȚ 2					
σ_{\max}	3,31	0,18	0,31	0,33	0,25
σ_{\min}	-0,21	-0,25	-0,30	-0,18	-0,23
τ_{\max}	0,23	0,16	0,24	0,16	0,18
LANȚ 3					
σ_{\max}	-0,75	-0,13	0,15	-0,29	0,60
σ_{\min}	-0,88	-0,21	-0,17	-0,53	-0,25
τ_{\max}	0,19	0,12	0,16	0,26	0,22
LANȚ 4					
σ_{\max}	-0,09	-0,12	-0,13	-0,09	-0,05
σ_{\min}	-0,22	-0,19	-0,22	-0,32	-0,18
τ_{\max}	0,11	0,09	0,09	0,24	0,15

6.6.3 Solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire a palei

6.6.3.1 Solicitarea de încovoiere cu răsucire în sens orar

Rezultatele obținute fiind valorificate prin grafice cu tendință de variație liniară, având în vedere că solicitarea a fost în domeniul elastic, și pentru că forma graficelor este asemănătoare iar valorile obținute sunt apropiate, **în cele ce urmează se prezintă doar câteva grafice din cele obținute.** În orice caz, la sfârșitul paragrafului sunt prezentate, tabelar, valorile maxime ale tensiunilor obținute pentru fiecare încercare în parte.

În figura 6.75 se prezintă variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 introduse în pală prin solicitare compusă **de încovoiere cu răsucire în sens orar** pe perioada de încărcare.

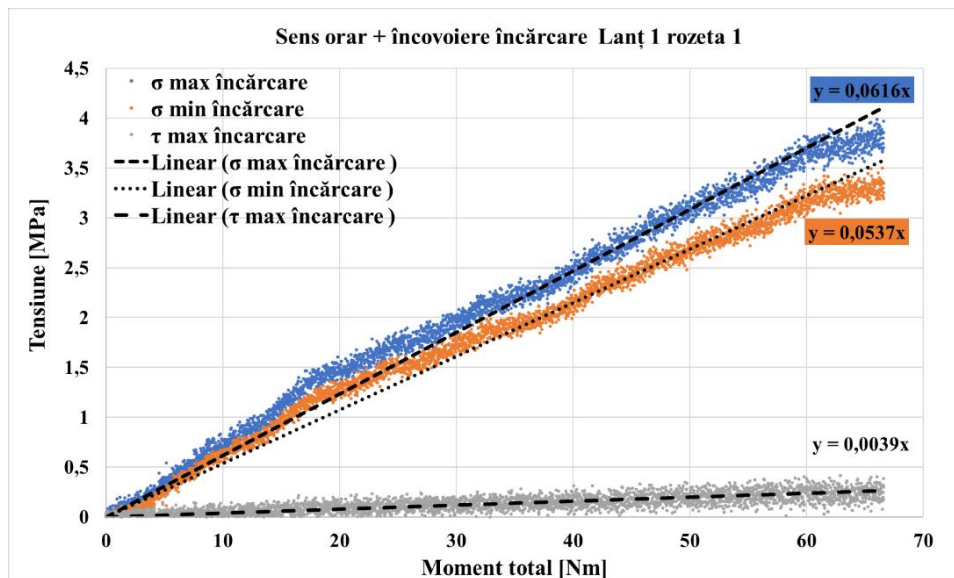
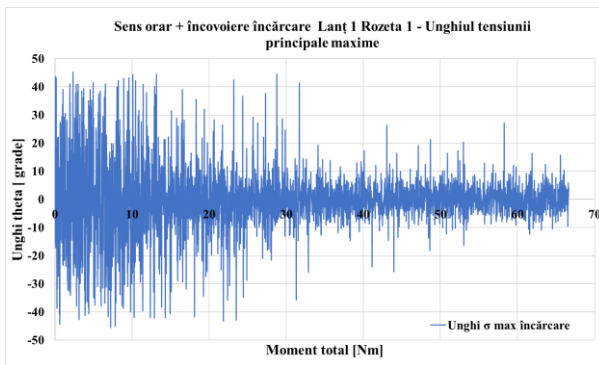
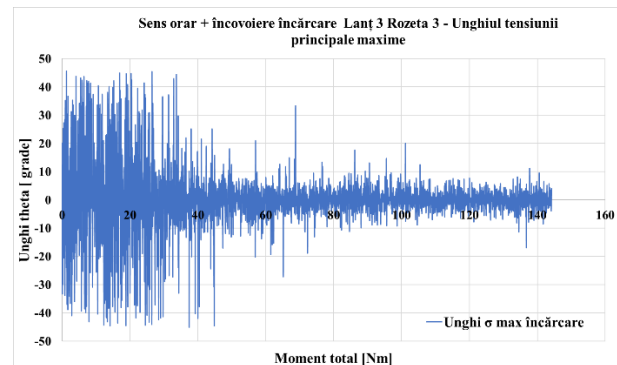


Fig. 6.73 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 – solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar- încărcare

În figura 6.76 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime (în raport cu direcția mărcii A din rozetă – a se vedea figura 6.5) pe parcursul încărcării de la solicitarea de răsucire cu moment zero până la momentul de aprox. 56 Nm concomitent cu solicitarea de încovoiere de la zero la momentul încovoiator de aprox. 32 Nm.



a) Lanț 1, rozeta 1 ($M_c \approx 65$ Nm)



b) Lanț 3, rozeta 1 ($M_c \approx 145$ Nm)

Fig 6.74 Variația unghiului tensiunii normale principale maxime cu momentul compus, pentru solicitarea compusă de încovoiere cu răsucire orar – încărcare

În figura 6.77 se prezintă variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 4 introduse în pală prin solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar pe perioada de încărcare.

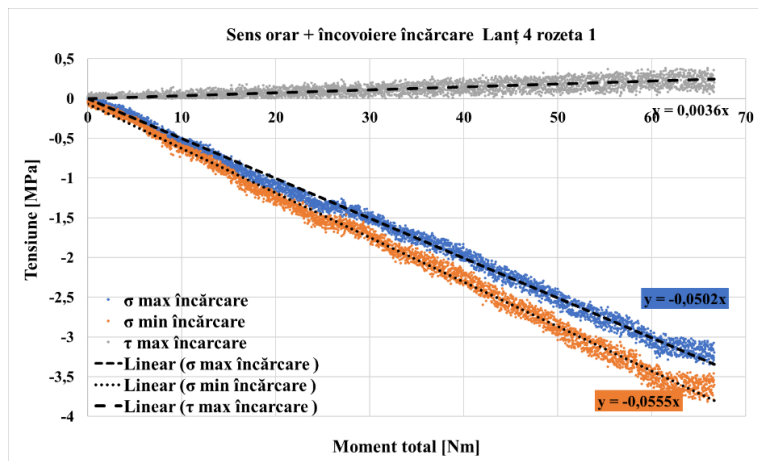
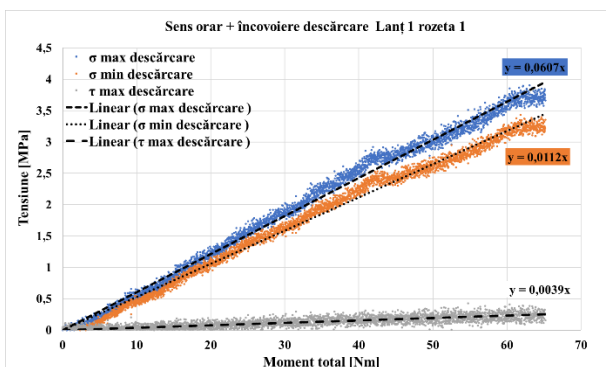
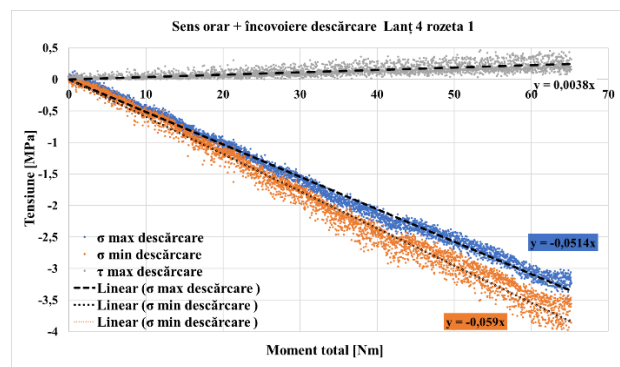


Fig. 6.75 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 – solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar- încărcare

În figura 6.78 este prezentată variația tensiunilor enumerate anterior pe descărcarea la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune.



a) lanț 1, rozeta 1 - descărcare



b) lanț 4 rozeta 1 - descărcare

Fig. 6.76 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 – solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens orar- descărcare

În tabelul 6.7. se furnizează valorile tensiunilor obținute la final de încărcare, respectiv, cu solicitarea maximă, în care momentul compus este:

- pentru lanțul 1 (o valoare medie – diferă de la rozetă la rozetă): 68 Nm;
- pentru lanțul 2: 76 Nm;
- pentru lanțul 3: 141 Nm;
- pentru lanțul 4: 68 Nm.

Pentru comparație, mai jos se prezintă valorile obținute pentru rozetele din cadrul lanțului 1, la solicitarea de **încovoiere**. Se constată că valorile tensiunii normale principale maxime obținute pentru toate rozetele din cadrul lanțului 1 la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune sunt mai mari

decât cele similare obținute pentru solicitarea de încovoiere. Este evident că aici, tensiunile de tracțiune s-au cumulat, deși contribuția solicitării de torsiune este foarte mică, așa cum s-a putut constata și de la solicitările simple de torsiune (ambele sensuri).

Încovoiere - încărcare

Lanț 1	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
σ_{\max}	3,74	4,2	3,92	3,76	4,18

Tabel 6.7 Valorile maxime ale tensiunilor (normale principale și tangențială) pentru solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune (sens orar) - încărcare

Tensiuni [MPa]	Sens orar + încovoiere încărcare rozete din lanțuri				
	LANȚ 1				
	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
σ_{\max}	3,98	4,77	4,75	4,34	5,06
σ_{\min}	3,49	4,17	4,14	3,80	4,46
τ_{\max}	0,41	0,45	0,49	0,37	0,52
	LANȚ 2				
σ_{\max}	3,35	3,14	2,99	3,04	3,49
σ_{\min}	2,97	2,76	2,56	2,65	3,05
τ_{\max}	0,41	0,29	0,31	0,28	0,39
	LANȚ 3				
σ_{\max}	5,29	3,47	4,04	3,19	3,64
σ_{\min}	4,60	3,03	3,56	2,17	3,18
τ_{\max}	0,52	0,34	0,39	0,56	0,43
	LANȚ 4				
σ_{\max}	-3,34	-3,67	-3,54	-3,13	-3,05
σ_{\min}	-3,81	-4,18	-4,06	-3,63	-3,52
τ_{\max}	0,38	0,41	0,35	0,45	0,31

În figura 6.79 se prezintă variația tensiunilor normale principale maxime pentru cele cinci rozete din lanțul 1, în scenariile de solicitare la **încovoiere** și la **solicitarea compusă** de încovoiere cu torsiune (sens orar) pe zona de **încărcare**.

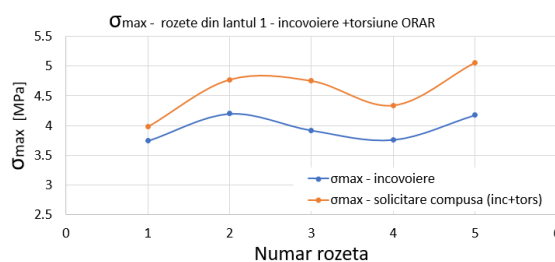


Fig. 6.77 Variația tensiunilor normale principale maxime pentru rozetele din lanțul 1, la solicitarea de încovoiere și la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune (sens orar)- **încărcare**

6.6.3.2 Solicitarea de încovoiere cu răsucire în sens antiorar

În figura 6.80 se prezintă variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 introduse în pală prin solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens antiorar pe perioada de încărcare.

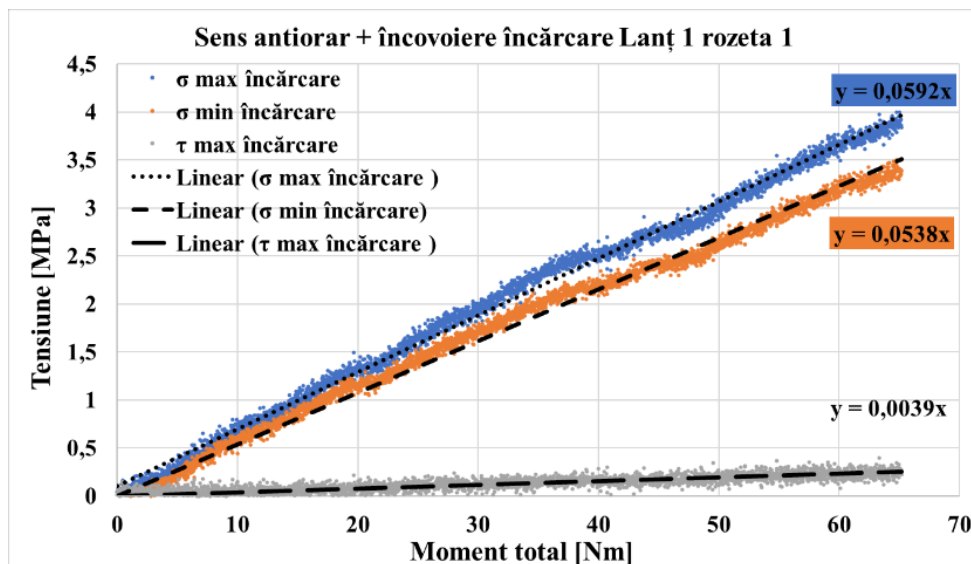
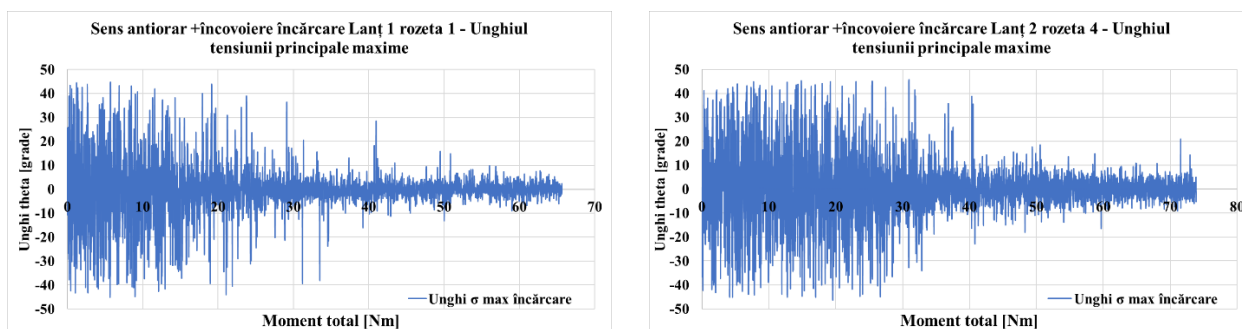


Fig. 6.78 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 – solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens antiorar- încărcare

În figura 6.81 este prezentată variația unghiului tensiunii normale principale maxime (în raport cu direcția mărcii A din rozetă – a se vedea figura 6.5) pe parcursul încărcării de la solicitarea de răsucire cu moment zero până la momentul maxim concomitent cu solicitarea de încovoiere de la zero la momentul încovoiător maxim.



a) Lanț 1, rozeta 1 ($M_c \approx 66 \text{ Nm}$)

b) Lanț 2, rozeta 4 ($M_c \approx 74 \text{ Nm}$)

Fig. 6.79 Variația unghiului tensiunii normale principale maxime cu momentul de răsucire, pentru răsucire antiorar – încărcare

În figura 6.82 se prezintă variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 4 introduse în pală prin solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens antiorar pe perioada de încărcare.

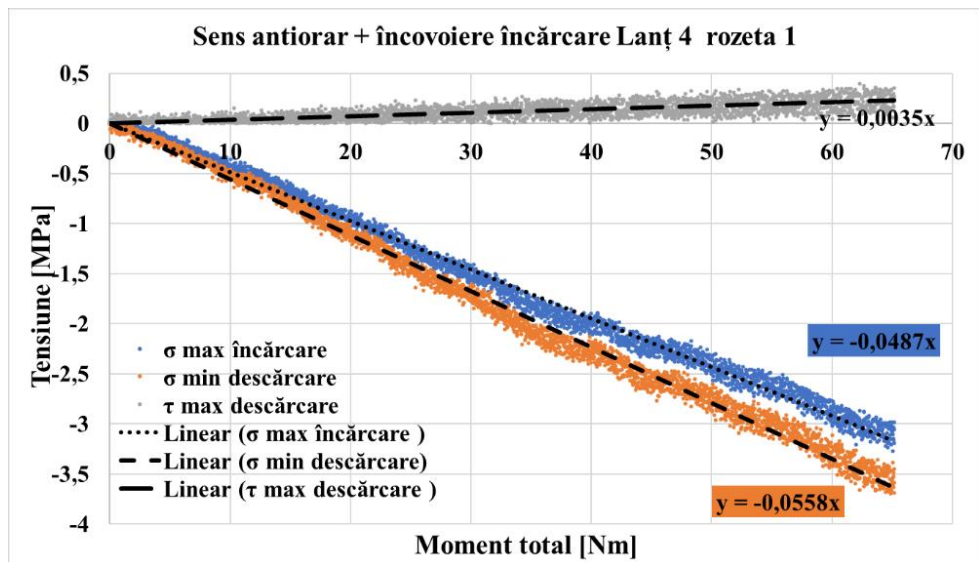
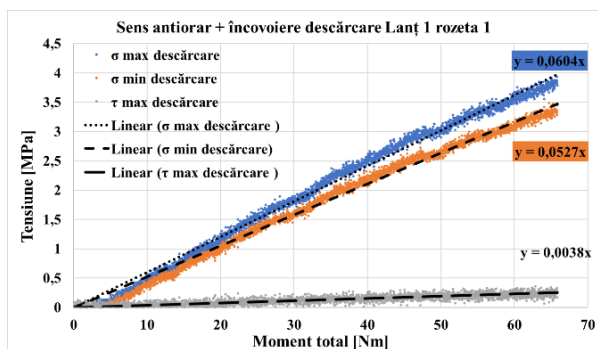
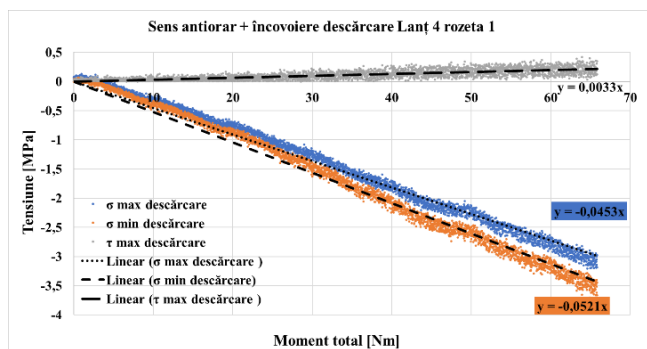


Fig. 6.80 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 4 – solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens antiorar- încărcare

În figura 6.83 este prezentată variația tensiunilor enumerate anterior pe descărcarea la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune. Sunt date valorile pentru rozetele 1, aflate pe lanțurile 1 și 4, la fel ca rezultatele din figurile anterioare dar pe încărcare.



a) lanț 1, rozeta 1 - descărcare



b) lanț 4 rozeta 1 - descărcare

Fig. 6.81 Variația tensiunilor: normală maximă, normală minimă și tangențială maximă, pentru rozeta 1 din lanțul 1 – solicitare compusă de încovoiere cu răsucire în sens antiorar- descărcare

În tabelul 6.8 se furnizează valorile tensiunilor obținute la final de încărcare, respectiv, cu solicitarea maximă, în care momentul compus este:

- pentru lanțul 1 (o valoare medie – diferă de la rozetă la rozetă): 68 Nm;
- pentru lanțul 2: 76 Nm;
- pentru lanțul 3: 141 Nm;
- pentru lanțul 4: 68 Nm.

Pentru comparație, mai jos se prezintă valorile obținute pentru rozetele din cadrul lanțului 1, la solicitarea de **încovoiere**. Spre deosebire de solicitarea compusă cu răsucirea în sens orar, aici nu se mai păstrează tendința ca toate valorile obținute pentru solicitarea compusă să fie mai mari decât pentru solicitarea de încovoiere. Dispunerea formei secțiunii transversale în raport cu direcția momentului încovoiator raportată la forma și dimensiunile secțiunilor transversale, vecine conduc la variațiile prezentate în figura 6.84

Încovoiere - încărcare

Lanț 1	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
σ_{\max}	3,74	4,2	3,92	3,76	4,18

Tabel 6.8 Valorile maxime ale tensiunilor (normale principale și tangențială) pentru solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune (*sens antiorar*) – încărcare

Tensiuni [MPa]	Sens antiorar + încovoiere încărcare rozete din lanțuri				
	LANȚ 1				
	Rozeta 1	Rozeta 2	Rozeta 3	Rozeta 4	Rozeta 5
σ_{\max}	3,99	4,28	3,79	3,69	3,45
σ_{\min}	3,49	3,73	3,26	3,18	3,04
τ_{\max}	0,39	0,46	0,40	0,48	0,42
	LANȚ 2				
σ_{\max}	3,19	3,25	3,02	3,33	3,57
σ_{\min}	2,84	2,82	2,67	2,91	3,03
τ_{\max}	0,36	0,38	0,30	0,44	0,48
	LANȚ 3				
σ_{\max}	4,90	3,27	3,13	3,32	2,48
σ_{\min}	4,24	2,79	2,73	2,89	2,17
τ_{\max}	0,52	0,30	0,33	0,42	0,28
	LANȚ 4				
σ_{\max}	-3,26	-3,57	-14,16	-3,16	-3,08
σ_{\min}	-3,69	-4,08	-14,62	-3,66	-3,54
τ_{\max}	0,39	0,39	0,40	0,47	0,32

În figura 6.84 se prezintă variația tensiunilor normale principale maxime pentru cele cinci rozete din lanțul 1, în scenariile de solicitare la **încovoiere** și la **solicitarea compusă** de încovoiere cu torsiune (**sens antiorar**) pe zona de **încărcare**. Se observă faptul că, primele două valori sunt mai mari pentru tensiunile normale principale maxime obținute prin solicitarea compusă în timp ce următoarele trei valori sunt mai mari în cazul solicitării de încovoiere.

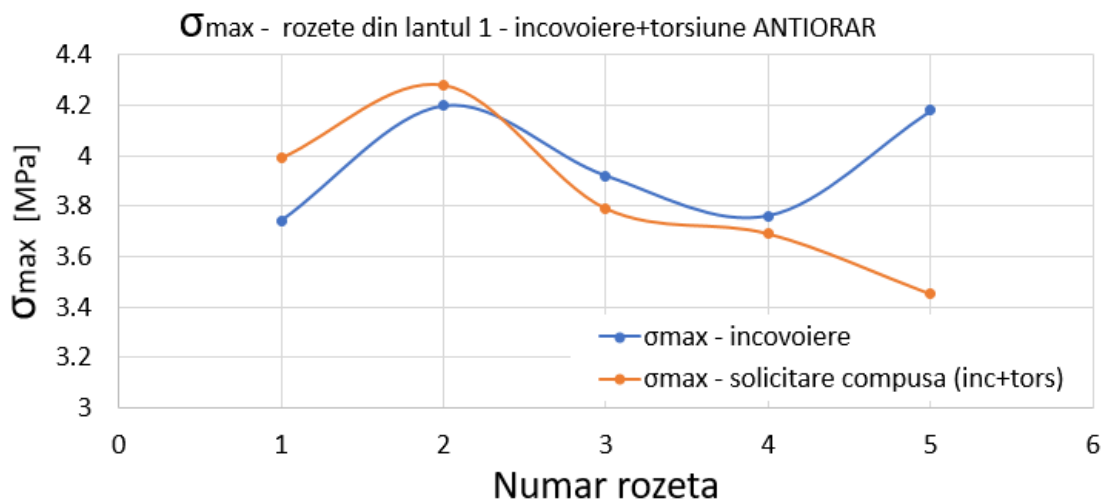


Fig. 6.82 Variația tensiunilor normale principale maxime pentru rozetele din lanțul 1, la solicitarea de încovoiere și la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune (**sens antiorar**)- **încărcare**

Concluzii la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune

Se constată că tensiunile din solicitarea de torsiune, având în vedere unghiul de 4 grade cu cât s-a rotit pala, sunt mult mai mici decât cele produse prin solicitarea de încovoiere. În aceste condiții, influența tensiunilor date de torsiune asupra rezultatelor finale este mai mică. Totuși, în final s-a constatat că, prin suprapunerea sensului de aplicare a momentului de torsiune cu variația formei și dimensiunilor secțiunilor transversale, valorile tensiunilor normale principale maxime date de solicitarea de încovoiere pot scădea. Ca și la solicitarea de încovoiere, se constată că valorile tensiunilor normale principale, minimă și maximă, sunt apropiate, ceea ce conduce la ideea că starea de tensiuni se apropie de o stare biaxială, cu tensiuni de același semn, în conformitate cu suprafața (extrados sau intrados) unde au fost montate lanțurile de rozete tensometrice.

Unghiul tensiunii normale principale maxime se apropie de zero, întărind ideea anterioară cu starea biaxială de tensiune, de la suprafață, acolo unde am preluat deformațiile specifice și pentru care am calculat tensiunile.

6.7 Validarea rezultatelor experimentale cu AEF

Simulările prezentate în capitolul 4 au fost necesare pentru identificarea zonelor cu tensiuni maxime, unde au fost lipite traductoarele tensometrice rectangulare și cele patru lanțuri tensometrice de tip delta. În urma calibrărilor s-a obținut o valoare maximă a deplasării la solicitarea la încovoiere de 15 mm, ceea ce a condus la o forță maximă de aproximativ 86 N. Valoarea maximă a rotirii a fost de 4 grade, care a condus la un moment de torsiune maxim de aproximativ 56 Nm. Valoarea forței maxime și a momentului de torsiune maxim au fost de referință pentru analizele AEF.

Pentru cele cinci cazuri de solicitări se prezintă în continuare tensiunile echivalente von Mises și tensiunea maximă principală. S-au calculat erorile relative între valorile tensiunilor von Mises maxime determinate experimental și respectiv prin AEF, pentru întreaga pală. Deși criteriul von Mises este utilizat în special pentru materiale metalice, acest lucru a fost justificat din următoarele considerente:

- materialul compozit a fost considerat omogen și ortotrop la AEF;
- criteriul Thai-Hill, utilizat pentru materiale compozite, degenerază în criteriul von Mises în cazul în care tensiunile admisibile la tracțiune și compresiune sunt egale (Morăraș C., ș.a. 2023);
- programul Ansys furnizează tensiunile von Mises;
- testarea palei s-a făcut în domeniul elastic, cu tensiuni echivalente care nu se apropie de limita de cedare;
- pentru materialul compozit testat, tensiunile de rupere la tracțiune și respective compresiune sunt relativ apropiate.
- Solicitarea la încovoiere

În figura 6.85 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises maxime $\sigma_{ech\ max}=7,09$ MPa.

În figura 6.86 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1\ max}=4,92$ MPa

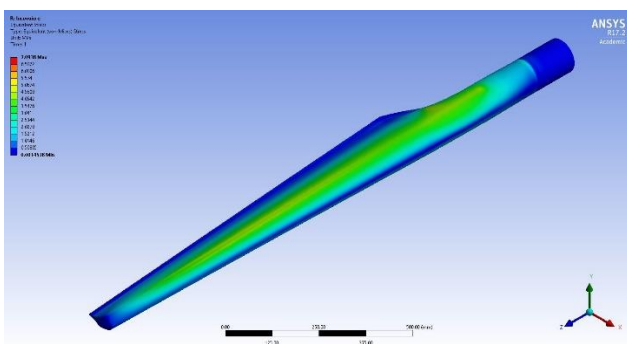


Fig 6.83 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises-vedere izometrica intrados-extrados

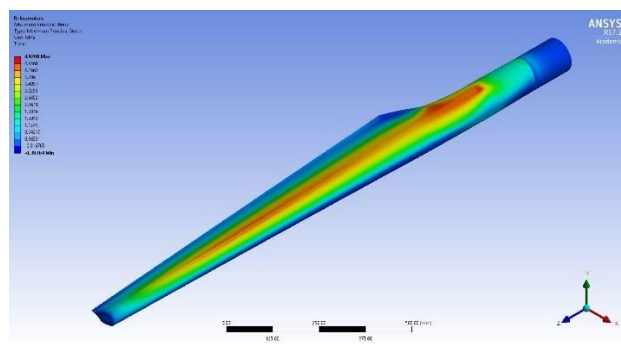


Fig 6.84 Harta tensiunilor principale maxime - vedere izometrica pe direcția intrados-extrados

- Solicitarea la răsucire în sens orar

În figura 6.87 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises maxime $\sigma_{ech\ max}=33,88$ MPa.

În figura 6.88 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1\ max} =32$ MPa

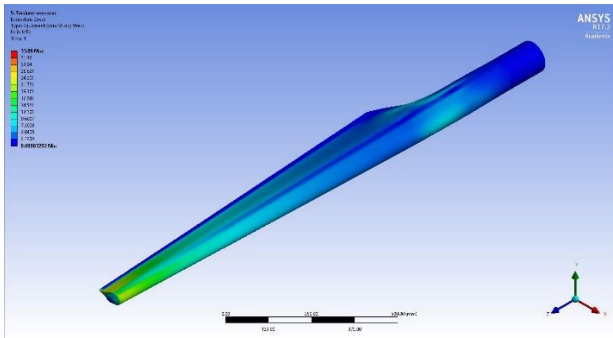


Fig 6.85 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises-vedere izometrica intrados-extrados

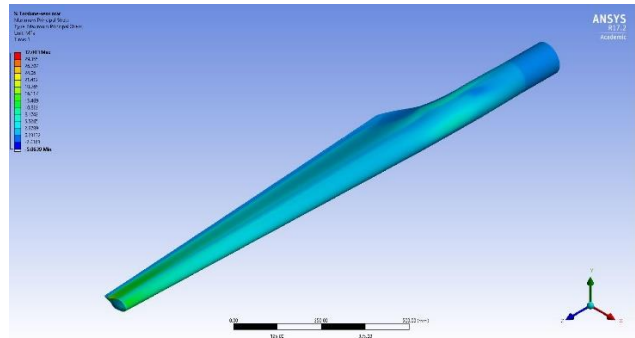


Fig 6.86 Harta tensiunilor principale maxime - vedere izometrica pe direcția intrados-extrados

- Solicitarea la răsucire în sens antiorar

În figura 6.89 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises maxime $\sigma_{ech\ max}=33,88$ MPa.

În figura 6.90 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1\ max} =31,88$ MPa

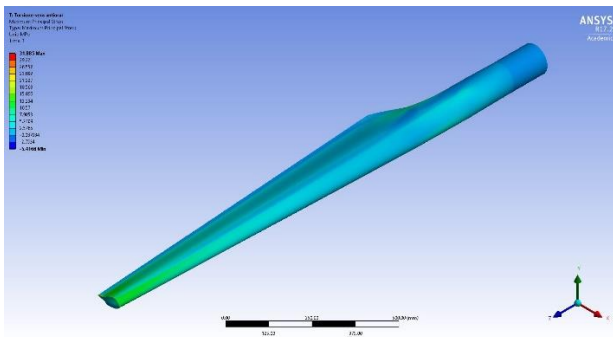


Fig 6.87 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises-vedere izometrica intrados-extrados

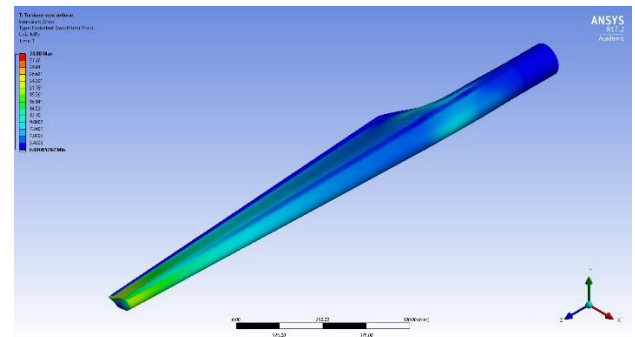


Fig 6.88 Harta tensiunilor principale maxime - vedere izometrica pe direcția intrados-extrados

- Solicitarea de încovoiere cu răsucire sens antiorar

În figura 6.91 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises maxime $\sigma_{ech\ max}=47,73$ MPa.

În figura 6.92 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_{1\ max} =34,29$ MPa

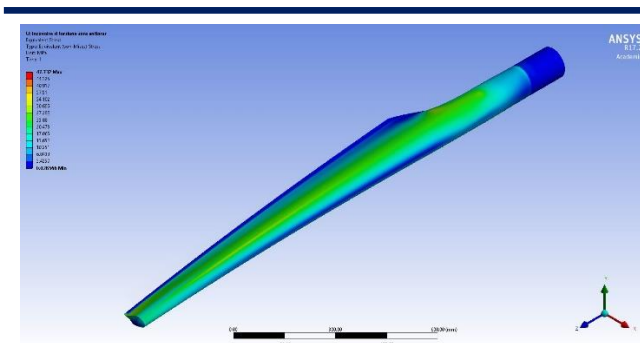


Fig 6.89 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises-vedere izometrica intrados-extrados

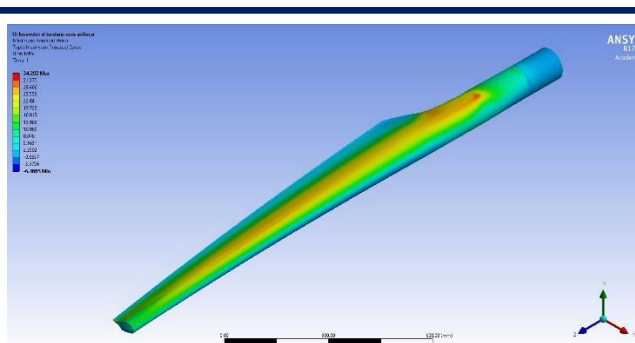


Fig 6.90 Harta tensiunilor principale maxime - vedere izometrica pe direcția intrados-extrados

- Solicitarea de încovoiere cu răsucire sens orar

În figura 6.93 se prezintă distribuția tensiunilor echivalente von Mises maxime $\sigma_{ech\ max}=49,13\ MPa$.

În figura 6.94 se prezintă distribuția tensiunilor principale maxime, $\sigma_1\ max =39,99\ MPa$

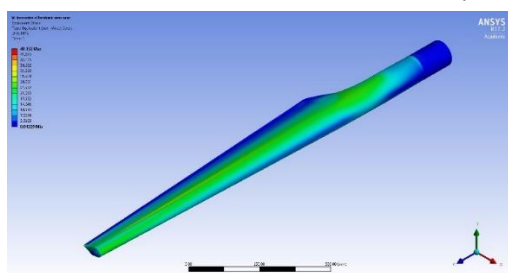


Fig 6.91 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises-vedere izometrica intrados-extrados

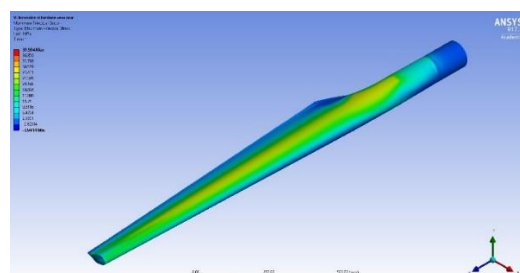


Fig 6.92 Harta tensiunilor principale maxime - vedere izometrica pe direcția intrados-extrados

În tabelul 6.9 se prezintă erorile relative obținute pentru tensiunile maxime von Mises, obținute experimental și prin AEF.

Solicitare	σ_{exp} von Mises [MPa]	σ_{AEF} von Mises [MPa]	Eroare [%]
Încovoiere	6,43	7,09	10,26
Răsucire	30,96	33,88	9,4
Solicitare compusă	43,79	47,73	8,9

6.8 Concluzii generale la capitolul 6

1. Traductoarele 1 și 2 au fost poziționate la distanță a fost de 1620 mm iar pentru traductoarele 3 și 4 distanța a fost de 230mm față de punctul de aplicare al forței. Achizițiile de date s-au efectuat în ambele sensuri, respectiv atât la încărcare cât și la descărcare;
2. -La solicitările simple valorile tensiunilor sunt, în general, mai mici decât la solicitările compuse;
3. -Tensiunile la răsucire sunt, în general, mai mici decât tensiunile la încovoiere;

-
4. În ceea ce privește solicitarea de încovoiere, lanțurile tensometrice au fost poziționate astfel: L1, L2 și L3 pe intrados, unde tensiunile datorate încovoierii sunt de tracțiune, L4 este amplasat pe extradados, unde tensiunile datorate încovoierii sunt de compresiune;
 5. Se constată că, la solicitarea de încovoiere pentru rozetele din același lanț, valorile maxime ale tensiunilor de același tip sunt apropiate;
 6. În cazul solicitării de răsucire atât în sens orar și antiorar, variațiile celor trei tensiuni sunt similare;
 7. Se constată că valorile tensiunii normale principale maxime obținute pentru toate rozetele din cadrul lanțului 1 la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune sens orar sunt mai mari decât valorile obținute la celelalte lanțuri;
 8. Se constată că valorile tensiunii normale principale maxime obținute pentru toate rozetele din cadrul lanțului 1 la solicitarea compusă de încovoiere cu torsiune sens antiorar sunt mai mari decât valorile obținute la celelalte lanțuri.

7.1 Concluzii finale

Necesitatea studierii palelor de turbină eoliană supuse solicitărilor din exploatare, precum și studierea caracteristicilor mecanice și elastice ale materialelor compozite și testarea palelor, respectiv a modelelor de pală a apărut datorită utilizării într-un ritm accelerat a surselor de energie regenerabilă, în primul rând a energiei eoliene. Cercetările teoretice și experimentale au contribuit la cunoașterea proprietăților de material GFRP, a comportamentului structurii palei la diferite tipuri de solicitări care au loc în timpul exploatării.

În cadrul tezei s-a studiat caracteristicile materialului compozit GFRP, care este utilizat la fabricarea palelor de turbină eoliană. Pentru încercările la tracțiune, compresiune și forfecare au fost utilizate epruvete din plăcile cu orientarea fibrelor la $[0^\circ/90^\circ]$ și $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ având grosimea de 4 mm. Încercările la tracțiune au fost realizate analizând caracteristicile de material pe trei direcții din care au fost debitate epruvetele. Au fost debitate longitudinal câte cinci epruvete, transversal și la 45° pe diagonală din placa $[0^\circ/90^\circ]$.

Caracteristicile elastice determinate experimental au fost folosite atât la calculul tensiunilor și direcțiilor principale obținute experimental cu ajutorul rozetelor tensometrice cât și AEF.

S-a studiat influența umidității asupra materialului de tip GFRP care a fost imersat timp de 7, 14, 21 și 31 zile în apă normală și apă sărată. În plus, s-a realizat și o imersie în azot lichid, timp de 4 zile la temperatura inițială de -70°C .

Prin analizele SEM s-au determinat modurile de cedare ale materialului GFRP pe epruvetele care au fost solicitate la tracțiune și respectiv compresiune.

Testele efectuate pe probele CT care au avut ca scop determinarea vitezei de propagare a fisurii și a tenacitatea la fisurare, au avut aceeași orientare a fibrei prezentată anterior, dar grosimea a fost de 10 mm.

Dispersia rezultatelor, în ceea ce privește modul de propagare a fisurilor din creștătura preformată, a variat foarte mult. Acest lucru se întâmplă din cauză că materialul compozit nu este unul omogen, fiind ortotrop, cu straturi de armare dispuse în mod diferit și cu mici defecte de fabricație.

Testarea modelului de pală pe un stand de concepție proprie, s-a făcut atât la solicitări simple (încovoiere și respectiv torsiune), cât și la solicitări compuse (încovoiere cu torsiune). Pe modelul de pală au fost amplasate rozote tensometrice individuale, precum și lanțuri de rozote, în zonele cu tensiunile cele mai mari, indicate prin AEF.

Calibrările au fost făcute prin încărcarea directă a palei cu greutate marcate în scopul determinării diagramelor de calibrare forță- săgeată, respectiv moment de torsiune-unghi de rotire.

Pentru solicitările de mai sus s-au achiziționat date de la patru rozote rectangulare și respectiv de la lanțuri de câte cinci rozote delta. Utilizând metoda indirectă, recomandată de Micro-Measurements Vishay, s-au determinat deformațiile principale și direcțiile lor, respectiv tensiunile principale și direcțiile lor, pentru fiecare rozetă. În acest scop s-au utilizat caracteristicile elastice

determinate experimental în cadrul tezei. S-au calculat erorile relative dintre rezultatele obținute experimental și AEF. Aceste erori nu au depășit 10,26%. Astfel rezultatele experimentale au validat pe cele obținute prin AEF.

Pentru încărcările maxime estimate care apar în timpul funcționării palei, s-a făcut o AEF care a demonstrat că pala rezistă solicitărilor care apar în aceste condiții.

Testarea modelelor de pală în laborator, supuse la încărcări cât mai apropiate de cele care apar în timpul funcționării, este importantă pentru creșterea fiabilității paletelor, deși testele la scară 1:1 nu vor putea fi complet eliminate.

7.2 Contribuții proprii

Principalul obiectiv al tezei a fost realizarea standului experimental care să realizeze solicitarea compusă a unei pale de turbină eoliană fabricată din material compozit.

Prin activitatea de cercetare științifică efectuată, principalele contribuții atât la nivel teoretic, cât și la nivel practic, pot fi sintetizate după cum urmează:

1. Realizarea unui studiu bibliografic actual, referitor la structura paletelor de turbină eoliană și modul de cedare al acestora în timpul funcționării;
2. Realizarea de teste complexe pe diferite direcții ale materialului compozit GFRP;
3. Conceperea unei noi modalități de testare la compresiune;
4. S-au studiat caracteristicile mecanice ale unor probe din GFRP imersate în apă cu diferite concentrații saline și timpi diferiți. Aceleași proprietăți s-au studiat la imersia probelor în azot lichid.
5. Pentru îmbunătățirea conductivității electrice s-a realizat un strat de aur de 7 nm pe suprafață și în secțiune. Scopul a fost acela de a evidenția aspectele clare de rupere a fibrelor și zonele caracteristice pentru analizele de microscopie electronică;
6. Realizarea de teste efectuate pe probe CT prefisurate din GFRP în scopul determinării vitezei de propagare a fisurii și a tenacității la fisurare;
7. Realizarea de determinări defectoscopice pe probele CT prefisurate;
8. Analiza probelor CT pe suprafață la microscopul optic;
9. Conceperea, proiectarea și realizarea standului experimental pentru solicitarea compusă;
10. Automatizarea mișcărilor de rotație și transație cu ajutorul motoarelor pas cu pas;
11. S-au prelucrat datele obținute de la mărcile tensometrice montate pe pală, în cadrul celor trei solicitări amintite
12. S-au obținut grafice de variație a tensiunilor normale principale, a tensiunii tangențiale maxime și a unghiului tensiunii normale principale maxime, în raport cu mărimea solicitării care a fost, fie momentul încovoietor, fie momentul de torsiune fie momentul compus, după caz.

7.3 Direcții viitoare de cercetare

Se vor sintetiza și se vor propune o serie de direcții viitoare de cercetare din punct de vedere al perspectivelor teoretice și experimentale. Astfel, cercetările din cadrul tezei pot continua în următoarele direcții:

1. Utilizarea metodei de corelare digitală a imaginii (DIC), pentru determinarea deformațiilor și tensiunilor din epruvetele încercate la încercarea de tracțiune, compresiune;
2. Aprofundarea studiului privind influența temperaturii și a umidității asupra caracteristicilor mecanice și elastice ale materialelor compozite;
3. Studiul comportării la oboseală a epruvetelor plate din GFRP;
4. Caracterizarea cele două tipuri de materiale din punct de vedere structural, pe baza analizelor cu raze X, atât înainte cât și după solicitările statice și dinamice;
5. Teste de impact pe epruvete, plăci din GFRP cu diferite energii și temperaturi;
6. Evaluarea nedistructivă a deteriorărilor prin ultrasunete, raze X și raze gama;
7. Încercarea palei de compozit în regim dynamic, în vederea studierii rezistenței la oboseală;
8. Realizarea și testarea unor plăci de compozit cu diferite grosimi integrând micro-capsule de autoreparare de tip “*self-healing*”;
9. Proiectarea și realizarea unei pale de turbină integrând micro-capsule de autoreparare de tip “*self-healing*” în vederea monitorizării integrității structurale în timpul exploatării;
10. Integrarea în structura palei a unor senzori, în vederea monitorizării integrității structurale și apariției și evoluției deteriorărilor care apar în timpul exploatării;
11. Utilizarea metodelor optice pentru monitorizarea stării de tensiuni și deformații din palele turbinei, în timpul funcționării;
12. Încercarea la încovoiere a palei de turbină eoliană în mai multe secțiuni, făcându-se referire la modul de încărcare la solicitarea de încovoiere a palelor full-scale.

Diseminarea rezultatelor cercetării

Rezultatele științifice obținute în perioada celor 6 ani de studii doctorale, s-a realizat prin publicarea unui număr de **13** articole, **15** premii la târguri de inovație și inventică și **2** cereri de brevet. Lucrările au fost incluse în prezenta lucrare de doctorat.

Articole publicate în reviste cotate ISI (WOS)

1. V. Goanță, C. Morăraș, I. Blanari, Device for Testing at Combined Cyclic Fatigue Loading by Tensile and Torsion, Attachable to the Universal Testing Machine, Experimental Techniques, 46(1), pp. 179-186 <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00471-3> (IF=**1.6**)
2. Viorel Goanta, Corneliu Munteanu, Sinan Müftü, Bogdan Istrate, Patricia Schwartz, Samuel Boese, Gehn Ferguson and Ciprian Ionut Morăraș, Evaluation of the Fatigue Behaviour and Failure Mechanisms of 52100 Steel Coated with WIP-C1 (Ni/CrC) by Cold Spray, Materials 2022, 15(10), 3609; <https://doi.org/10.3390/ma15103609> (IF=**3.4**).
3. Ciprian Ionut Morăraș , Viorel Goanță, Bogdan Istrate ,Corneliu Munteanu and Gabriel Silviu Dobrescu, Structural Testing by Torsion of Scalable Wind Turbine Blades, Polymers 2022, 14(19), 3937. <https://doi.org/10.3390/polym14193937> (IF=**5.0**)
4. Viorel Goanta, Corneliu Munteanu, Sinan Müftü, Bogdan Istrate, Patricia Schwartz, Samuel Boese, Gehn Ferguson, Ciprian-Ionut Moraras and Adrian Stefan, Evaluation of the Fatigue Behavior and Failure Mechanisms of 4340 Steel Coated with WIP-C1 (Ni/CrC) by Cold Spray, Materials 2022, 15 (22), 8116. <https://doi.org/10.3390/ma15228116> (IF=**3.4**)
5. Ciprian Ionut Morăraș , Viorel Goanță, Dorin Husaru, Bogdan Istrate , Paul Doru Barsanescu and Corneliu Munteanu, Analysis of the Effect of Fiber Orientation on Mechanical and Elastic Characteristics at Axial Stresses of GFRP Used in Wind Turbine Blades, Polymers 2023, 15(4), 861; <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/4/861> (IF= **5.0**)
6. Marius MIHAILA, Ciprian Ionut MORARAS, Igor BLANARI, Paul Doru BARSANESCU, Viorel GOANTA, TESTING A MODIFIED WEIGH-IN-MOTION SENSOR CROSSED BY DIFFERENT VEHICLES, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering Vol. 65, Issue Special IV, December, 2022 (IF=0)

Articole publicate în reviste indexate BDI

1. C. Morăraș, B. Leitoiu, I. Blanari, L. Andrusca, Compression behaviour study for glass fiberglass-reinforced plastics used in the construction of wind turbine Blades, IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering 997 (2020), doi:10.1088/1757-899X/997/1/012099
2. C. Morăraș, P D Barsanescu, C A Tugui, Some aspects regarding the influence of humidity on the tensile characteristics of GFRP composite material, IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering 997 (2020), doi:10.1088/1757-899X/997/1/012100
3. I Blanari, V Goanță, M Alexandrov, C. Morăraș, Influence of wear on the distribution of pressure and the state of tension at wheel-rail interface, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 997 (2020), doi: 10.1088/1757-899X/997/1/012097
4. C. Morăraș, D E Husaru, Structural changes of GFRP composite material after immersion in liquid nitrogen and normal water, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1262 (2022) 012055, doi:10.1088/1757-899X/1262/1/012055.
5. V Goanta, C. I. Moraras, Vickers Hardness Variation on the Part and Welding Cord Subjected to Plastic Deformation, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1262 (2022) 012050, doi:10.1088/1757-899X/1262/1/012050
6. C. Morăraș, C. A. Tugui, R. Steigmann, P. D. Barsanescu, B. Leitoiu, V. Goanta, Mechanical Testing of GFRP Composite Materials Used in Wind Turbine Blades Construction, Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vol. 1157, pp 142-148
7. M Mihaila, P Barsanescu and C. Morăraș WEIGH-IN-MOTION SENSORS AND TRAFFIC MONITORING SYSTEMS State of the Art and Perspectives, <https://doi.org/10.2478/bipcm-2022-0010>

Premii la târguri de inovație și inventică

- 1 C. Moraras, N. Iftimie, A. Savin, G. Dobrescu, Influence of CE Concentrations in ZR1-XCEXO2 used in medical prostheses, Cadet Inova 2019, Marele Premiu al Juriului – CUPA "Cadet INOVA'19"
- 2 G.DOBRESCU, C. Moraras, N. Iftimie, A. Savin, Structural health monitoring of critical zones of scalable wind turbine blades, Cadet Inova 2019, Premiul Societatilor Comerciale "Cadet INOVA'19"
3. C. Moraras, N. A. Danila, A. Savin, Wind turbine blade behavior at complex loadings, The IIIrd International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, June 18 – 20, 2019 (medalia de argint)
4. C. Morăraș, V. Goantă, L. Andruscă, Mechanical behavior analysis on three directions composite materials made of GFRP fiberglass, The Vth International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, May, 28 - 29, 2021 (medalia de aur)
5. C. Morăraș, V. Goantă, P. Barsanescu, D. Chiriță, Design and construction of a wind turbine blade testing stand for complex loads The VIth International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, July 10 - 12, 2022 (medalia de aur)
6. G.Muraru, E.Răileanu, C. Morăraș, Analiza deformațiilor specifice pe grinda de egală rezistență, The VIth International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, July 10 - 12, 2022 (medalia de argint)
7. Ciprian Morăraș, Viorel Goanță, Paul – Doru Bârsănescu, Device for the experimental study of shear properties of materials anizotrope, The VII th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, July 7 - 9, 2023 (medalia de aur)
8. Ciprian Morăraș, Viorel Goanță, Paul – Doru Bârsănescu, Device for the experimental study of shear properties of materials anizotrope, The VII th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, July 7 - 9, 2023 (diploma de excelență din partea Cadet Inova 23/ICE-USV 23 Exhibition)
9. Ciprian Morăraș, Radu Octavian Sandu, Studiul și achiziția deformațiilor specifice utilizând ESP32, The VII th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, July 7 - 9, 2023 (medalia de argint)
9. Ciprian Ionut MORARAS, Ionut MITITELU, Gabriel Silviu DOBRESCU, Carbon fiber reinforced polymers with epoxy matrix behavior under tensile and shear tests, Cadet Inova 2024, Medalia de AUR a Salonului "Cadet INOVA'24" cu Felicitările Juriului
10. Ciprian Ionut MORARAS, Ionut MITITELU, Gabriel Silviu DOBRESCU, Carbon fiber reinforced polymers with epoxy matrix behavior under tensile and shear tests, Cadet Inova 2024, Special Prize „Prof. Ioan CURTU” Technical Sciences Academy of Romania, Brașov Branch
11. Ciprian Ionut MORARAS, Ionut MITITELU, Gabriel Silviu DOBRESCU, Carbon fiber reinforced polymers with epoxy matrix behavior under tensile and shear tests, Cadet Inova 2024, Premiu de Excelenta din partea URBAN INCD INCERC
12. Ciprian Morăraș, Ionut MITITELU, A new concept compression test of GFRP specimen, The VIII th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, 31May – 2 June, 2024 (medalia de aur)
13. Ciprian Morăraș, Ionut MITITELU, A new concept compression test of GFRP specimen, The Silver medal of the "Cadet INOVA 24" "ICE -USV 24"
14. Ionut MITITELU, Ciprian Morăraș, Rozina Steigmann, Nondestructive testing of composites with multiple layers, The VIII th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, 31May – 2 June, 2024 (medalia de argint)
15. Catalin Tugui, Gabriel Dobrescu, Ciprian Morăraș, Analysis of the mechanical properties of an automotive injector coated with a thin hard coat, The VIII th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV) Suceava, ROMANIA, 31May – 2 June, 2024 (medalia de aur).