

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"**

**DIN IAȘI**

**Facultatea de Mecanică**

**Școala doctorală**



**Studii și cercetări privind comportarea cablurilor de  
încărcare pentru autovehicule electrice în condiții de solicitare  
mecanică și termică**

**Rezumat**

**Ing. Elena Roxana Cosău**

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

IAȘI, 2025

# Capitolul I. Considerații generale privind evoluția materialelor și standardele aplicabile cablurilor de încărcare pentru vehicule electrice

## Introducere

Mobilitatea electrică a devenit o necesitate în contextul creșterii consumului energetic din orașe. Orașele ocupă puțin spațiu, dar consumă multă energie și generează emisii mari de CO<sub>2</sub>. Acest lucru a determinat industria auto să caute soluții cu eficiență mai mare și cu emisii reduse. Vehiculele electrice sunt o soluție importantă. Dezvoltarea lor a creat nevoia de cabluri sigure și stabile. Cablurile funcționează în condiții reale de temperatură, umiditate și solicitare mecanică. Comportarea lor influențează siguranța și durata de viață a întregului sistem de încărcare.

### 1.1 Evoluția plasticului în industria automotive

Materialele plastice au fost introduse în industria auto datorită greutății reduse și flexibilității mari. Apariția termoplasticelor în anii 1970 a schimbat modul de proiectare a componentelor, vezi *figura 1.1*. Materialele plastice au înlocuit treptat elemente metalice deoarece se procesează ușor și au proprietăți mecanice bune. Dezvoltarea polimerilor avansați a crescut utilizarea lor în construcția autovehiculelor. Vehiculele moderne includ multe componente realizate din materiale plastice. Reducerea greutății îmbunătățește consumul și performanța.

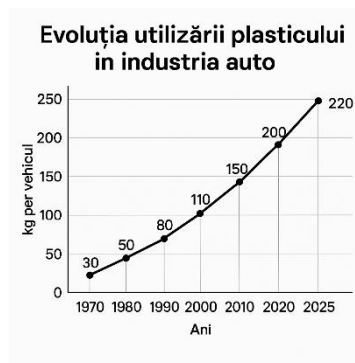


Figura 1. 1 Evoluția în ani a utilizării materialelor plastice la autovehicule

### 1.2 Tipuri de materiale plastice

În industria auto sunt utilizate multe tipuri de polimeri. Fiecare material are proprietăți clare care influențează utilizarea lui în vehicul. PP are rezistență chimică ridicată. PUR este folosit pentru confort. PVC oferă rezistență la substanțe chimice și la flacără. ABS este rezistent la impact. PA are rezistență mecanică bună. PC oferă transparență și durabilitate. Materialele sunt selectate în funcție de solicitările termice și mecanice, *figura 1.2*.



### 1.5 Moduri de încărcare a mașinilor electrice

Încărcarea de nivel 1 folosește o priză obișnuită. Încărcarea de nivel 2 este mai rapidă și folosește echipament dedicat. Nivelul 3 folosește curent continuu și permite încărcarea rapidă.

### 1.6 Cablurile de încărcare pentru mașini electrice, necesitatea și obiectivele temei propuse

Cablurile EV sunt componente esențiale ale infrastructurii. Cablul trebuie să fie flexibil, rezistent și sigur. Este expus la temperaturi extreme și la solicitări mecanice.

Ștecherul se conectează la stația de încărcare, *figura 1.6*.



Figura 1. 6 Ștecher pentru încărcarea mașinilor electrice

Cupla se conectează la vehicul, *figura 1.7*.



Figura 1. 7 Cuplă pentru încărcarea mașinilor electrice

Cablul transportă energia între stație și vehicul, *figura 1.8*.



Figura 1. 8 Cablu cu ștecher și cuplă

Instrucțiunile de utilizare ajută la folosirea corectă a produsului, *figura 1.9*.

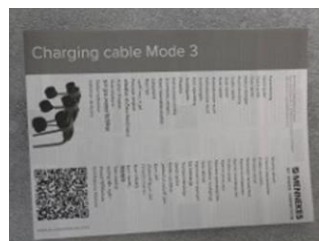


Figura 1. 9 Instrucțiuni de utilizare

Structura internă include conductorii, izolatorul, banda, umplutura și învelișul, *figura 1.10*.



*Figura 1. 10 Cablu secționat – modele*

### *1.7 Teste și standarde aplicabile în industria utilizării cablurilor de încărcare*

Cablurile EV respectă standarde internaționale precum EN 50620, IEC 62893 și UL 62. Standardele stabilesc intervale de temperatură, cerințe electrice și rezistență mecanică.

### *1.8 Concluzii generale Capitolul 1*

Capitolul oferă baza teoretică pentru analiza experimentală. Prezintă contextul, materialele plastice, tipurile de vehicule, încărcarea și structura cablului.

## Capitolul II. Studii proprii și studii din literatura de specialitate asupra cablului de încărcare pentru autovehiculele electrice privind încercările și determinările acestuia

### 2.1 Testarea cablurilor la temperaturi extreme

Cablurile au fost testate în cuptorul climatic pentru a observa comportarea la temperaturi scăzute și ridicate, *figura 2.1*. Intervalul a fost între  $-40^{\circ}\text{C}$  și  $+90^{\circ}\text{C}$ . Cablurile au fost poziționate astfel încât aerul cald sau rece să circule uniform în jurul lor.



*Figura 2. 1 Poziționarea cablurilor în simulatorul de temperatură cu șocuri*

La temperaturi scăzute s-au observat urme albe pe suprafața cablului, *figura 2.2*. Aceste urme indică tensiuni în material care apar din cauza rigidizării.



*Figura 2. 2 Urme albe pe suprafața ștecherului, rezultat al înghețării*

La temperaturi ridicate s-a observat o modificare a culorii în unele zone ale învelișului, *figura 2.3*. Acest lucru arată o sensibilitate a materialului la expunerea termică.



*Figura 2. 3 Deteriorarea cablului prin modificarea culorii*

### 2.2 Testarea rezistenței la smulgere

Cablul a fost supus unui test de smulgere cu o forță de aproximativ 60 N. Testul verifică dacă conductorii rămân fixați în ștecher în condiții de solicitare mecanică, *figura 2.4*.



*Figura 2. 4 Test de rezistență prin aplicarea unei forțe de tragere (încercare de a îndepărta cablul de ștecher)*

După testul mecanic s-a verificat continuitatea electrică a fiecărui conductor cu un multimetru. Rezultatele au confirmat că nu au existat întreruperi, *figura 2.5.*



*Figura 2. 5 Testare cu multimetru pentru verificarea continuității*

### *2.3 Cercetare privind simularea fenomenelor de precipitații*

Cablul a fost testat într-o incintă de simulare a ploii timp de 240 ore. Picăturile de apă au fost distribuite uniform pe suprafața cablului. Testul verifică rezistența la umezeală și stabilitatea învelișului.



*Figura 2. 6 Testarea cablurilor privind simularea fenomenelor de precipitații*

### *2.4 Investigarea comportamentului mecanic și termic al polimerului TPU utilizat în învelișul cablurilor pentru vehicule electrice*

Studiul realizat de Tanaka și Fujimoto a evaluat comportamentul mecanic și termic al TPU utilizat în mantalele cablurilor EV. Autorii au analizat modul în care ciclurile termice, îndoirile repetate și testele dielectrice modifică rezistența la tracțiune, alungirea la rupere și conductivitatea electrică. Rezultatele au arătat scăderi moderate ale proprietăților mecanice și

o ușoară reducere a tensiunii de pătrundere, însă TPU își menține funcționalitatea după solicitări severe.

### *2.5 Efectul îmbătrânirii termice asupra XLPE pentru izolația cablurilor auto și EV*

Studiul lui Zhang și Gao a analizat îmbătrânirea termică a XLPE utilizat ca izolație în cablurile auto și EV. Expunerea la temperatură ridicată pentru perioade lungi a dus la scăderea rezistenței la tracțiune, reducerea alungirii la rupere și apariția microfisurilor vizibile la microscopul SEM. Rezistența dielectrică a scăzut după 1000 ore la 120 grade Celsius, confirmând sensibilitatea XLPE la oxidare termică.

### *2.6 Comportamentul la tracțiune și oboseală al polipropilenei modificate pentru cabluri auto*

Studiul lui Lee și Kim a evaluat comportamentul la tracțiune și oboseală al polipropilenei modificate pentru cabluri auto. Materialul a prezentat rezistență bună la tracțiune și alungire ridicată. După 50.000 de cicluri de îndoire și 300 de cicluri termice, materialul a păstrat un procent mare din proprietățile inițiale, ceea ce arată o bună stabilitate mecanică în utilizarea reală.

### *2.7 Investigarea rezistenței mecanice și termice a compozitelor PVC pentru cabluri EV*

Studiul lui Hassan și Ismail a investigat compozitele PVC utilizate la învelișul cablurilor EV. Proprietățile mecanice și termice depind de tipul și concentrația aditivilor. Probele cu formulări optimizate au reținut o mare parte din rezistența mecanică după îmbătrânire termică și au prezentat o stabilitate termică crescută, ceea ce le face adecvate pentru aplicații EV solicitante.

### *2.8 Modelarea experimentală a comportamentului dielectric și mecanic al cablurilor EV în mediu umed și temperaturi variabile*

Müller și Schneider au evaluat cabluri EV expuse la umiditate ridicată și cicluri termice. Umiditatea combinată cu variațiile de temperatură a determinat scăderi ale rezistenței la tracțiune, reduceri ale alungirii la rupere și diminuarea rezistenței dielectrice. Rezultatele au arătat că mediile umede accelerează degradarea materialelor.

### *2.9 Studiul Tanaka & Fujimoto (2019)*

Tanaka și Fujimoto au realizat un al doilea studiu privind TPU, în care au evaluat comportamentul materialului după cicluri termice, îndoire repetată, abraziune și expunere UV. TPU a menținut rezistența mecanică, flexibilitatea și stabilitatea electrică, cu scăderi moderate după testare. Materialul a prezentat o bună rezistență UV și comportament stabil la torsiune.

### *2.10 Studiul Zhang, Xu & Zhao (2023)*

Zhang, Xu și Zhao au comparat PVC, TPU și TPE pentru mantalele de cabluri EV. TPU a prezentat cea mai bună stabilitate UV și cele mai mici variații dimensionale. TPE a fost stabil mecanic, dar sensibil la temperaturi scăzute. PVC a înregistrat degradări rapide în exterior. Studiul confirmă avantajele TPU pentru aplicații exterioare.

### *2.11 Studiul Kumar, Patel & Sinha (2020)*

Kumar, Patel și Sinha au analizat comportamentul dielectric și termic al XLPE în aplicații de înaltă tensiune și încărcare rapidă. XLPE și-a păstrat rigiditatea dielectrică până la aproximativ 110 grade Celsius. La temperaturi mai mari, s-a observat degradare prin oxidare. Materialul este potrivit pentru izolație electrică, dar nu este recomandat pentru cabluri flexibile.

### *2.12 Studiul Bhatia & Rao (2021)*

Bhatia și Rao au investigat TPE în cicluri termice și umiditate ridicată. Materialul a prezentat scăderi ale alungirii, creșteri ale durității și absorbție de apă, ceea ce a produs mici variații dimensionale. TPE a demonstrat stabilitate bună la îmbătrânire, dar este sensibil la umiditate.

### *2.13 Studiul Sharma, Singh & Dutta (2021)*

Sharma, Singh și Dutta au modelat comportamentul termic al cablurilor EV în încărcare rapidă. Cablurile cu mantale TPU au prezentat o creștere mai redusă a temperaturii față de cablurile cu PVC. TPU a asigurat o distribuție termică mai uniformă și risc mai mic de supraîncălzire.

### *2.14 Studiul Wang, Li & Chen (2022)*

Studiul lui Wang, Li și Chen a analizat TPU modificat cu grafen. Adăosul de grafen a crescut conductivitatea termică, a redus temperatura maximă în regim de încărcare și nu a diminuat proprietățile mecanice. Materialul este promițător pentru cabluri EV de mare curent.

### *2.15 Studiul Torres, Navarro & Silva (2021)*

Torres, Navarro și Silva au evaluat degradarea UV a TPU și TPE în condiții reale. TPU a pierdut un procent redus din rezistența la tracțiune, în timp ce TPE a înregistrat o degradare mult mai mare. TPU a demonstrat cea mai bună stabilitate UV pe termen lung.

### *2.16 Concluzii generale capitolul II*

Concluziile generale ale capitolului arată că materialele testate prezintă comportamente diferite în funcție de temperatură, solicitări mecanice, umiditate și expunere UV. Testele realizate au confirmat că TPU își păstrează proprietățile în majoritatea scenariilor severe, XLPE este stabil dielectric la temperaturi ridicate, însă se degradează mecanic în timp, PP modificat are o bună rezistență la oboseală, iar PVC prezintă limitări la temperaturi ridicate și mediu

exterior. Datele experimentale indică faptul că selecția materialului pentru cablurile EV trebuie să țină cont de scenariile reale de exploatare și că TPU rămâne cea mai robustă opțiune pentru mantalele flexibile.

## Capitolul III. Modul de concepere, proiectare și realizare a dispozitivului de încercare de tracțiune asupra cablurilor

### 3.1 Cercetare privind dezvoltarea unui dispozitiv de încercare la tracțiune pentru cabluri

Dispozitivele existente pentru testarea cablurilor la tracțiune prezintă limitări în alinierea corectă a axei cablului cu direcția de solicitare. În majoritatea echipamentelor comerciale, cablul este fixat direct în bacuri. Această fixare produce frecvent ruperi premature ale învelișului. Fenomenul apare deoarece zona de contact dintre cablu și bac nu permite distribuirea uniformă a forței. În multe cazuri, cablul alunecă din prindere înainte de apariția cedării reale a conductorilor. Acest lucru conduce la rezultate experimentale inexacte.

În literatura tehnică sunt descrise dispozitive care folosesc cleme metalice rigide, plăci de presiune sau sisteme cu role. Problema comună este necesitatea utilizării unor cabluri lungi. Aceasta apare pentru a permite trecerea cablului peste mai multe role înainte de strângerea finală. De asemenea, atunci când se testează fire de diametre diferite pe același dispozitiv, apare excentricitatea solicitării. Această excentricitate modifică direcția reală a efortului aplicat. Rezultatul este o deformare neuniformă și o interpretare greșită a modului de cedare. Toate aceste observații au constituit baza necesității dezvoltării unui dispozitiv nou.

Obiectivul principal a fost obținerea unei prinderi stabile, repetabile și fără excentricitate. Dispozitivul proiectat elimină necesitatea utilizării unor lungimi mari. Designul permite montarea rapidă a probelor și reduce timpul total de pregătire. În plus, dispozitivul urmărește eliminarea punctelor de presiune excesivă.

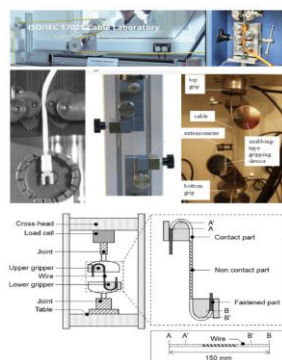
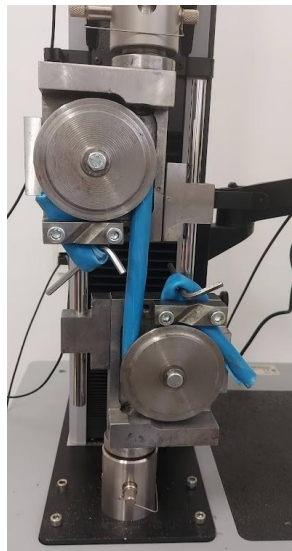


Figura 3. 1 Diferite tipuri de dispozitive

Pentru validarea conceptului, au fost analizate dispozitivele existente din industriile electrice și mecanice. Acest studiu comparativ a evidențiat punctele critice la care trebuia acordată atenție. Au fost identificate trei probleme: prinderea instabilă, alunecarea cablului și ruperile premature. Pe baza acestor observații a fost stabilită o listă de cerințe. Dispozitivul trebuia să asigure ghidarea cablului, adaptabilitatea la diametre diferite și eliminarea eforturilor transversale.

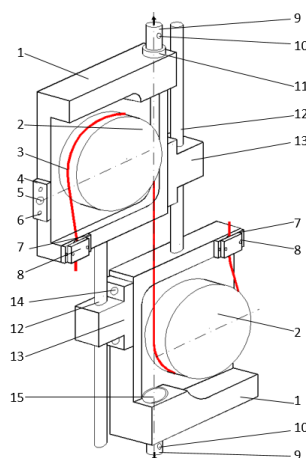
### 3.2 Descriere dispozitiv de tracțiune

Dispozitivul descris în cadrul acestui capitol, *figura 3.2* (vedere de ansamblu), se utilizează pentru încercarea la tracțiune monoaxială a firelor, cablurilor, sârmelor sau ale altor asemenea componente flexibile.



*Figura 3. 2 Vedere de ansamblu a dispozitivului*

Pentru încercarea cablurilor/firelor la tracțiune s-a conceput, proiectat și realizat un dispozitiv al cărui desen de ansamblu se prezintă în *figura 3.3*:



*Figura 3. 3 Desenul de ansamblu al dispozitivului de încercat sârme/cabluri/fire*

Dispozitivul dezvoltat este format din două semi-dispozitive montate în bacurile mașinii de încercare. Fiecare semi-dispozitiv include o rolă metalică peste care se trece cablul. Această rolă are rolul de a prelua o parte din tensiune prin frecare. Cablul este apoi fixat într-o bridă specială. Rolul bridelor este de a preveni alunecarea fără a deteriora suprafața cablului. Rolarea cablului reprezintă un avantaj major. Prin această metodă, tensiunile sunt distribuite progresiv. Nu mai există un punct unic în care cablul suportă întreaga presiune.

Dispozitivul funcționează pe un principiu simplu. Forța aplicată este transmisă de-a lungul cablului prin frecare. Această frecare reduce sarcina directă din zona de prindere. Rezultatul este o solicitare uniformă în zona testată. Dispozitivul poate fi adaptat pentru cabluri de diametre variate. Schimbarea rolor se face rapid. De asemenea, poziția bridelor poate fi ajustată în funcție de lungimea probei. Întregul sistem poate fi montat și demontat fără modificări mecanice ale mașinii de încercare. Acest lucru permite efectuarea unui număr mare de teste în intervale scurte de timp.

### *3.3 Caracteristicile cablurilor solicitate*

Cablurile utilizate au fost selectate astfel încât să acopere diametre diferite. Structura internă include conductori din cupru cu configurații variate. Fiecare conductor este izolat individual. Peste acești conductori există un strat exterior realizat dintr-un material polimeric flexibil. Acest strat joacă un rol esențial în absorbția deformărilor locale.

Firele din interior sunt răsucite pentru a permite o flexibilitate ridicată. Structura răsucită distribuie tensiunile în mod diferit. În timpul testării la tracțiune, conductori se întind în mod controlat. Straturile interioare sunt supuse la eforturi diferite față de învelișul exterior. Acest lucru justifică analiza separată a fiecărui strat. Diametrul total al cablului influențează modul de deformare. Cablurile groase au o rigiditate mai mare. Analiza acestor diferențe este esențială pentru înțelegerea comportării mecanice.

### *3.4 Rezultate obținute la încercarea de tracțiune a cablurilor*

Testele inițiale au arătat probleme în zona rolor. Alunecarea cablului a condus la măsurători incorecte. Pentru eliminarea acestui fenomen au fost realizate canale semicirculare în role. Aceste canale ghidează cablul. După această modificare rezultatele au devenit stabile, *figura 3.15*.

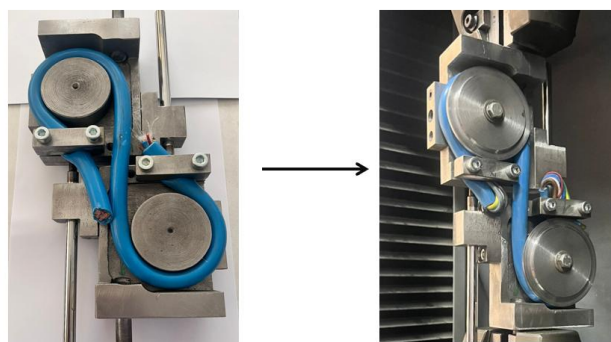


Figura 3. 4 Comparație între configurația inițială și cea modificată a rozelor dispozitivului, evidențiind îmbunătățirile constructive realizate pentru creșterea stabilității cablului în timpul testării.

Cu ajutorul fișierului de date descărcat de la mașina de încercat s-au trasat curbele forță-deplasare ( $F-\Delta l$ ) și tensiune-deformație specifică ( $\sigma-\varepsilon$ ) pentru două tipuri de cabluri. În figura 3.16 se prezintă încercarea cablului care, în total, are aproximativ 16 mm în diametru.



Figura 3. 5 Încercarea la tracțiune a cablului de 16 mm

Curba forță-deplasare pentru cablul cu diametrul total de 16 mm este prezentată în figura 3.17. Se constată că la început are loc o creștere a alungirii, la o creștere mică a forței, ca urmare a strângerii cablului pe role și fixării în bacuri; După zona de strângere a cablului de la început se observă că există o zonă aproape liniară însemnând zona elastică, respectiv, la încetarea forței cablul va reveni la forma și dimensiunile inițiale; După zona elastică variația  $F-\Delta l$  se curbează; nu se cunoaște cât din curbura este datorită intrării în zona de deformare plastică a conductorilor din cupru și a cămășilor din polivinil sau/și a desfășurării cablurilor din interior; După această zonă curbă are loc căderea bruscă a forței, în mod repetat, ceea ce denotă cedări ale conductorilor din cupru; În aceste momente nu se constată cedări ale cămășii polivinilice exterioare; ca urmare, este de așteptat ca nici cămășile polivinilice ale cablurilor interioare să nu cedeze înainte de cedarea conductorilor din cupru.

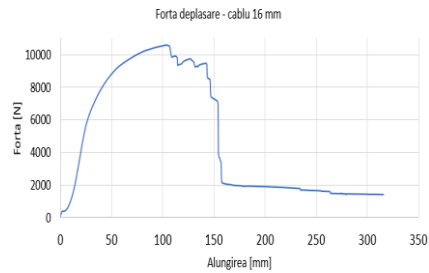


Figura 3. 6 Curba forță-deplasare ( $F-\Delta l$ ) pentru cablul cu diametrul total de 16 mm

În figura 3.18 se prezintă curba tensiune-deformație specifică pentru cablul de 16 mm.

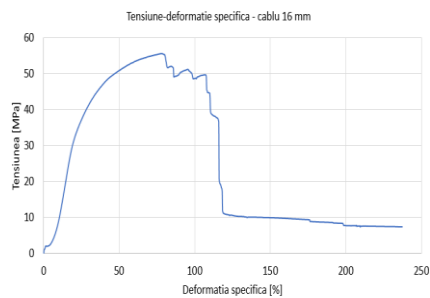


Figura 3. 7 Curba tensiune-deformație ( $\sigma-\varepsilon$ ) specifică - cablul cu diametrul total de 16 mm

Alura curbei tensiune-deformație specifică este aceeași ca variația  $F-\Delta l$ . Tensiunea este calculată după relația  $\sigma=F/A$ , în care pentru arie este considerată suprafața totală cuprinzând conductorii din cupru dar și cămășile polivinilice. Acest lucru este incorect, dar totuși, s-a realizat acest calcul pentru a avea o imagine asupra mărimii aproximative a tensiunii;

În figura 3.19 este prezentată încercarea cablului care, în total, are aproximativ 12 mm în diametru.



Figura 3. 8 Încercarea la tracțiune a cablului cu diametrul total de 12 mm

Curba forță-deplasare pentru cablul cu diametrul total de 12 mm este prezentată în figura 3.20.

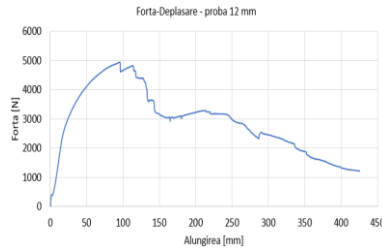


Figura 3. 9 Curba forță-deplasare ( $F-A$ ) pentru cablul cu diametrul total de 12 mm

Se constată că alura acestei curbe este asemănătoare cu cea pentru cablul ce are diametrul total de 16 mm. La partea de început are loc întinderea mai bine a cablului pe role și fixarea în bacuri. După atingerea forței maxime de aproximativ 5kN apar cedări ale conductorilor de cupru, rând pe rând, ce conduce la scăderea în continuu a forței.

Alungirea este dată, în primul rând, de deformarea cămășilor din polivinil. Și alura curbei tensiune-deformație ( $\sigma-\epsilon$ ) specifică (vezi figura 3.21) pentru cablul cu diametrul total de 12 mm este asemănătoare cu cea pentru cablul cu diametrul total de 16 mm. Deși tensiunea este calculată cu relația generală, neaplicabilă aici, utilizând aceeași relație putem face o comparație între cele două tipuri de cabluri. Se constată că pentru cablul cu diametrul total de 12 mm tensiunea maximă este de aprox. 38 MPa în timp ce pentru cablul de 16 mm tensiunea maximă este de aprox. 55 MPa.

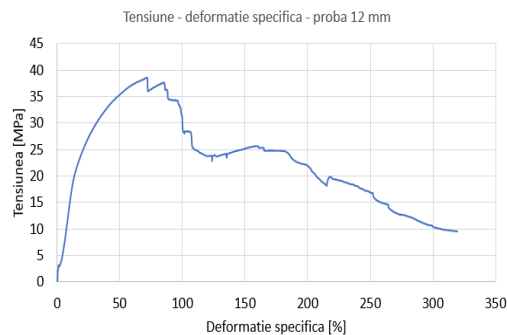


Figura 3. 10 Curba tensiune-deformație ( $\sigma-\epsilon$ ) specifică pentru cablul cu diametrul total de 12 mm

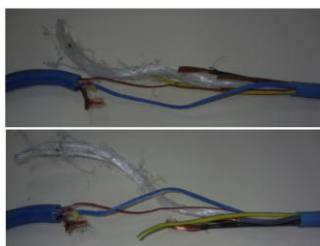
Imagini cu probele după solicitare (vezi figurile, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28)



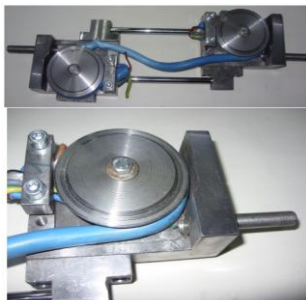
Figura 3. 11 Imagine de ansamblu



Figura 3. 12 Probe rupte cu dispozitivul și probele rupte



*Figura 3. 13 Modul în care arată secțiunea probei după solicitare*



*Figura 3. 14 Modul de rupere al probei cu diametrul total de 16 mm*



*Figura 3. 15 Distrugere fără rupere totală a probei cu diametrul total de 16 mm, capătul de la o rolă și capătul de la cealaltă rolă*



*Figura 3. 16 Modul în care arată secțiunea probei după solicitare*



*Figura 3. 17 Modul de rupere al probei cu diametrul total de 12 mm*

Pentru cablul de 12 mm s-a observat o forță maximă de aproximativ 5 kN. Cablul de 16 mm a rezistat la forțe între 7 și 8 kN. Curbele forță–deplasare au prezentat trei etape distincte. Zona elastică este caracterizată de o creștere liniară a forței. Zona plastică arată o deformare mai mare. Zona de rupere prezintă o scădere abruptă a forței. Aceste curbe confirmă comportamentul ductil al conductorilor.

Învelișul exterior se deformează înaintea conductorilor. Acest comportament arată rolul protector al materialului polimeric. Stratul exterior distribuie tensiunile. În zona în care apare deformarea conductorilor, învelișul prezintă microfisuri. Aceste microfisuri au fost analizate în capitolul următor.

### *3.5 Concluzii generale capitolul III*

Dispozitivul proiectat asigură o solicitare uniformă. Rolarea cablului elimină problemele întâlnite în dispozitivele comerciale. Testele efectuate au evidențiat comportări diferite ale cablurilor. Cablurile groase prezintă o rezistență mai mare. Cablurile subțiri prezintă deformări mai mari. Datele obținute confirmă eficiența dispozitivului. Rezultatele sunt utile pentru analiza AEF și pentru studiile microstructurale.

## Capitolul IV. Micrograful prelevate de pe cămașa exterioră a cablului cu diametrul de 16 mm și 12 mm

### 4.1 Micrograful prelevate de pe cămașa exterioră a cablului cu diametrul de 16 mm

Cablul albastru de 16 mm a fost testat la tracțiune până la rupere. După încercare s-au prelevat eșantioane din zona de rupere și din zone aflate la distanțe de 5, 10, 15, 20 și 25 mm față de această zonă, s-a prelevat și un eșantion dintr-un cablu nesolicitat, în figurile 4.1 și 4.2.



Figura 4. 1 Modul de prelevare a eșantioanelor din cablul cu diametrul exterior de 16 mm culoarea albastru



Figura 4. 2 Modul de prelevare a eșantioanelor din cablul cu diametrul exterior de 12 mm – culoarea galbenă

Pentru materialul nesolicitat s-a observat o uniformitate ridicată a texturii. Urmele longitudinale sunt fine și reprezintă rezultatul procesului de laminare. La magnificări de 200X și 800X apar imperfecțiuni minore, fără legături structurale evidente.

La 5 mm de zona de rupere apar microfisuri și zone de coalescență a materialului. Textura devine neregulată și apar întreruperi ale liniilor de laminare.

La distanțe de 10, 15 și 20 mm numărul microfisurilor scade treptat. La 20 mm aspectul devine aproape identic cu materialul nesolicitat. La 25 mm toate urmele de deformare dispar, arătând că influența solicitării este localizată.

### 4.2 Micrograful prelevate de pe cămașa exterioră a cablului cu diametrul de 12 mm

Cablul galben de 12 mm a prezentat o comportare diferită. Eșantioanele au fost prelevate în aceleași zone. Materialul nesolicitat are o textură fină, dar prezintă mai multe imperfecțiuni decât cablul de 16 mm. Acest lucru indică o rezistență inițială mai redusă.

La 5 mm de zona de rupere apar fisuri pronunțate, care cresc în lungime și lățime comparativ cu cablul de 16 mm. Textura este mult mai rugoasă. La 10 mm defectele persistă, iar la 15 mm se observă propagări ale fisurilor în direcții diferite.

La 20 și 25 mm textura revine la aspectul inițial, însă materialul are o sensibilitate mai mare comparativ cu cablul de 16 mm. Acest lucru confirmă caracterul mai fragil al materialului de 12 mm.

#### 4.3 Descrierea microscopului electronic cu scanare Quanta 200 3D Dual Beam

Microscopul utilizat permite analiza suprafețelor la puteri mari de magnificare, fiind potrivit pentru materialele polimerice. Sistemul combină fasciculul de electroni cu fasciculul de ioni, ceea ce permite secționarea și observarea detaliată a suprafețelor.

Pregătirea probei pentru analiză este importantă, mai ales pentru materialele polimerice. Probele sunt fixate pentru a evita mișcările și sunt examinate la magnificări progresive.

#### 4.4 Rezultate obținute la vizualizarea microscopică

Analiza realizată pe probele din cele două cabluri a evidențiat comportamente distincte. Cablul de 16 mm prezintă deformări localizate, microfisuri fine și o revenire rapidă la o textură uniformă. Acest lucru indică un comportament ductil și o distribuție bună a tensiunilor. Cablul de 12 mm prezintă fisuri pronunțate și propagări neregulate. Textura devine rugoasă rapid, iar microfisurile apar chiar la distanțe mari de zona de rupere.

Procesul de deformare este accelerat, ceea ce confirmă caracterul mai fragil al cablului. Micrografiile arată că degradarea începe la suprafață și progresează spre interior, vezi *figura 4.3*, cu probe din zona de rupere.

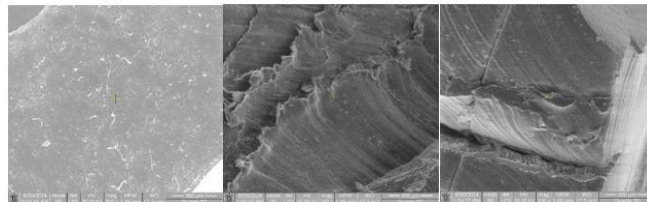


Figura 4. 3 Probele 1,2 și 3 la 200X

Materialul prezintă zone de plastifiere, urme de coalescență și întreruperi ale liniilor de laminare.

#### 4.5 Concluzii generale capitolul IV

Analiza microscopică confirmă diferențele dintre cele două cabluri. Cablul de 16 mm prezintă o structură mai uniformă și suportă mai bine deformările. Cablul de 12 mm prezintă fisuri accentuate și o comportare mai fragilă. Microfisurile apar progresiv, fiind influențate de distanța față de zona de rupere. Datele microscopice sunt în concordanță cu rezultatele mecanice. Cablurile cu diametru mare absorb mai multă energie și prezintă o rezistență mai bună. Cablurile subțiri cedează mai ușor și dezvoltă fisuri extinse.

## Capitolul V. Variația rezistenței electrice pe timpul solicitării la tracțiune

### 5.1 Aparatura și dispozitivele utilizate

În această etapă s-a monitorizat variația rezistenței electrice a conductorului maro din cadrul cablului galben de 12 mm, în timp ce întregul cablu este solicitat la tracțiune. Pentru aceasta s-a realizat un circuit electric în care conductorul maro a fost conectat la aparatura de măsurare și la placa de achiziție de date, *vezi figura 5.1.*

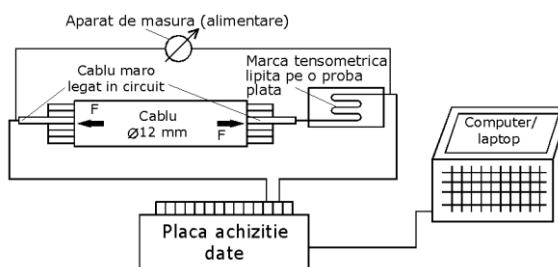


Figura 5.1 Schema de legături electrice pentru achiziția de date

Circuitul include cablul galben, marca tensometrică de 120 ohmi lipită pe o plăcuță din aluminiu, aparatul de măsură utilizat pentru alimentare și verificare, placa NI USB 6009 și laptopul cu Labview. Marca tensometrică a fost introdusă pentru a aduce rezistența totală în domeniul de măsurare al Labview între 100 și 1000 ohmi, *vezi figura 5.2.*

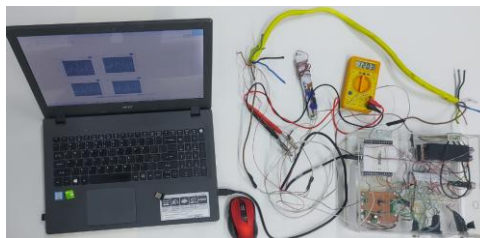


Figura 5.2 Elemente componente și legăturile electrice între acestea.

Pentru fiecare probă, rezistența a fost măsurată înainte de aplicarea efortului. Această valoare este considerată referință. Pe măsură ce efortul aplicat crește, sistemul înregistrează toate modificările electrice și mecanice până la ruperea completă a conductorilor.

### 5.3 Rezultate obținute la cablul galben de 12 mm

Cablul galben a fost montat în dispozitivul de tracțiune proiectat anterior, *figura 5.3a.* Conductorul maro a fost legat la placa de achiziție. În timpul solicitării la tracțiune s-au înregistrat simultan forța, alungirea și rezistența electrică.

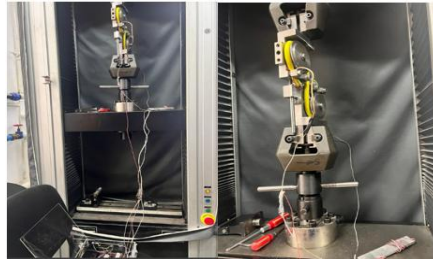


Figura 5. 3 a) Efectuarea încercărilor la tracțiune cu monitorizarea și  
b) achiziția datelor privind rezistența electrică a cablului maro

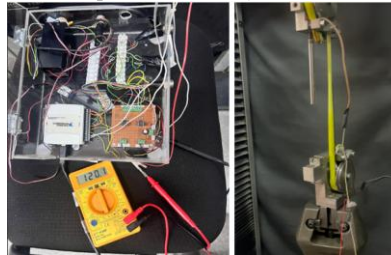


Figura 5. 4 a) Achiziția de date în timpul încercării;  
b) cedarea cablului (zona de gătuire)

Imaginile de mai sus, figura 5.4b, arată modul de fixare pe mașină și monitorizarea în timp real. Înainte de rupere, conductorii prezintă o creștere abruptă a rezistenței. Acest fenomen apare deoarece secțiunea firelor se reduce semnificativ. Conductorii sunt întinși peste limita plastică, iar structura internă începe să se destrame.

### 5.3 Prelucrarea datelor experimentale și concluzii desprinse de la achiziția variației rezistenței electrice

Pe baza datelor achiziționate s-a trasat graficul variației rezistenței electrice în timp, figura 5.5.

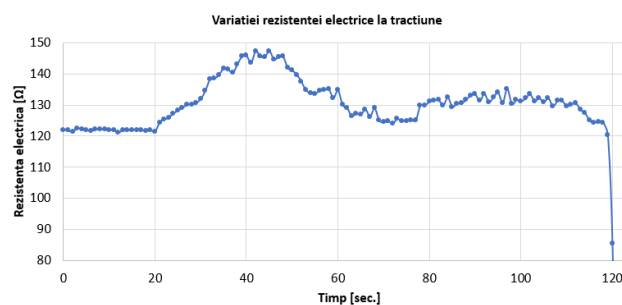


Figura 5. 5 Variația rezistenței cablului/conductorului  
de culoare maro la solicitarea de tracțiune

Rezistența inițială este aproximativ 122 ohmi, datorită celor 120 ohmi din marca tensometrică și câțiva ohmi din cablu. La început valorile sunt constante, deoarece achiziția pornește înaintea încercării. După pornirea tracțiunii rezistența crește cu aproximativ 18 până la 26 ohmi, deoarece lungimea conductorului crește și secțiunea se reduce.

După aproximativ 45 secunde rezistența începe să scadă, semn al ruperii treptate a conductorilor subțiri de cupru.

După aproximativ 120 de secunde toți conductorii subțiri din cablul maro se rup, iar variațiile ulterioare sunt cauzate de atingerile firelor rupte.

Graficul forță rezistență arată creșterea rezistenței până la aproximativ 2000-2500 N, urmată de scăderi datorate ruperilor succesive ale conductorilor. După 5200 N apare scăderea completă a rezistenței, semnalând ruperea finală.

#### *5.4 Concluzii generale capitoul V*

Rezultatele arată că solicitarea la tracțiune influențează direct comportamentul electric al cablului. În faza elastică creșterea rezistenței reflectă alungirea uniformă a conductorilor. După 2000-2500 N rezistența începe să scadă din cauza ruperii firelor subțiri. După 120 secunde conductorii se rup complet și rezistența cade la zero. Curbele forță alungire și forță rezistență confirmă intrarea în domeniul plastic și degradarea accelerată. Monitorizarea rezistenței poate indica defecte interne înainte de ruperea completă. Rezultatele subliniază necesitatea materialelor care oferă stabilitate mecanică și electrică în condiții de solicitare.

## Capitolul VI. Încercări de tracțiune a cablurilor la temperatură ridicată

### 6.1 Scopul și metodologia încercărilor

Experimentele din acest capitol au urmărit evaluarea comportării la tracțiune a cablului de 12 mm în condiții de temperatură ridicată. Obiectivul a fost determinarea modificărilor forței maxime, alungirii și formei curbelor forță alungire în funcție de temperatură. S-a utilizat cablul galben cu diametrul de 12 mm și dispozitivul de tracțiune descris în capitolele anterioare. Cablul a fost montat în dispozitiv, iar dispozitivul a fost fixat în bacurile mașinii de încercat., *figura 6.1*.

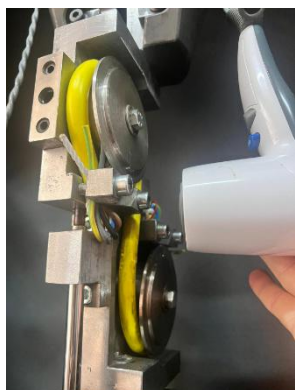


Figura 6. 1 Modul de prindere a cablului în dispozitivul de încercat



Figura 6. 2 Modul de încălzire inițială a cablului

### 6.2 Procedura de încălzire și controlul temperaturii

Încălzirea inițială a cablului s-a realizat cu aprinzătorul prezentat în *figura 6.2*. Încălzirea s-a efectuat prin intermediul rozelor metalice pentru a evita deteriorarea învelișului exterior. După încălzirea inițială, temperatura a fost menținută cu ajutorul unei suflante cu aer cald, conform *figurii 6.3*. Temperatura a fost monitorizată continuu și păstrată în intervalul  $\pm 2$  °C. Temperatura a fost măsurată în zona centrală a cablului. În *figura 6.4* se observă valoarea de aproximativ 78°C înainte de începerea încercării. După pornirea tracțiunii temperatura a scăzut spre aproximativ 72 °C.

### 6.3 Rezultatele încercărilor și analiza curbelor forță–alungire

Datele preluate de la mașina de încercat au permis trasarea curbelor forță alungire pentru patru temperaturi diferite, vezi *figura 6.3*. La temperaturile de 20, 28 și 38°C, curbele păstrează o formă similară. Forța maximă scade, iar alungirea la forța maximă crește. După atingerea maximului apar căderi și reveniri ale forței, precum și paliere unde forța rămâne aproape constantă.

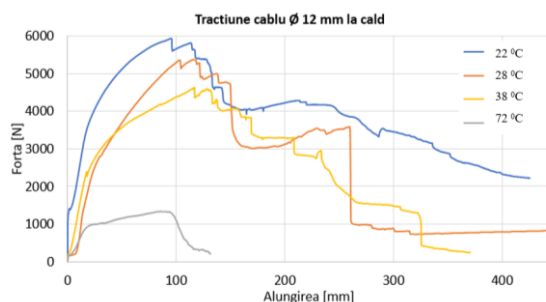


Figura 6.3 Variația forță-alungire pentru patru valori ale temperaturii

Curba la 72<sup>0</sup>C prezintă o panta inițială mai mică și o rigiditate redusă. Deformarea este mai mare la aceeași forță. Forța maximă scade la aproximativ 1330 N. După atingerea maximumului forța scade continuu.

#### 6.4 Concluzii generale capitolul VI

Rezultatele confirmă influența decisivă a temperaturii asupra comportamentului mecanic al cablurilor de încărcare. O creștere a temperaturii duce la reducerea rigidității materialului și la creșterea deformabilității. În intervalul 20 până la 38<sup>0</sup>C, cablul își păstrează proprietățile într-un domeniu acceptabil. Alungirea crește, iar deformările plastice rămân controlate.

La 72<sup>0</sup>C, materialul își pierde stabilitatea mecanică. Forța maximă scade de peste patru ori. Curba forță alungire nu mai prezintă reveniri sau paliere. Cedarea materialului este bruscă. Energia mecanică stocată înainte de rupere este semnificativ mai mică. Materialul nu mai poate absorbi eforturile aplicate.

Temperaturile ridicate reduc siguranța în exploatare. Forțele întâlnite în manipularea normală pot provoca deteriorări interne. Temperatura de lucru trebuie menținută sub 40<sup>0</sup>C în condiții normale de utilizare. Expunerea cablului la surse de căldură trebuie evitată.

Temperatura ridicată afectează simultan rezistența mecanică, energia de deformare și stabilitatea dimensională. Interacțiunea dintre căldură și tracțiune accelerează degradarea materialului. Aceste rezultate justifică utilizarea unor materiale polimerice cu stabilitate termică ridicată și necesitatea efectuării unor verificări periodice pentru cablurile expuse la variații mari de temperatură.

## Capitolul VII. Analiza cu elemente finite a solicitării la tracțiune a cablului cu diametrul exterior de 16 mm

### 7.1 Scopul și metodologia încercărilor

Capitolul prezintă integrarea rezultatelor experimentale anterioare cu modelarea numerică prin elemente finite. Testele de tracțiune realizate pe cablurile de 12 mm și 16 mm, folosind dispozitivul cu role, au furnizat curbele forță–deplasare și tensiune–deformație necesare caracterizării regimului elastic, regimului plastic și secvenței de cedare a conductorilor interni.

Analiza la tracțiune prin solicitare progresivă reproduce comportamentul cablului în condiții controlate. În exploatare însă, cablurile sunt supuse și la șocuri mecanice, impacturi sau loviri accidentale.

Prin combinarea datelor experimentale și a modelării numerice, se poate evalua comportamentul cablului într-o gamă largă de situații mecanice, de la solicitarea lentă la solicitarea bruscă, ceea ce este esențial în contextul aplicării cablurilor în infrastructura vehiculelor electrice.

### 7.2 Materialele utilizate

Probele au fost tăiate la lungime constantă, astfel încât impactul să fie aplicat în zona mediană. Fiecare probă a fost fixată pe suportul aparatului Charpy în aceeași poziție. O parte dintre probe au fost preîncălzite cu flacără controlată.

Analiza cu elemente finite a fost realizată cu firele interioare dispuse în această configurație, *Figura 7.1b*.



a) Imaginea reală

b) Modelarea cu elemente finite

*Figura 7.1 Mănunchiul de fire sub formă de toron*

Condițiile de test au inclus energia pendulului, temperatură ambiantă pentru probele standard și preîncălzire pentru cele expuse la flacără.

Cablurile interioare sunt modelate în configurația reală sub formă de toron, conform *figurii 7.1*. Această geometrie influențează modul de redistribuire a tensiunilor în timpul solicitării. Pe lângă analiza cablului complet, s-au efectuat teste de tracțiune separat pe învelișul exterior, învelișurile interioare, conductorii din cupru și firul textil, *figurile 7.2–7.4*.

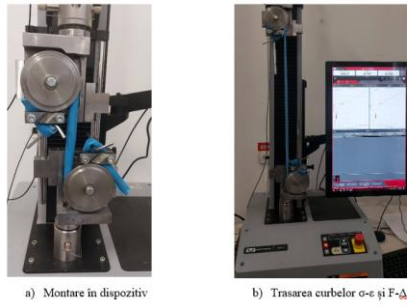


Figura 7. 2 Încercarea la tracțiune a cămășii exterioare

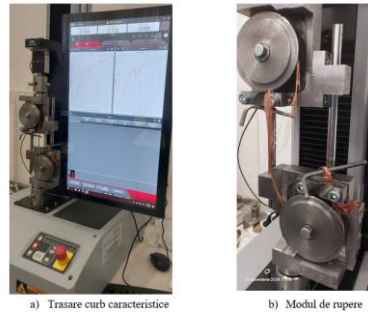
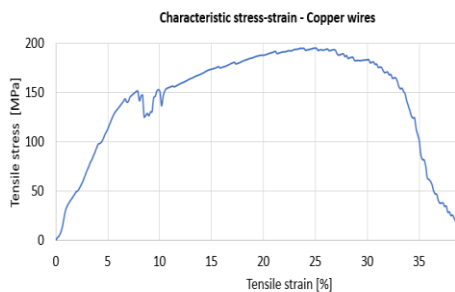


Figura 7. 3 Încercarea la tracțiune a conductorului din cupru

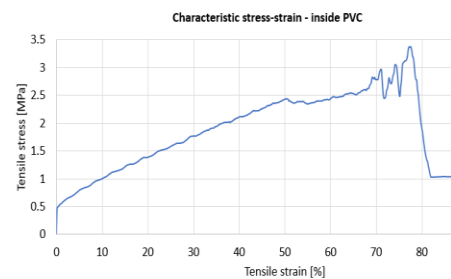


Figura 7. 4 Încercarea la tracțiune a cămășii interioare – montare în dispozitiv

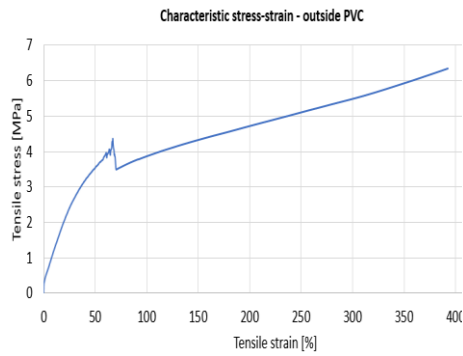
Curbele tensiune–deformație obținute sunt folosite direct în modelul numeric, figura 7.5.



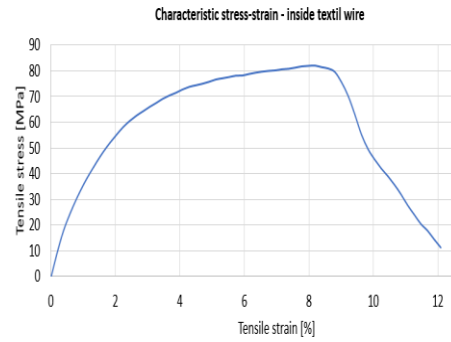
a) Curba specifică tensiune-deformație specifică pentru firele din cupru



b) Curba specifică tensiune-deformație specifică pentru învelișul propilenic interior



c) Curba specifică tensiune-deformație specifică pentru învelișul propilenic exterior



d) Curba specifică tensiune-deformație specifică pentru firul textil central

Figura 7.5 Curbele caracteristice tensiune- deformație specifică

Tabelul 7.1 conține proprietățile mecanice utilizate pentru definirea materialelor în analiza numerică. Proprietățile includ modulul lui Young, coeficientul lui Poisson, limitele de curgere și modulele tangențiale pentru cupru, învelișurile din PVC, firul textil și oțelul rozelor. Aceste caracteristici permit modelarea reală a comportamentului fiecărei componente.

Tabelul 7.1 Caracteristicile de material utilizate în analiza cu elemente finite

Material	Modulul lui Young (Mpa)	Coeficientul lui Poisson	Limita de curgere (Mpa)	Modulul tangent (Mpa)
Cupru	4045	0.34	150	266
Înveliș exterior (manta/jachetă exterioară)	810	0.44	4	120
Material interior (manta interioară)	845	0.42	2.91	7
Fir textil	4365	0.36	35	820
Oțel	$2.1 \cdot 10^5$	0.30	360	4400

Figura 7.6 prezintă modul de discretizare a conductorilor, a învelișurilor și a părții de roată metalică.

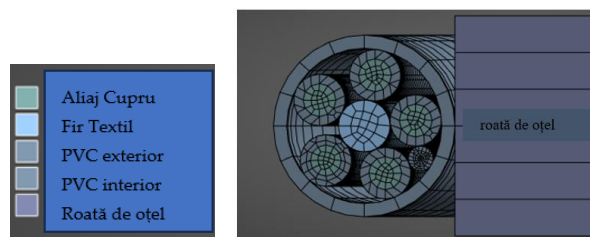
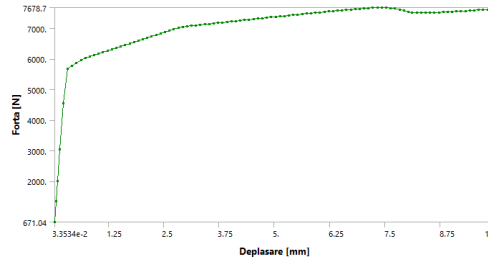


Figura 7.6 Modul de discretizare a componentelor cablului

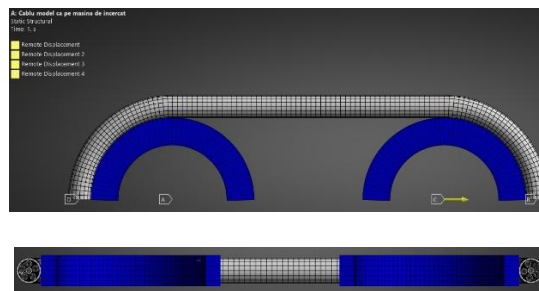
Discretizarea a fost realizată astfel încât să surprindă corect contactele interne, dezhărucirea cablurilor și interacțiunea cu rolele. Forța de încărcare utilizată în model este preluată din experiment, *figura 7.7*.



*Figura 7.7 Modul de încărcare cu variația forței  $F$  în raport cu deplasarea*

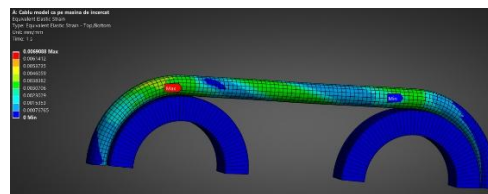
### 7.3 Rezultate obținute pentru solicitarea cu ansamblul roților

*Figura 7.8* prezintă configurația ansamblului cablu-sistem de încercare, în care roata din stânga este fixă, iar roata din dreapta este mobilă. Această dispunere reproduce condițiile testului fizic.



*Figura 7.8 Discretizarea ansamblului cablu-sistem de încercare*

Simularea arată variația locală a deformațiilor, *figura 7.9*, unde valorile cele mai mari apar în zona de contact inițial cu roata fixă, datorită suprapunerii tensiunilor din tracțiune și din contact.



*Figura 7.9 Modul de încercare a cablului în AEF și alungirile*

*Figura 7.10* prezintă harta deplasărilor ansamblului. Deplasarea maximă este înregistrată la unul dintre cablurile interioare. Această observație arată utilitatea modelării, deoarece dezhărucirea internă și deplasările locale nu pot fi detectate în cadrul testului fizic, unde se măsoară doar deplasarea globală a mașinii de încercat.

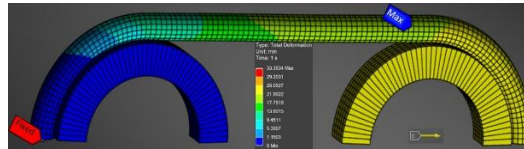


Figura 7. 10 Harta deplasărilor ansamblului, după analiza cu elemente finite

Figura 7.11 arată tensiunile echivalente von Mises, cu valori maxime în conductorii interni, în special în zonele unde aceștia intră în contact cu învelișul. Analiza identifică pentru fiecare componentă tensiunile specifice, ceea ce nu poate fi determinat experimental.

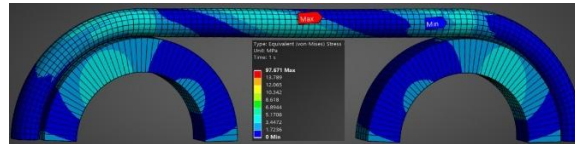


Figura 7. 11 Variația tensiunilor von Mises pentru întreg ansamblul

Figura 7.12 prezintă harta globală a tensiunilor și presiunilor de contact între cablurile interioare. Presiunile sunt moderate, dar suficiente pentru a genera frecare internă, care consumă parte din energia aplicată. Aceasta confirmă observațiile experimentale privind inițierea ruperii în zona de contact cu roata și explică variația tensiunilor în funcție de modul în care se dezasucească cablurile interioare.

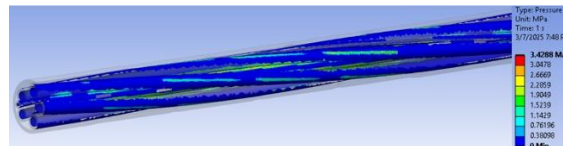


Figura 7. 12 Harta presiunilor dintre cabluri la valoarea maximă a forței

Figura 7.13 arată zona de inițiere a ruperii pentru deplasări mari ale roții mobile, confirmând similitudinea cu testele fizice.



Figura 7. 13 Modul de inițiere a ruperii

#### 7.4 Rezultate obținute pentru solicitarea cu ansamblul roților

Pentru eliminarea influenței roților, s-a realizat analiza cablului în ansamblu, încastrat la un capăt și solicitat la celălalt prin forța  $F$ , figura 7.14.

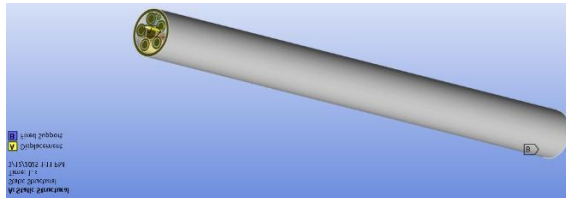


Figura 7. 14 Modelul AEF pentru cablu

Ansamblul complet include conductorii din cupru, învelișurile PVC și firul textil, figura 7.15.

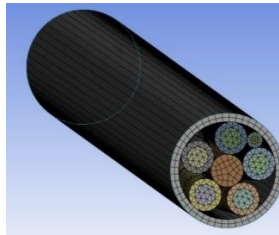


Figura 7.16 arată tensiunile normale în secțiunea transversală. Valorile cele mai mari apar în conductorii din cupru, la interfața cu PVC, datorită diferențelor de alungire ale materialelor. Această diferență locală explică concentrația tensiunilor în contact.

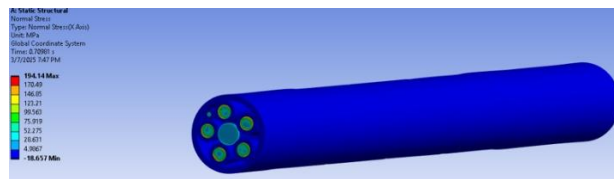


Figura 7. 15 Tensiunile normale în secțiunea transversală a ansamblului

Figura 7.17 prezintă deplasările secțiunilor transversale. Distribuția nu este liniară, din cauza desfășurării cablurilor interioare sub formă de toron. Efectul spiralării influențează tensiunile, deformațiile și deplasările longitudinale.

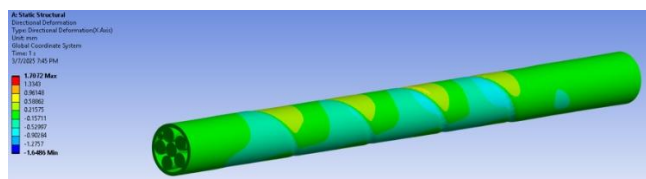
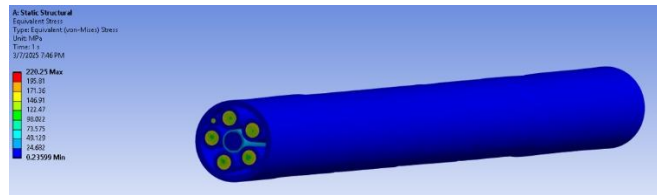
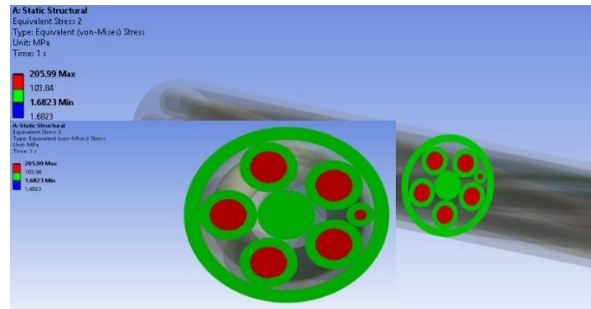


Figura 7.18 prezintă harta tensiunilor echivalente von Mises, unde se observă o distribuție mai lină în interiorul conductorilor comparativ cu cazul ansamblului cu role. Tensiunile sunt influențate de tensiunile tangențiale din interiorul firului.



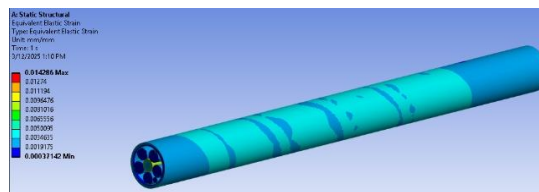
a) Vedere de ansamblu



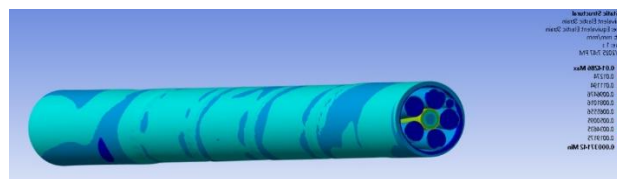
b) Detaliu asupra unei secțiuni transversale

Figura 7. 16 Harta tensiunilor echivalente von Mises

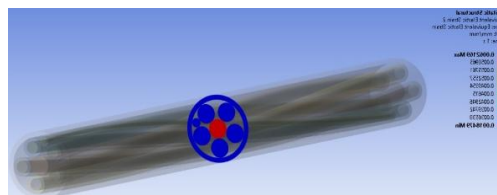
Figura 7.19 arată harta deformațiilor specifice longitudinale. Deformațiile sunt puternic influențate de dezrotirea cablurilor, fenomen observat și experimental.



a) Zona superioară



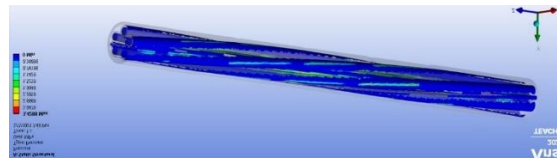
b) Zona inferioară



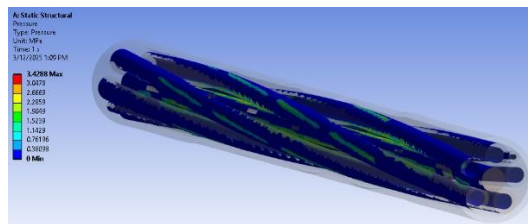
c) Detaliu cu deformația specifică liniară a unei secțiuni transversale

Figura 7. 17 Harta deformațiilor specifice longitudinale

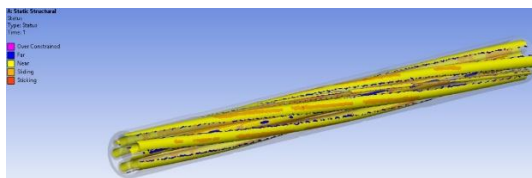
Figura 7.20 arată presiunile de contact între conductori. Deși valorile nu sunt ridicate, contactul generează forțe de frecare care consumă energie și influențează modul de deformare și redistribuirea eforturilor.



a) Vedere la lungime completă



b) Detaliu cu variația presiunilor de contact



c) Detaliu cu posibilitățile de deplasare sau constrângere ale suprafețelor

Figura 7. 18 Variația presiunilor de contact între cabluri

### 7.5 Concluzii generale capitolul VII

Analiza cu elemente finite a permis determinarea tensiunilor, deformațiilor specifice, presiunilor de contact și deplasărilor în ansamblul cablului. În testele experimentale se poate măsura doar relația forță–deplasare globală, fără detaliile interne ale comportamentului structural.

Modelarea cu ansamblul roților a demonstrat similitudinea cu experimentul, confirmând rolul presiunii de contact și al zonei de intrare pe roată în inițierea ruperii. Analiza cablului singular a arătat diferențe față de varianta cu role, dar a evidențiat aceleași fenomene de dezasucire, redistribuire a tensiunilor și apariția tensiunilor maxime la interfața conductor–PVC.

AEF a permis identificarea locurilor unde tensiunile sunt maxime, fenomen imposibil de determinat experimental sau analitic pentru un ansamblu multiplu de materiale. Rezultatele confirmă legătura dintre comportamentul mecanic observat experimental și distribuțiile interne generate numeric.

## Capitolul VIII. Încercări la șoc ale cablurilor cu diametrele de 16 mm și 12 mm

### 8.1 Introducere

Capitolul analizează comportarea la șoc mecanic a cablurilor pentru încărcarea vehiculelor electrice, cu înveliș din PVC. Se pornește de la proprietățile materialului. PVC are comportament vâsco elastic, prezintă fluaj și curgere la rece sub acțiunea unor solicitări externe menținute în timp, chiar la temperaturi obișnuite.

Cablurile pentru vehicule electrice sunt ansambluri complexe. Acestea includ conductori din cupru, teci polimerice și un fir textil central. În exploatare, cablurile pot fi supuse la solicitări de încovoiere, tracțiune, torsiune și șoc. În mod obișnuit, cablurile de alimentare nu lucrează la solicitări mecanice extreme. Totuși, cablurile montate la exterior, pe stâlpi sau structuri expuse, pot fi afectate de greutate proprie, gheață, vânt și variații de temperatură. Testele mecanice urmăresc rezistența la îndoire, torsiune, abraziune, forfecare și uzura învelișului exterior.

### 8.2 Materiale și echipamente

În încercări au fost utilizate două cabluri pentru încărcarea vehiculelor electrice, ambele din clasa de flexibilitate 6 conform IEC 60228. Primul cablu, de culoare albastră, are diametrul exterior de 16 mm, șase cabluri interioare și un fir textil central, *figura 8.1a*. Al doilea cablu, galben, are diametrul exterior de 12 mm, aceeași configurație cu șase cabluri interioare și un fir textil, *figura 8.1b*.



(a) Probă cu  $\varnothing = 16$  mm

(b) Probă cu  $\varnothing = 12$  mm

*Figura 8. 1 Probe utilizate în testarea la șoc.  $\varnothing$  este diametrul cablului.*

*Tabelul 8.2* sintetizează proprietățile utilizate în modelarea cu elemente finite. Sunt incluse modulul lui Young, coeficientul lui Poisson, limita de elasticitate și modulul tangent pentru cupru, PVC interior, PVC exterior și firul textil.

*Tabelul 8. 2. Caracteristicile materialelor din cadrul ansamblului*

Material	Modulul lui Young [MPa]	Coeficientul lui Poisson	Limita de elasticitate [MPa]	Modulul tangent [MPa]
Cupru	110000	0.34	150	1150
PVC exterior	1100	0.42	4	0

PVC interior	1100	0.42	2.5	0
Fir textil	3500	0.39	50	0

Cablurile interioare sunt răsucite în interiorul mantalei exterioare, *figura 8.2*, configurație care influențează contactele interne și distribuția tensiunilor.



*Figura 8. 2 Modul de răsucire a cablurilor în interiorul învelișului exterior*

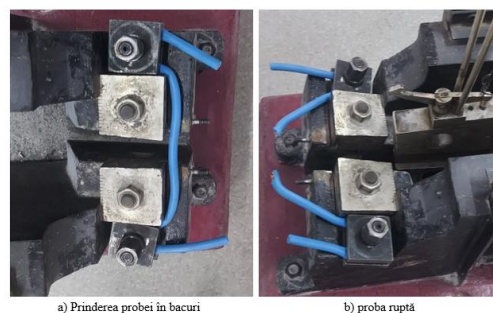
Echipamentul utilizat a fost dispozitivul de tip ciocan pendul Charpy, cu sarcina maximă de peste 300 daN, *figura 8.3*.



*Figura 8. 3 Ciocanul pendul de tip Charpy*

### *8.3 Modalitatea de efectuare a încercărilor*

Probele au fost montate în bacurile dispozitivului de încercare conform *figurii 8.4a*. Ruperea s-a produs în zona de impact a ciocanului și nu în zona de prindere, *figura 8.4b*, ceea ce confirmă corectitudinea prinderii și validitatea testelor.



*Figura 8. 4 Modul de prindere și rupere a probelor*

Energia maximă a pendulului, conform standardului Charpy, este de 300 J. Energia pierdută prin frecare a fost evaluată prin cădere liberă, rezultând 45 J. Energia totală cedată probei și pierdută prin frecare a fost citită pe scala gradată, *figura 8.5*. Pentru cablul de 16 mm, energia de 300 J nu a produs ruperea completă, *figura 8.6*, deci a fost necesară ridicarea suplimentară a pendulului și recalcularea energiei maxime la 364 J, cu ajustarea scalei de măsurare.



*Figura 8. 5 Modul de citire a energiei pe scara gradată*



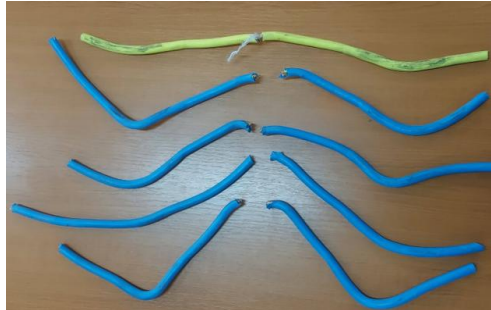
*Figura 8. 6 Probă neruptă cu energia maximă de 300 J*

Încălzirea probelor s-a realizat cu o suflantă de aer cald, care a permis ridicarea temperaturii până la 110 °C. Temperatura a fost monitorizată cu un termometru digital, *figura 8.7*, inclusiv în timpul încercării, astfel încât valorile folosite în grafice corespund temperaturii reale în momentul impactului.

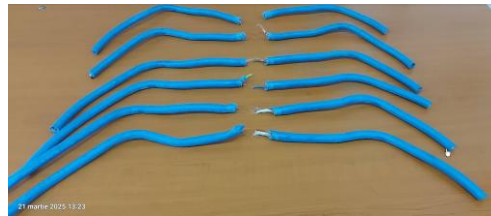


*Figura 8. 7 Modul de încălzire și citire a temperaturii*

Ruperea probelor cu diametrul de 12 mm este ilustrată în *figura 8.9*. Ruperea probelor cu diametrul de 16 mm este arătată în *figura 8.10*. În ambele cazuri, ruperea are loc în zona centrală de impact, nu în zona de prindere, ceea ce confirmă distribuția corectă a solicitării și reproductibilitatea testelor.



*Figura 8. 8 Modul de rupere a probelor cu diametrul exterior de 12 mm*



*Figura 8. 9 Modul de rupere a probelor cu diametrul exterior de 16 mm*

#### *8.4 Rezultate obținute și discuții*

Interpretarea acestor rezultate arată că, pe măsură ce temperatura crește, PVC își pierde progresiv capacitatea de a absorbi energia de impact. Cablul de 16 mm beneficiază de o secțiune mai mare și prezintă energii de rupere mai ridicate, dar la temperaturi foarte înalte degradarea PVC devine dominantă. În această situație, creșterea grosimii nu mai compensează pierderea de rezistență a materialului, iar raportul energiilor începe să scadă.

Raportul energiilor  $En\varnothing 16\text{mm}/En\varnothing 12\text{mm}$  crește până la aproximativ 90 °C, apoi scade, ceea ce sugerează că, peste un anumit prag termic, degradarea PVC devine suficient de accentuată încât să reducă avantajul secțiunii mai mari. Temperatura se dovedește un factor critic în comportarea la șoc a cablurilor pentru încărcarea vehiculelor electrice.

#### *8.5 Concluzii generale capitolul VIII*

Capitolul prezintă metodologia și rezultatele încercărilor la șoc pentru cablurile cu diametre exterioare de 12 mm și 16 mm, la diferite temperaturi. Prinderea cu eclise și șuruburi nu a influențat negativ modul de rupere, deoarece toate probele s-au rupt în zona de impact, nu în zona de prindere. Pentru cablul de 16 mm a fost necesară o energie mai mare decât 300 J, ceea ce a impus recalcularea energiei pendulului și adaptarea scalei.

Deformările plastice observate vizual au crescut cu temperatura, indicând scăderea treptată a modulului de elasticitate al materialului. Energiile de rupere au scăzut odată cu creșterea temperaturii pentru ambele cabluri, confirmând că PVC își reduce capacitatea de absorbție a energiei de impact la temperaturi ridicate. Cablul cu diametrul mai mare are o rezistență mecanică superioară, dar nu este imun la degradarea termică.

Rezultatele arată că performanțele mecanice sunt puternic influențate de starea termică, iar expunerea repetată la temperaturi înalte reduce semnificativ rezistența la impact. Din punct de vedere practic, cablurile trebuie protejate de supraîncălzire și verificate periodic, în special în zonele în care pot apărea solicitări dinamice și variații mari de temperatură.

## **Capitolul IX. Concluzii finale, contribuții proprii și direcții viitoare de cercetare**

Capitolul IX reunește concluziile generale ale tezei, contribuțiile realizate pe parcursul cercetării și direcțiile viitoare de dezvoltare. Studiul a urmărit evaluarea comportării mecanice, termice, electrice și microstructurale a învelișului cablurilor de încărcare pentru vehicule electrice, iar rezultatele au fost obținute atât prin testări experimentale, cât și prin simulări numerice.

Testele de tracțiune la temperatura ambiantă au evidențiat comportarea elastic-plastică a materialului, cu deformări progresive și o capacitate bună de alungire până la atingerea limitei de curgere. În condiții de temperatură ridicată s-a observat o scădere semnificativă a rigidității și a forței maxime de rupere, ceea ce confirmă influența temperaturii asupra proprietăților mecanice ale materialelor polimerice. Analiza variației rezistenței electrice a arătat că alungirea conductorilor determină modificări ale conductivității, iar creșterea rezistenței electrice pe parcursul solicitării indică sensibilitatea ansamblului conductor–izolație la deformare.

Examinările microscopice au evidențiat apariția microfisurilor, a delaminărilor și a zonelor de plastifiere localizată. Aceste degradări se formează progresiv și sunt accelerate de temperatură și de solicitările repetate. Încercările la șoc au arătat diferențe clare între cablurile cu diametru de 12 mm și cele de 16 mm, cablurile groase prezentând o capacitate mai bună de absorbție a energiei și un comportament predominant ductil. Analiza numerică prin metoda elementelor finite a confirmat tendințele observate în laborator și a evidențiat zonele critice de concentrare a tensiunilor, în special în regiunea prinderilor și în zona centrală a cablului.

Concluziile generale arată că temperatura, solicitările mecanice și impacturile influențează direct performanța cablurilor de încărcare. Învelișul exterior joacă un rol esențial în menținerea stabilității dimensionale, în protecția electrică și în rezistența la uzură. Teza demonstrează necesitatea evaluării integrate, prin corelarea testelor mecanice, termice, electrice și microscopice, pentru o caracterizare completă a cablurilor destinate mobilității electrice.

Contribuțiile proprii includ realizarea desenului tehnic și a configurației dispozitivului de testare la tracțiune, construirea și verificarea funcționării acestuia, optimizarea rolor pentru îmbunătățirea stabilității în timpul testelor, efectuarea testelor de tracțiune pentru cablurile de 12 mm și 16 mm, analiza microscopică a probelor prelevate după solicitare, măsurarea variației rezistenței electrice în timpul tracțiunii, realizarea testelor la temperatură ridicată, construirea

modelului numeric și analiza AEF, precum și efectuarea testelor la șoc, inclusiv testarea probelor expuse la temperaturi ridicate.

Direcțiile viitoare de cercetare vizează studierea comportamentului materialelor polimerice supuse îmbătrânirii accelerate, analiza solicitărilor combinate de torsiune, vibrație și compresie laterală, testarea unor noi compoziții polimerice hibride pentru creșterea rezistenței termice și mecanice, evaluarea cablurilor destinate încărcării rapide, investigate în condiții de solicitări termice și electromagnetice ridicate, precum și corelarea performanțelor cablurilor cu cerințe de sustenabilitate și reciclare.