UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAŞI

FACULTATEA DE MECANICĂ

Studii și cercetări privind comportarea componentelor sistemului de direcție al automobilelor în diverse condiții funcționale

-REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT-

Ing. Alexandru-Gabriel POPA

Conducător doctorat: Prof. Univ. Dr. Habil. Ing. Edward RAKOSI

IAŞI 2026

Motto:

„Știința nu este altceva decât o încercare de a pune ordine în dezordinea aparentă a lumii”

Grigore C. Moisil
matematician, (1906-1973)

CUVÂNT ÎNAINTE

Industria construcției de automobile a cunoscut, în ultimele decenii, o dezvoltare continuă, determinată atât de progresul tehnologic, cât și de cerințele tot mai exigente privind siguranța rutieră, fiabilitatea și eficiența autovehiculelor. În acest context, sistemul de direcție reprezintă unul dintre ansamblurile esențiale ale automobilului, având un rol determinant în asigurarea controlului direcțional, a stabilității și a confortului în exploatare. Performanțele acestuia influențează în mod direct comportamentul dinamic al autovehiculului și nivelul de siguranță al participanților la trafic.

În ultimii ani, cercetările s-au orientat către dezvoltarea unor soluții constructive capabile să asigure un raport optim între masă, rigiditate și rezistență mecanică. În acest context, utilizarea aliajelor ușoare și a materialelor compozite, alături de integrarea metodelor moderne de modelare și simulare numerică, a devenit o direcție importantă de cercetare, contribuind la optimizarea procesului de proiectare și la îmbunătățirea performanțelor componentelor încă din etapa de dezvoltare.

Complexitatea condițiilor de exploatare la care sunt supuse componentele sistemului de direcție impune însă o evaluare riguroasă a comportării acestora. Solicitările mecanice generate de vibrații și șocuri, precum și influența factorilor de mediu, pot afecta performanțele și durabilitatea ansamblurilor mecanice, motiv pentru care metodele moderne de analiză și simulare reprezintă instrumente esențiale în fundamentarea soluțiilor constructive și în creșterea fiabilității sistemelor de direcție.

Lucrarea de față se înscrie în această direcție de cercetare, având ca obiectiv studiul comportării componentelor sistemului de direcție al automobilelor în diverse condiții funcționale, cu accent asupra casetei de direcție și asupra influenței materialelor utilizate sub aspectul răspunsului structural și dinamic al acesteia. Cercetările realizate îmbină analiza teoretică, simularea numerică cu investigații experimentale dedicate evaluării comportării unei configurații cu geometrie hibridă în condiții climatice diverse, urmărind identificarea unor soluții constructive capabile să îmbunătățească performanțele și durabilitatea acestor componente.

Rezultatele prezentate în această teză au fost obținute în cadrul activității de cercetare desfășurate la Departamentul de Inginerie Mecanică și Autovehicule Rutiere din cadrul Facultății de Mecanică a Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași și reflectă contribuția autorului la studiul comportării componentelor sistemului de direcție, realizate din materiale cu proprietăți mecanice diferite.

*La finalul acestei lucrări, doresc să îmi exprim profunda recunoștință domnului **Profesor universitar doctor abilitat inginer Edward RAKOSI**, conducătorul științific al tezei, pentru îndrumarea permanentă, exigența științifică și sprijinul acordat pe întreaga perioadă a studiilor doctorale. Profesionalismul, experiența și disponibilitatea sa au constituit un sprijin esențial în desfășurarea activității de cercetare și în elaborarea prezentei lucrări.*

Îi adresez întreaga mea considerație și sincere mulțumiri pentru încrederea acordată, pentru răbdarea și sfaturile oferite, precum și pentru modelul de rigoare academică și profesională pe care l-a reprezentat pe parcursul colaborării noastre.

Iași, 2026 *Alexandru-Gabriel POPA*

Cuprins

Capitolul 1

Introducere. Evoluția și analiza constructiv - comportamentală a sistemelor de direcție ale automobilelor. Obiective și direcții de cercetare……1 **1**

1.1 Introducere……1 1

1.2 Evoluția sistemelor de direcție ale automobilelor. Elemente componente fundamentale. Analiza constructiv - funcțională……3 1

1.3 Concluzii. Obiective și direcții de cercetare……17 3

1.3.1 Concluzii……17 3

1.3.2 Obiective și direcții de cercetare……18 4

Capitolul 2

Definirea condițiilor funcționale ale componentelor sistemului de direcție al automobilelor. Evaluarea influențelor acestora. Materiale moderne utilizate……21 **5**

2.1 Condiții funcționale……21 5

2.1.1 Condiții induse de calea de rulare și de starea pneurilor……21 5

2.1.2 Condiții de încărcare a vehiculului……28 7

2.1.3 Condiții cinematice de deplasare……29 8

2.1.4 Regimul de întreținere……30 8

2.1.5 Condiții climatice……32 9

2.2 Influențe generate de principalele condiții funcționale……34 9

2.2.1 Vibrații și șocuri……34 10

2.2.2 Influența stării pneurilor……40 11

2.2.3 Influența regimului de întreținere……41 11

2.2.4 Inflența factorilor de climă……42 12

2.3 Tendințe de îmbunătățire a comportamentului ansamblului casetei de direcție în diverse condiții funcționale prin utilizarea unor materiale moderne……46 13

2.4 Concluzii……53 15

Capitolul 3

Metodologia de analiză și simulare a comportamentului dinamic al casetei de direcție……55 16

3.1 Definirea modelului virtual al casetei de direcție. Tipuri de solicitări……55 16

3.2 Norme și condiții de simulare……56 16

3.3 Instrumente software pentru analiza comportamentului dinamic……56 17

3.4 Tipurile de simulări folosite în cadrul studiului realizat……63 19

3.4.1 Simularea modală……63 19

3.4.2 Simularea vibrațiilor aleatorii……65 19

3.4.3 Analiză structurală tranzitorie……68 20

3.5 Configurarea modelului virtual……71 21

3.6 Concluzii……73 21

Capitolul 4
Simulări ale comportării casetei de direcție realizată din aliaj de aluminiu.....75 22
4.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii..... 76 22
4.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc.....87 24
4.3 Concluzii..... 89 24
Capitolul 5
Simulări ale comportării casetei de direcție realizată din fibre de carbon.....90 26
5.1 Caseta de direcție realizată din fibre de carbon LM..... 90 26
5.1.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii..... 90 26
5.1.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc.....101 27
5.2 Caseta de direcție realizată din fibre de carbon HM.....102 28
5.2.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii..... 102 29
5.2.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc.....113 30
5.3 Concluzii..... 114 31
Capitolul 6
Simulări ale comportării casetei de direcție realizată din Kevlar 49 - fibre de aramidă..... 115 32
6.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii..... 115 32
6.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc.....126 34
6.3 Concluzii..... 127 35
Capitolul 7
Rezultatele comparative ale simulărilor comportării casetei de direcție realizată din materiale cu caracteristici mecanice distincte..... 129 36
7.1 Analiza comportamentului casetei de direcție la accelerațiile datorate vibrațiilor aleatorii..... 130 36
7.2 Analiza comportamentului casetei de direcție la deformațiile datorate vibrațiilor aleatorii..... 142 37
7.3 Analiza comportamentului casetei de direcție la șoc.....151 38
7.3.1 Rezultatele privind tensiunile echivalente..... 151 38
7.3.2 Rezultate privind deformația totală.....152 39
7.4 Concluzii.....153 39
Capitolul 8
Analiza comportamentului casetei de direcție cu geometrie hibridă.....154 40
8.1 Simulări ale comportării casetei de direcție cu geometrie hibridă la vibrații aleatorii.. 154 40
8.2 Simulări ale comportării casetei direcție cu geometrie hibridă la șoc..... 166 42
8.3 Analiza experimentală a comportării casetei de direcție cu geometrie hibridă la condiții funcționale de tip climatic..... 167 43
8.3.1 Modelul fizic funcțonal al casetei de direcție cu geomtrie hibridă.....167 43
8.3.2 Metodologia de cercetare experimentală. Standul realizat. Rezultate..... 168 44
8.4 Concluzii.....188 52

Capitolul 9

Concluzii finale. Contribuții personale. Oportunități viitoare de cercetare **191** **54**
9.1 Concluzii finale 191 54
9.2 Contribuții personale 195 54
9.3 Oportunități viitoare de cercetare 196 55
Bibliografie / Bibliografie selectivă **197** **56**

Capitolul 1

Introducere. Evoluția și analiza constructiv - comportamentală a sistemelor de direcție ale automobilelor. Obiective și direcții de cercetare

1.1 Introducere

Sistemul de direcție reprezintă un ansamblu critic al autovehiculului, având rolul de a asigura controlul traiectoriei, stabilitatea direcțională și siguranța participanților la trafic. Funcționarea sa corectă este determinată de capacitatea de a orienta roțile directoare astfel încât procesul de bracare să se realizeze fără alunecare laterală a pneurilor. Din punct de vedere teoretic, un viraj corect implică rularea roților pe cercuri concentrice.

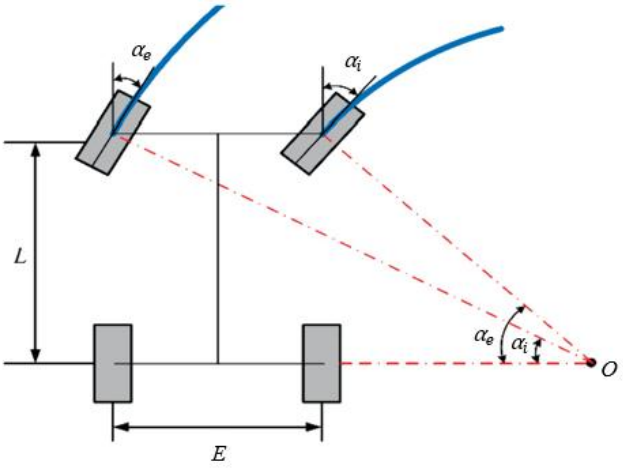


Fig. 1.1 Centrul instantaneu de rotație

Acest principiu necesită ca prelungirile axelor tuturor roților să se intersecteze într-un punct comun, denumit centrul instantaneu de rotație O, fenomen ilustrat și detaliat în **fig. 1.1**. Pentru a satisface această condiție geometrică, unghiul de bracaj al roții interioare α_i trebuie să fie întotdeauna mai mare decât cel al roții exterioare α_e, relație esențială pentru minimizarea uzurii pneurilor și menținerea aderenței.

Standardele de proiectare impun limite riguroase privind efortul la volan: forța maximă nu trebuie să depășească 150 [N] pentru vehiculele din categoria M1 și 200 [N] pentru categoria N1. Totodată, raportul de transmisie i_t variază de la aproximativ 19 pentru autoturisme până la 36 pentru vehicule comerciale, reflectând necesitatea unui echilibru între manevrabilitate și demultiplicarea efortului [1, 2].

Stabilitatea sistemului este definită prin capacitatea roților de a menține direcția de mers rectiliniu și de a reveni natural la această poziție după încetarea momentului de direcție aplicat de conducător.

1.2 Evoluția sistemelor de direcție ale automobilelor. Elemente componente fundamentale. Analiza constructiv - funcțională

Componentele fundamentale ale sistemului, volan, coloană, casetă, bielete, sunt ilustrate în **fig. 1.2** [1, 3]. Coloana de direcție a evoluat spre configurații complexe, cu funcții telescopice și de absorbție a energiei la impact,

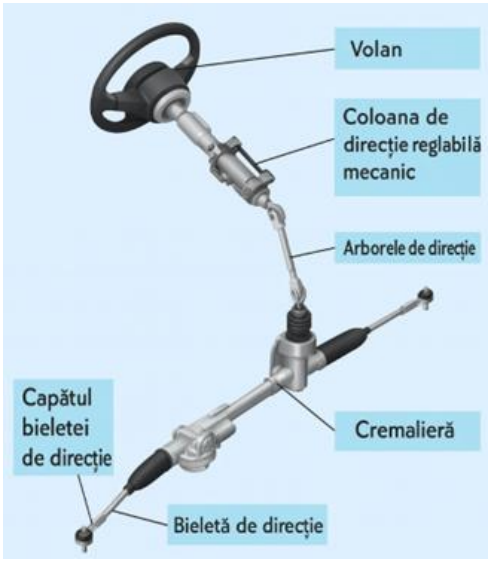


Fig. 1.2 Principalele componente ale sistemului de direcție [3]

prezentate în diversitatea lor în **fig. 1.3 a**, **b**, **c**, **d**, **e**, **f**, **g**, **h**, **i** [2].

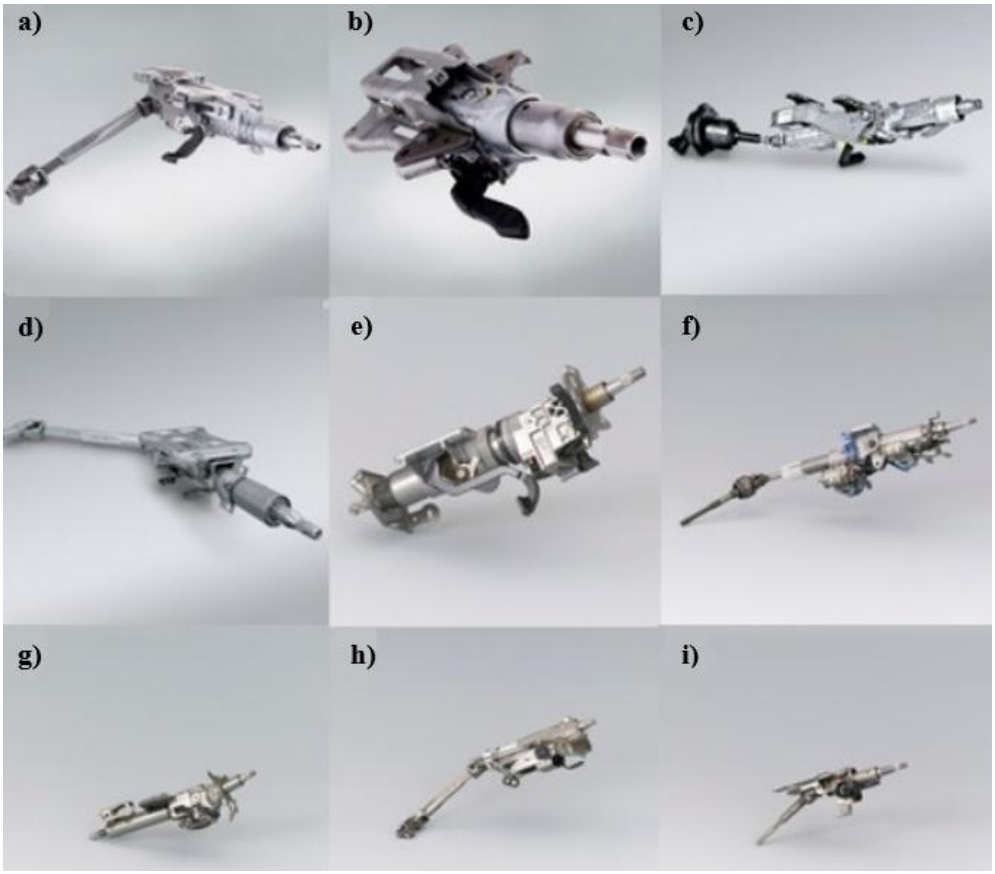


Fig. 1.3 a, **b**, **c**, **d**, **e**, **f**, **g**, **h**, **i** Versiuni constructive ale coloanelor de direcție [2]

a) coloană cu înclinare a pivotului inferior și cu funcție telescopică;

b) coloană cu înclinare a pivotului superior și cu funcție telescopică;

c) coloană cu poziție variabilă a volanului; **d)** coloană cu rigiditate crescută;

e) coloană cu pivotare superioară; **f)** coloană reglabilă electric;

g) coloană cu pivot inferior și cu funcție telescopică longitudinală;

h) coloană cu reglaj axial și vertical extins; **i)** coloană cu decuplare în caz de impact

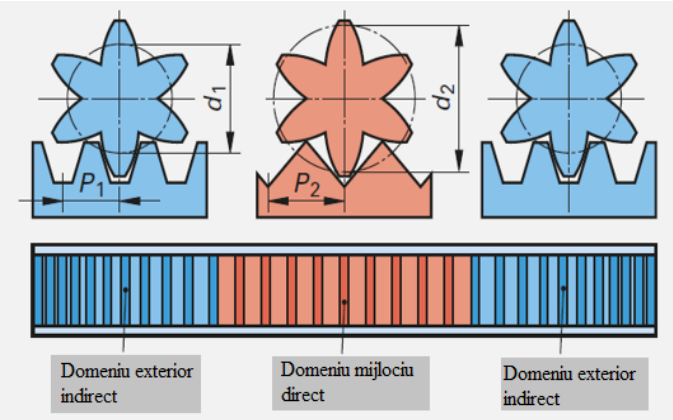


Fig. 1.4 Tipuri de pinioane și cremaliere [3]

Mecanismul cu pinion și cremalieră reprezintă soluția standard pentru autoturismele moderne, transformând rotația volanului în mișcare liniară printr-un angrenaj cu dinți elicoidali [1, 3, 4]. Pentru adaptarea la condiții variate, se utilizează adesea cremaliere cu raport variabil prezentată în **fig. 1.4**, care asigură stabilitate pe centru și promptitudine la manevre ample.

Evoluția sistemelor de asistare a parcurs mai multe etape:

- asistarea hidraulică HPS (**H**ydraulic **P**ower **S**teering) utilizează un distribuitor rotativ și un piston hidraulic solidar cu cremaliera pentru a reduce efortul la volan;
- asistarea electrohidraulică EHPS (**E**lectro-**H**ydraulic **P**ower **S**teering) permite reglarea progresivă a nivelului de asistare în funcție de viteza de deplasare;
- servodirecția electrică EPS (**E**lectric **P**ower **S**teering) reprezintă soluția actuală dominantă, expusă în **fig. 1.5**, fiind superioară prin eficiență energetică și posibilitatea integrării în sistemele de control electronic al stabilității [5, 6, 7, 8, 9].

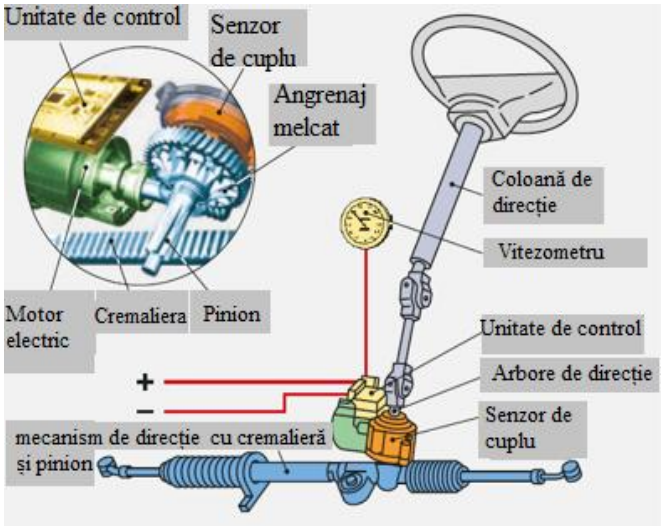


Fig. 1.5 Servodirecție electrică cu cremalieră și pinion [3]

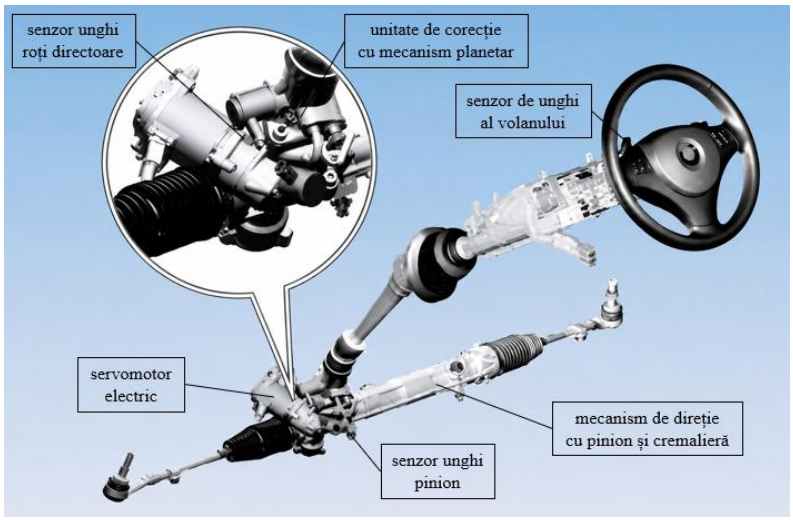


Fig. 1.6 Sistem de direcție activă [3]

Sistemele avansate, precum direcția activă din **fig. 1.6** și direcția dinamică din **fig. 1.7**, permit corecții automate de traiectorie fără intervenția directă a conducătorului, îmbunătățind siguranța în situații critice [3, 8, 9, 10, 11, 12].

Eficiența direcției depinde critic de reglajul unghiurilor geometrice, unghiul de fugă, unghiul de convergență și unghiul de cădere.

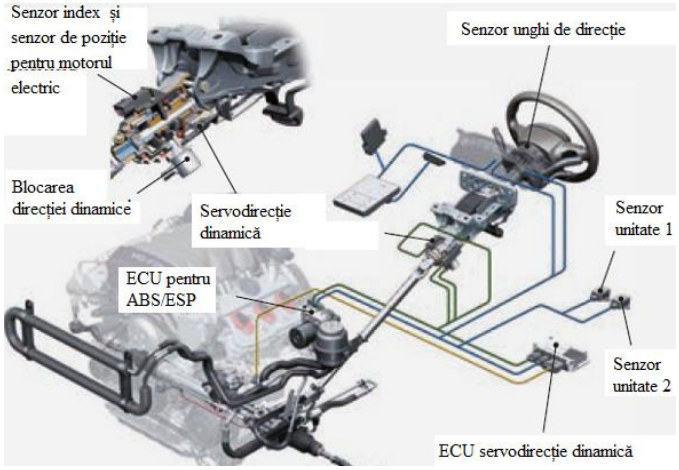


Fig. 1.7 Sistem de direcție dinamică [3]

1.3 Concluzii. Obiective și direcții de cercetare

1.3.1 Concluzii

Analiza capitolului demonstrează că performanța sistemului de direcție este rezultatul unei interdependențe între soluțiile constructive, geometrie și materialele utilizate..

1.3.2 Obiective și direcții de cercetare

Prezenta teză de doctorat are ca prim obiectiv general analiza și optimizarea comportamentului dinamic al casetei de direcție a autovehiculului, componentă principală și reprezentativă a sistemului de direcție al automobilului, în vederea îmbunătățirii performanțelor structurale și a durabilității acesteia în condiții reale de exploatare, sub influența diverselor condiții funcționale prin utilizarea materialelor avansate și a metodelor moderne de analiză numerică.

Un al doilea obiectiv general îl reprezintă studiul experimental al influenței condițiilor funcționale de tip climatic asupra casetei de direcție cu noua geometrie propusă, precum și a fiabilității soluției în aceste condiții.

Pentru atingerea obiectivului general, au fost stabilite următoarele obiective specifice.

Demersul științific, sistematizat în **fig. 1.8**, cuprinde modelarea 3D, simulări FEA (**F**inite **E**lement **A**nalysis) bazate pe standardul IEC 60068 (**I**nternational **E**lectrotechnical **C**ommission) și validarea experimentală într-o incintă climatică automată a unei soluții de geometrie hibridă [13]. Se urmărește identificarea zonelor critice de solicitare și propunerea unor materiale avansate capabile să îmbunătățească răspunsul dinamic al ansamblului sub influența condițiilor funcționale complexe.

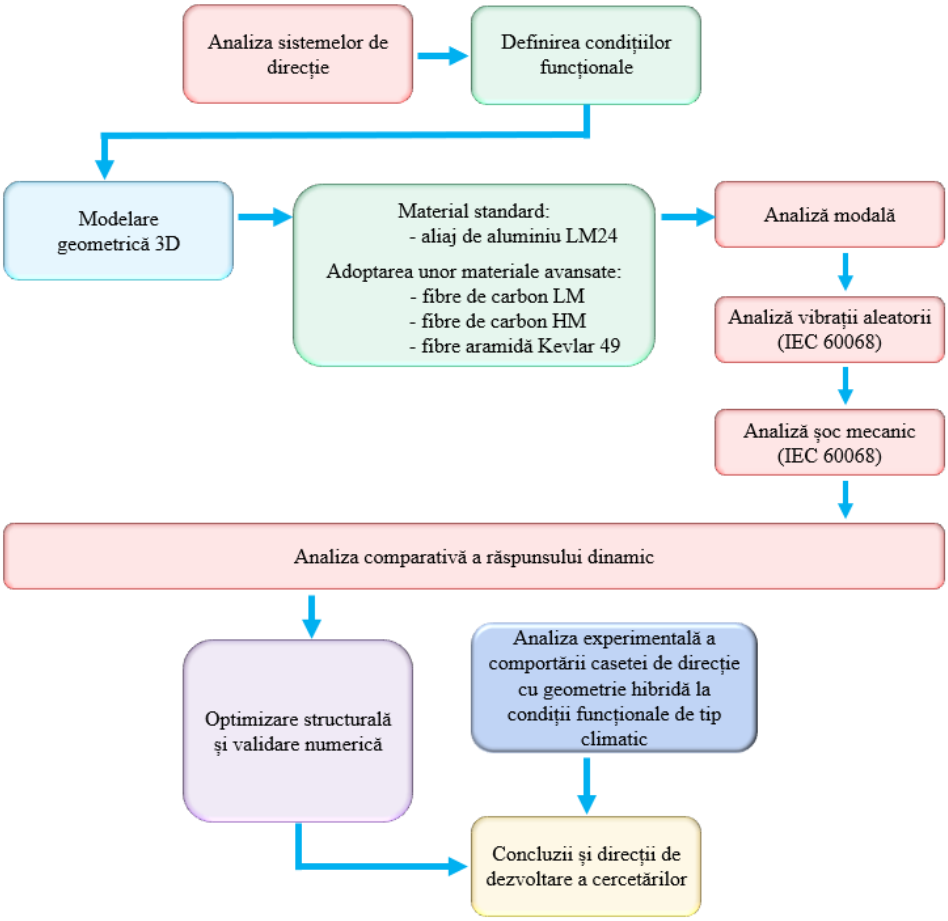


Fig. 1.8 Structura generală a demersului de cercetare adoptat în cadrul tezei de doctorat

Capitolul 2

Definirea condițiilor funcționale ale componentelor sistemului de direcție al automobilelor. Evaluarea influențelor acestora. Materiale moderne utilizate

2.1 Condiții funcționale

Funcționarea ansamblului casetei de direcție este guvernată de o interdependență complexă între autovehicul și mediul de exploatare. Aceste condiții sunt sistematizate în **fig. 2.1**, fiind grupate în: condiții induse de calea de rulare și pneuri, condiții de încărcare, condiții cinematice, regimul de întreținere și condiții climatice.

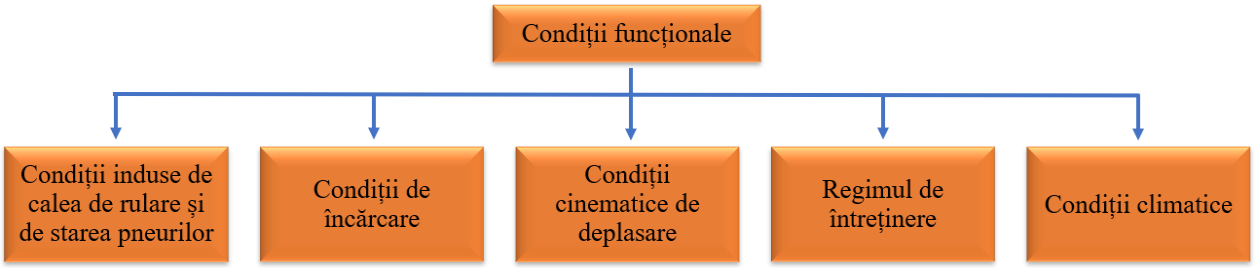


Fig. 2.1 Condiții funcționale ale sistemului de direcție

2.1.1 Condiții induse de calea de rulare și de starea pneurilor

Factorii de drum reprezintă o sursă majoră de solicitări. Calitatea infrastructurii rutiere determină direct efortul în sistemul de direcție și consumul de resurse al vehiculului [14]. Parametrii și indicii tehnico - economici ce reflectă condițiile induse de calea de rulare se definesc, se modelează și se eșalonează conform realțiilor de mai jos.

- Rezistența la rulare este definită de relația fundamentală [5]:

$$F_r = f_r \cdot G_a \tag{2.1}$$

unde: F_r – forța de rezistență la rulare [N];

f_r– coeficientul de rezistență la rulare;

G_a – greutatea autovehiculului [N].

- Indicele de viabilitate I_v cuantifică gradul de degradare al drumului printr-un indice normalizat, calculat prin ponderarea parametrilor de degradare precum fisurile sau șleaurile [15]:

$$I_v = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot D_i \tag{2.2}$$

unde: I_v – indicele de viabilitate, indice normalizat 0- stare foarte bună, 1- stare foarte degradată;

w_i – coeficienți de ponderare;

n – numărul total de parametri considerați;

D_i – parametri ai degradării, precum fisuri, tasări, șleauri etc.

- Costul de exploatare pe drumuri degradate este modelat prin coeficientul de corecție k_d [16, 17]:

$$k_d = \frac{C_{exp}}{C_{ref}} \tag{2.3}$$

în care: C_{exp} – costul de exploatare pe drum degradat;

C_{ref} – costul de exploatare pe drum în stare bună.

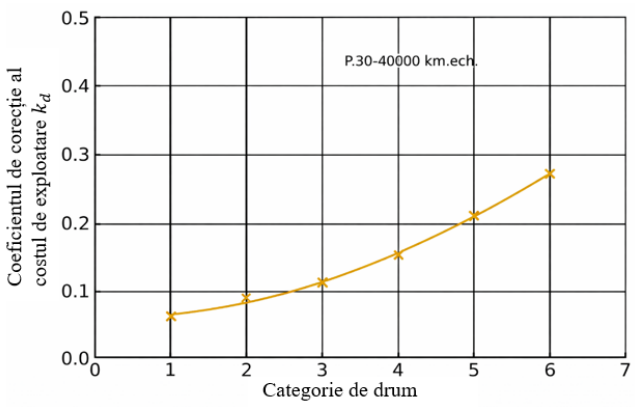


Fig. 2.2 Variația coeficientului de corecție al costului de exploatare k_d în funcție de categoria drumului

Variația acestuia în funcție de categoria drumului este ilustrată în **fig. 2.2**, unde se observă o creștere progresivă a costurilor odată cu deteriorarea infrastructurii [16, 17].

Degradarea carosabilului conduce la variații ale sarcinii normale și ale forțelor laterale F_L [18, 19], exprimate prin:

$$F_L = C_L \cdot \alpha_d \tag{2.4}$$

în care simbolurile au următoarea semnificație: F_L – forța laterală la nivelul pneului [N];

C_L – rigiditatea laterală a pneului [N/rad];

α_d – unghiul de derapaj al roții [rad].

Accelerația verticală a_V indusă de neregularități este derivata a doua a deplasării verticale z_V raportată la timp [5, 18, 19]:

$$a_V = \frac{d^2 z_V}{dt^2} \tag{2.5}$$

cu următoarele semnificații: a_V – accelerația verticală a masei nesuspendate [m/s²];

z_V – deplasarea verticală impusă de profilul drumului [m];

$\frac{d}{dt}$ – operatorul de derivare în raport cu timpul;

t – timpul [s].

Momentul transmis casetei de direcție este M_d, prezentat în relația următoare, unde b_m este brațul mecanic față de axa pivotului [19]:

$$M_d = F_L \cdot b_m \tag{2.6}$$

parametrii fiind definiți astfel: M_d – momentul aplicat mecanismului de direcție [Nm];

F_L – forța laterală la nivelul pneului [N];

b_m– brațul mecanic față de axa pivotului roții [m].

Studiul analizează soluțiile constructive pentru calea de rulare în, **fig. 2.3 a**, **b**, **c** evidențiindu-se rolul straturilor rutiere, geometria în curbe și profilul transversal în asigurarea stabilității și reducerea riscului de derapaj [18, 5, 16].

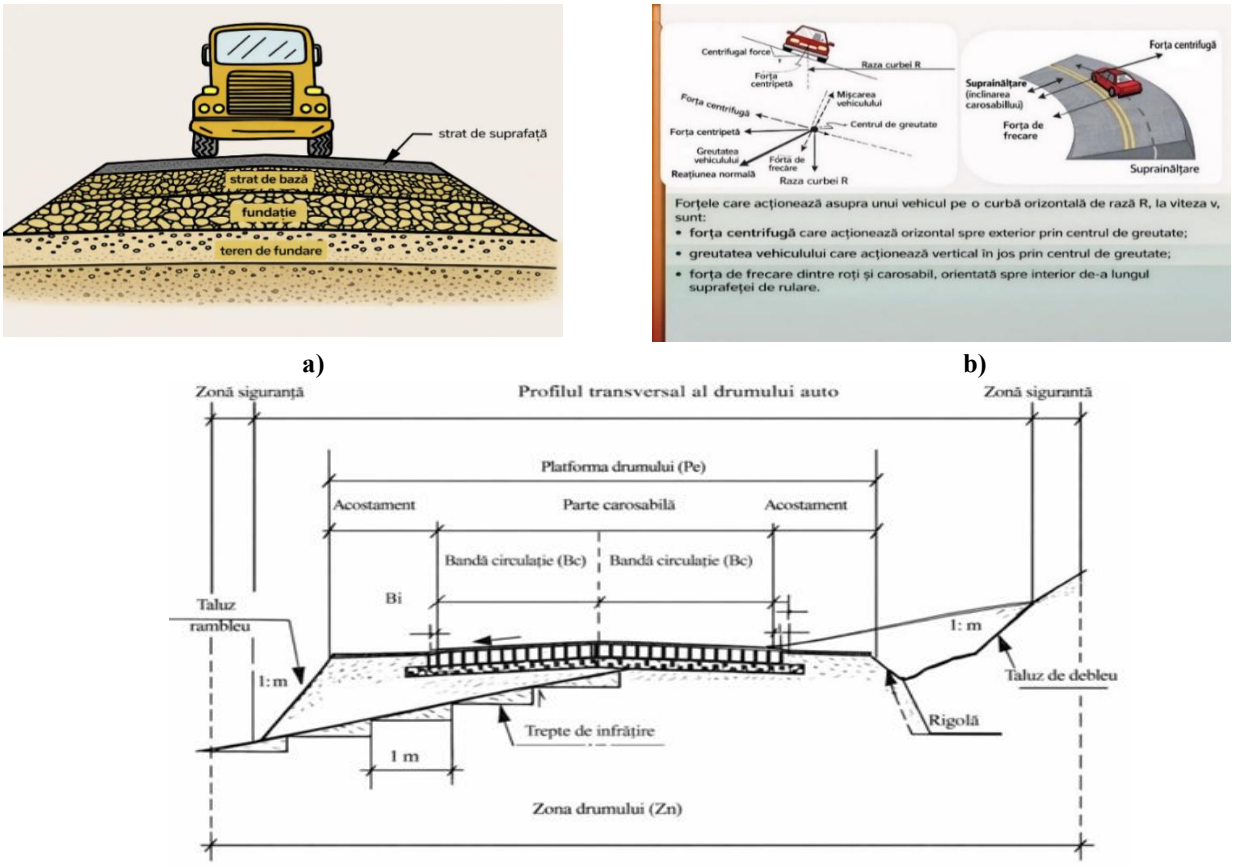


Fig. 2.3 a, **b**, **c** Diverse soluții constructive alese pentru calea de rulare [20, 21, 22]
a) straturile componente; **b)** geometria în curbe; **c)** profilul transversal

2.1.2 Condiții de încărcare a vehiculului

Distribuția masei influențează balanța dinamică. O încărcare necorespunzătoare, simbolizată în **fig. 2.4** poate determina ridicarea punții față, reducând aderența roților directoare și precizia direcției [5].

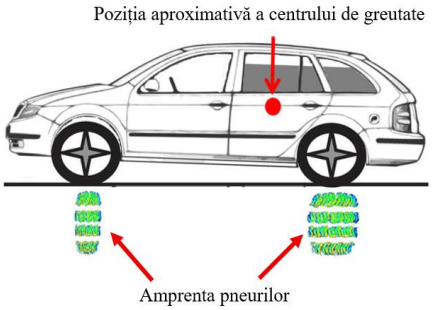


Fig. 2.4 Încărcarea necorespunzătoare a vehiculului [23]

2.1.3 Condiții cinematice de deplasare

Viteza este un factor determinant. La viteze ridicate, forțele laterale și momentele de girație se amplifică, conform **fig. 2.5** [24]. Sunt analizate manevrele critice de evitare [25], prezentate în **fig. 2.6 a**, **b** și fenomenele de subvirare și supravirare, în cadrul **fig. 2.7**, care necesită răspunsuri rapide din partea sistemului de direcție pentru menținerea controlului [24, 26].

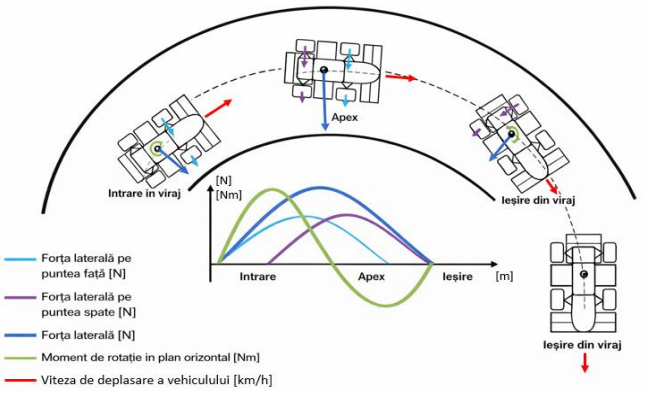


Fig. 2.5 Corelația dintre forțele laterale și momentele de girație în procesul de virare al unui automobil [24]

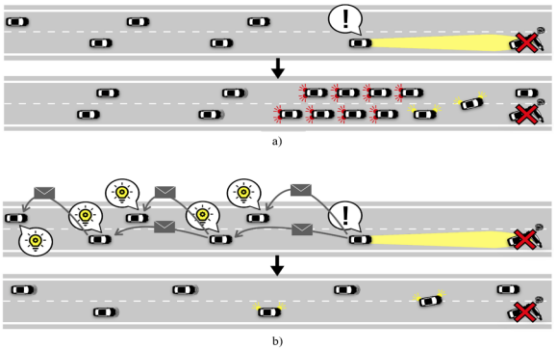


Fig. 2.6 a, **b** Manevre de evitare
a) schimbări rapide de bandă; **b)** manevre de evitare

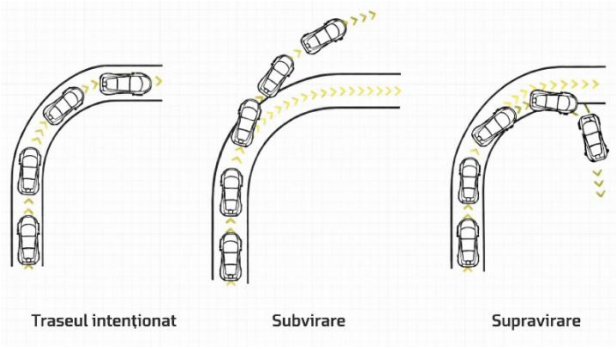


Fig. 2.7 Fenomenul de subvirare și supravirare

2.1.4 Regimul de întreținere

Absența întreținerii periodice duce la uzura prematură în primul rând al ansamblului motor - transmisie dar și a componentelor direcției. În **fig. 2.8** se corelează consumul de ulei cu rulajul, reflectându-se degradarea generală a vehiculului. Uzurile la nivelul casetei sau articulațiilor reduc rigiditatea sistemului și precizia direcțională [27].

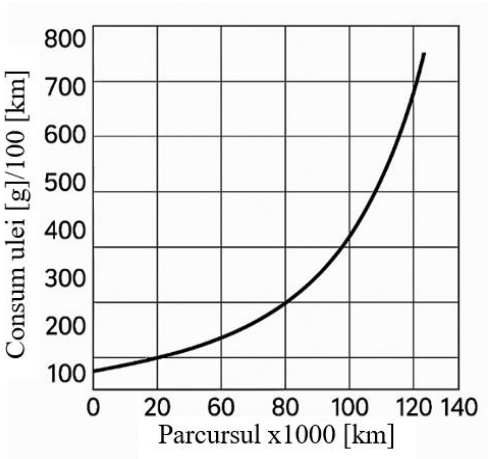


Fig. 2.8 Consumul de ulei raportat la numărul de kilometri parcurși [27]

2.1.5 Condiții climatice

Factorii meteorologici nefavorabili precum ploaie, zăpadă, gheață, ceață, ilustrați în **fig. 2.9**, reduc aderența pneurilor și vizibilitatea, necesitând corecții frecvente de traiectorie [5, 28].

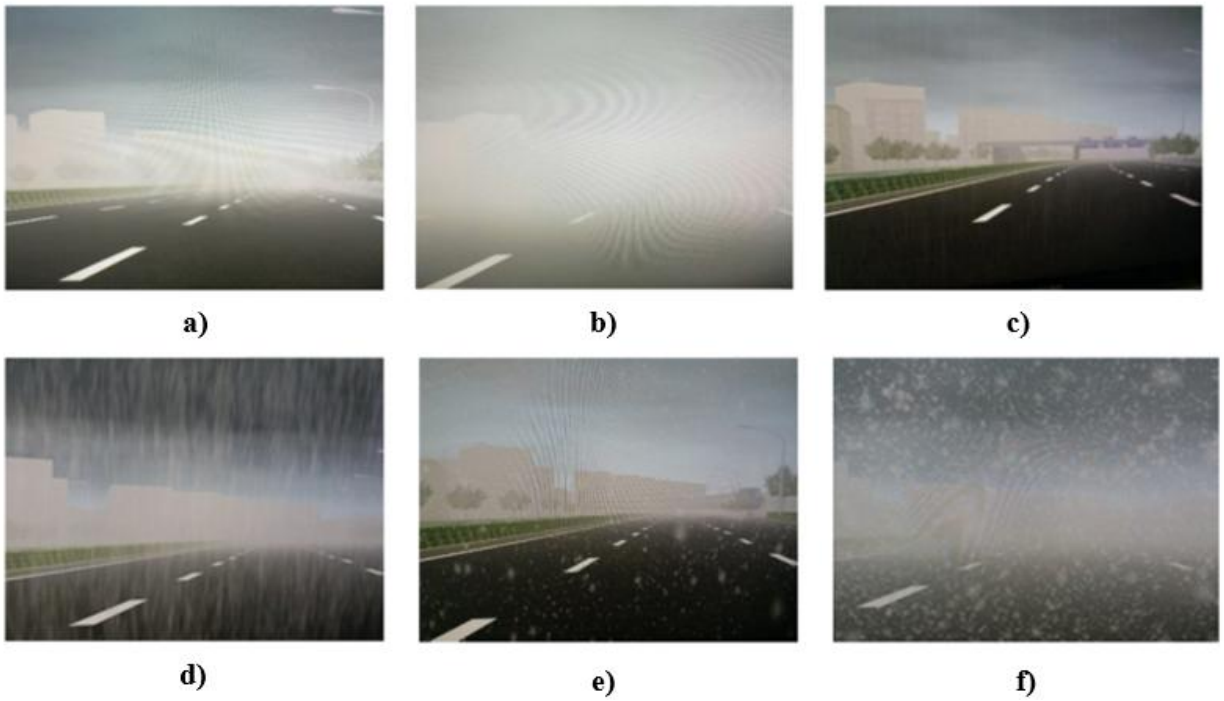


Fig. 2.9 a, **b**, **c**, **d**, **e**, **f** Diverse condiții meteo [28]
a) ceață densă; **b)** ceață foarte densă; **c)** ploaie
d) ploaie torențială; **e)** zăpadă; **f)** ninsoare

2.2 Influențe generate de principalele condiții funcționale

Sistemul de direcție este supus unor influențe eșalonate sintetizate în **fig. 2.10**, predominante fiind vibrațiile, șocurile și coroziunea.

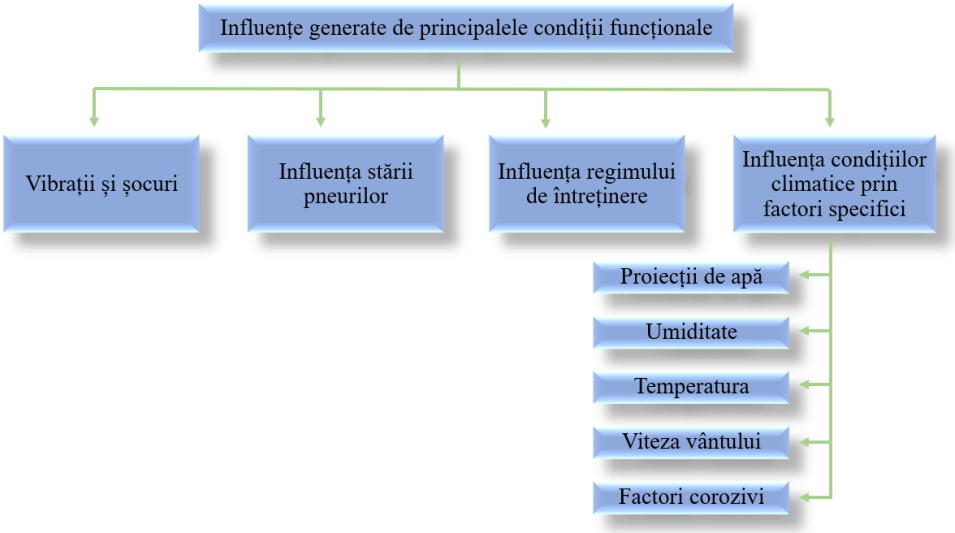


Fig. 2.10 Influențe generate de principalele condiții funcționale

2.2.1 Vibrații și șocuri

Vibrațiile și șocurile provin în principal de la neregularitățile drumului și funcționarea motorului. Profilul sinusoidal este descris de relația următoare [14]:

$$h = \frac{h_0 \cdot (1 - \cos\omega t)}{2} \tag{2.7}$$

unde: h – profilul neregularităților suprafeței drumului;

h_0 – înălțimea suprafeței drumului [mm];

ω – este pulsația factorului perturbator. Mărimea acestuia se calculează cu relația:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{l} \tag{2.8}$$

cu următoarele semnificații: V – viteza automobilului [m/s];

l – lungimea neregularității [m].

Forme speciale de denivelări semisinusoidale sau treaptă sunt prezentate în **fig. 2.11 a**, **b** [14].

Deoarece oscilațiile sunt aleatorii, se utilizează valoarea medie $\overline{F}(y)$ din cadrul relației **2.13** și dispersia δ din relația **2.14** pentru descrierea probabilistică a fenomenelor:

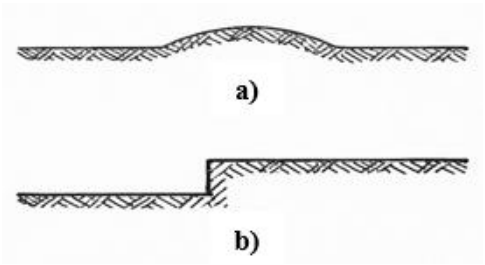


Fig. 2.11 a, **b** Forme speciale de denivelări ale suprafeței drumului [14]
a) denivelare semisinusoidală; **b)** denivelare treaptă

$$\overline{F}(y) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{n} \hat{f}_k \cdot f_k \tag{2.9}$$

mărimile din relație reprezentând: $\overline{F}(y)$ – valoarea medie;

N – suma tuturor intersecțiilor coordonatelor, notate cu $\hat{f}_k$;

f_k – frecvența coordonatelor, $\hat{f}_k$.

Dispersia care reprezintă de fapt abaterea medie pătratică, la rândul ei, este dată de:

$$\delta^2 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{n} (\hat{f}_k - \overline{F}(y))^2 \cdot f_k \tag{2.10}$$

în cadrul acestei relații: δ – reprezintă dispersia, celelalte notații fiind definite mai sus.

N – suma tuturor intersecțiilor coordonatelor, $\hat{f}_k$;

f_k – frecvența coordonatelor, $\hat{f}_k$;

$\overline{F}(y)$ – valoarea medie.

Pentru controlul vibrațiilor se analizează soluții moderne, precum utilizarea actuatorilor piezoelectrici [43], prezentați în **fig. 2.12**, amplasați pentru amortizarea activă în zonele cu energie de deformare ridicată, vizibile în **fig. 2.13** [30].

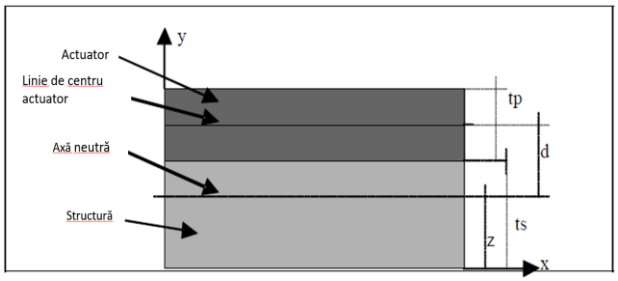


Fig. 2.12 Detaliile actuatorului piezoelectric [11]

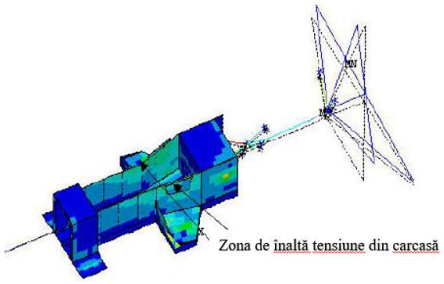


Fig. 2.13 Localizarea zonelor cu energie de deformare ridicată

2.2.2 Influența stării pneurilor

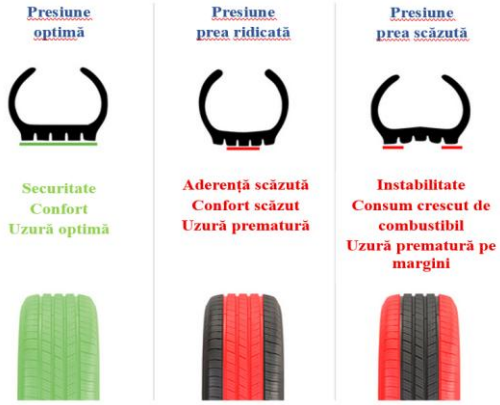


Fig. 2.14 Nivelul presiunii din pneu [31]

Presiunea incorectă în pneuri figurată în **fig. 2.14** afectează stabilitatea și efortul la volan.

2.2.3 Influența regimului de întreținere

Uzura bucșelor și a articulațiilor din **fig. 2.15** introduce vibrații suplimentare și instabilitate.

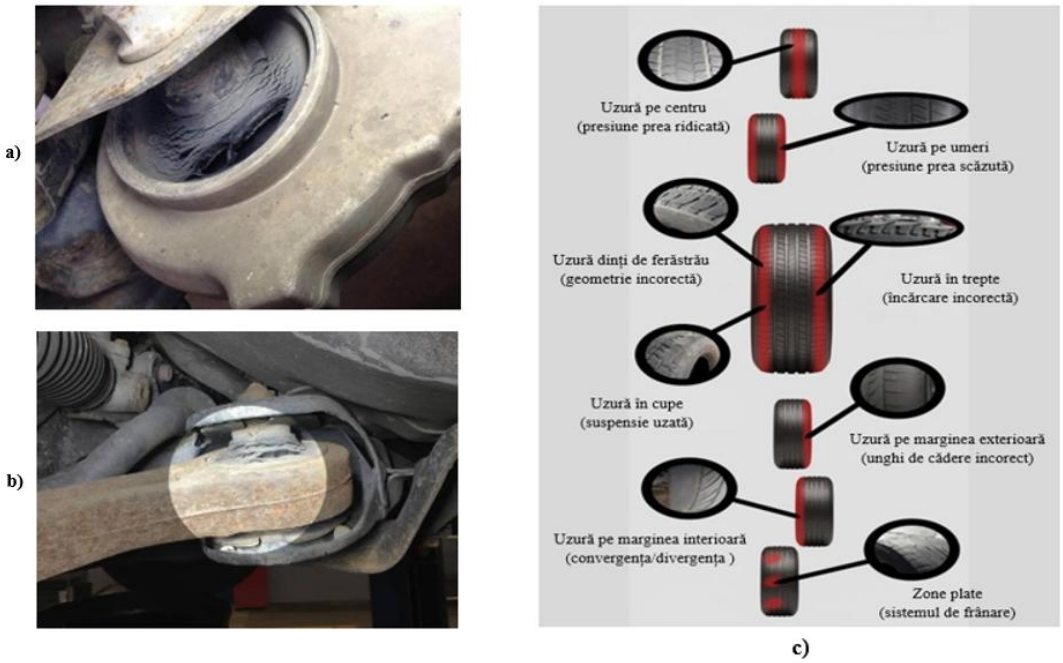


Fig. 2.15 a, **b**, **c** Exemple de bucșe uzate și efectul asupra pneurilor [32, 33]
a), **b)** elemente uzate ale suspensiei; **c)** uzura pneurilor

2.2.4 Influența factorilor de climă

Temperaturile scăzute cresc uzura sistemului de propulsie, prin degradarea lubrifierii, conform **fig. 2.16** [27], dar și a componentelor sistemului de direcție.

Umiditatea și agenții corozivi, clorura de calciu - $CaCl_2$, folosită la deszăpezire, produc degradări severe. Sunt documentate cedări ale elementelor de protecție arătate în cadrul **fig. 2.17**, coroziunea arborelui pinionului și a carcasei, în **fig. 2.18** [5, 34], ducând la pierderea rigidității structurale și cedarea suportului de prindere din **fig. 2.19** [18].

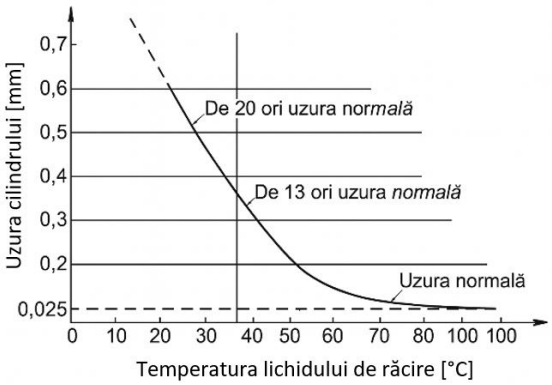


Fig. 2.16 Uzura cilindrului raportat la temperatura lichidului de răcire [27]



Fig. 2.17 Cedarea elementelor elastice de protecție și deteriorarea internă a cremalierei casetei de direcție [35, 36]

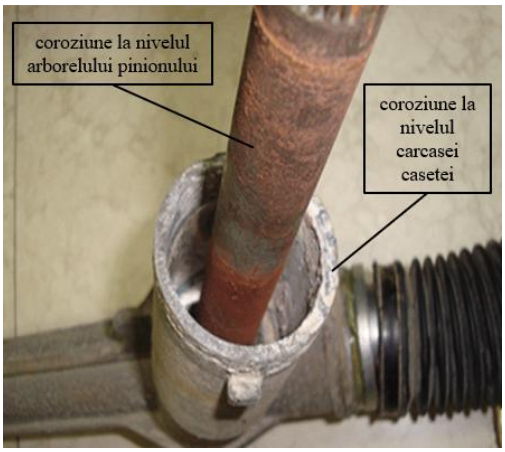


Fig. 2.18 Coroziune de suprafață asupra arborelui pinionului și a carcasei casetei de direcție [37]

Degradările la nivelul bieletelor și articulațiilor sunt exemplificate în **fig. 2.20**.



Fig. 2.19 Cedarea suportului de prindere datorită coroziunii [38]



Fig. 2.20 Coroziune asupra componentelor sistemului de direcție [36, 39]

2.3 Tendințe de îmbunătățire a comportamentului ansamblului casetei de direcție în diverse condiții funcționale prin utilizarea unor materiale moderne

Pentru a contracara influențele negative, în lucrare se are în vedere propune utilizarea materialelor compozite avansate.

În **tab. 2.1** sunt comparate proprietățile oțelului, aliajului de aluminiului și compozitelor, aramide, fibre de carbon. Fibrele de carbon oferă o rezistență specifică, σ / ρ și un modul de elasticitate specific, E/ρ net superioare aliajelor metalice.

Tab. 2.1 Proprietăți mecanice ale materialelor compozite [40]

Material	Densitate [g/cm^3]	Rezistență la tracțiune σ [MPa]	Modul de elasticitate E [GPa]	Rezistență specifică [σ / ρ]	Modul de elasticitate specific [E/ρ]
Oțel	7,8	1300	200	167	26
Aliaj aluminiu	2,81	350	73	124	26
Titan	4	900	108	204	25
Magneziu	1,8	270	45	150	25
Aramid	1,32	1400	45	1060	57
Fibre de carbon	1,51	2500	151	1656	100

Se utilizează conceptul de celulă unitară, prezentată în **fig. 2.21**, pentru a aproxima comportamentul materialului. Solicitările pe direcția fibrei sunt analizate în **fig. 2.22**, subliniindu-se rolul fibrelor în preluarea efortului longitudinal și al matricei pentru transferul de efort [41].

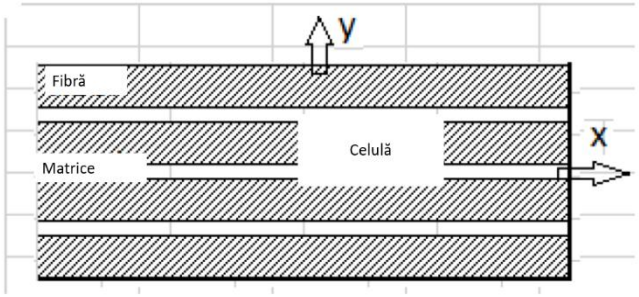


Fig. 2.21 Structura unei celule unitare

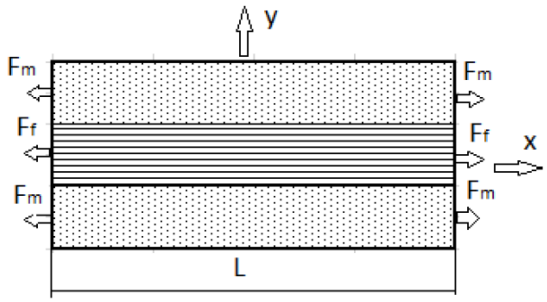


Fig. 2.22 Solicitări ale celulei unitare din material compozit pe direcția fibrei

La nivelul materialelor compozite modulul longitudinal E_x, obținut după regula amestecurilor, prezentată în relația următoare [42, 43] este:

$$E_x = E_f \cdot P_f + E_m \cdot P_m \tag{2.11}$$

în care s-a notat: E_x – modulul longitudinal de elasticitate al compozitului [GPa];

E_f – modulul de elasticitate al fibrei [GPa];

E_m – modulul de elasticitate al matricei [GPa];

P_f – proporția volumică a fibrei;

P_m – proporția volumică a matricei.

Proporțiile volumice P_f și P_m sunt definite prin raportul ariilor secțiunilor în relațiile următoare [42, 43]:

$$P_f = \frac{A_f}{A_x} \tag{2.12}$$

$$P_m = \frac{A_m}{A_x} \tag{2.13}$$

$$A_x = A_f + A_m \tag{2.14}$$

cu următoarele semnificații: A_x – aria totală a secțiunii compozitului [m²];

A_f – aria secțiunii transversale ocupate de fibre [m²];

A_m – aria secțiunii transversale ocupate de matrice [m²].

Modulul transversal E_y și modulul de forfecare G_{XY} sunt calculate prin regula inversă a amestecului, după cum urmează în relațiile următoare [42, 43]:

$$E_y = \frac{E_m \cdot E_{ft}}{(P_m \cdot E_{ft} + P_f \cdot E_m)} \tag{2.15}$$

unde: E_y – modulul transversal al compozitului [GPa];

E_{ft} – modulul transversal al fibrei [GPa];

E_m – modulul de elasticitate al matricei [GPa];

P_f – proporția volumică a fibrei;

P_m – proporția volumică a matricei.

$$G_{XY} = \frac{G_m \cdot G_{ft}}{(P_m \cdot G_{ft} + P_f \cdot G_m)} \tag{2.16}$$

în care: G_{XY} – modulul de forfecare al compozitului [GPa];

G_{ft} – modulul de forfecare al fibrei [GPa];

G_m – modulul de forfecare al matricei [GPa];

P_m – proporția volumică a matricei;

P_f – proporția volumică a fibrei.

Proprietățile anizotrope sunt evaluate prin variația modulului de elasticitate E_θ și a tensiunii de cedare $\sigma_{\theta R}$ în funcție de unghiul θ al fibrelor, conform relațiilor prezentate în continuare [44, 45]:

$$E_\theta = \frac{1}{\left[\left(\frac{c^4}{\sigma_{XR}} + \frac{s^4}{\sigma_{YR}}\right) + 2c^2 \cdot s^2 \cdot \left(\frac{1}{\tau^2} - \frac{v}{\sigma_{XR}^2}\right)\right]} \quad (2.17)$$

mărimile din relație reprezintă: E_θ – modulul de elasticitate echivalent al lamelei compozite pentru o solicitare aplicată la unghi θ [GPa];

$c = \cos\theta$, $s = \sin\theta$ – factori trigonometrici;

θ – unghiul dintre direcția fibrelor și direcția solicitării;

σ_{XR}, σ_{YR} – modulele de elasticitate echivalente în direcția longitudinală, respectiv transversală [GPa];

τ – modulul de forfecare în planul lamelei [GPa];

v – coeficientul Poisson al materialului compozit.

$$\sigma_{\theta R} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{c^4}{X^2} + \frac{s^4}{Y^2}\right) + c^2 \cdot s^2 \cdot \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2}\right)}} \quad (2.18)$$

unde: $\sigma_{\theta R}$ – tensiunea maximă admisibilă înainte de cedare, când solicitarea este aplicată la un unghi θ [MPa];

$c = \cos\theta$, $s = \sin\theta$ – factori trigonometrici;

θ – unghiul dintre direcția fibrelor și direcția solicitării;

X, Y – rezistențele materialului în direcția longitudinală (X) și transversală (Y) [MPa];

S – rezistența la forfecare în planul lamelei [MPa].

- Coeficientul Poisson se determină cu relația [41, 44, 46]:

$$v = v_f \cdot P_f + v_m \cdot P_m \quad (2.19)$$

în cadrul relației notațiile reprezentând: v – coeficient Poisson al compozitului;

v_f – coeficient Poisson al fibrei;

v_m – coeficient Poisson al matricei;

P_m – proporția volumică a matricei;

P_f – proporția volumică a fibrei.

2.4 Concluzii

Capitolul concluzionează că degradarea drumului și factorii climatici dictează regimul de solicitare al casetei de direcție. Materialele compozite, carbon LM și HM, Kevlar 49 reprezintă alternative viabile datorită raportului rezistență - masă ridicat, rezistenței la coroziune și capacității superioare de amortizare a vibrațiilor. Identificarea acestor factori constituie baza metodologică pentru simulările numerice ulterioare.

Capitolul 3

Metodologia de analiză și simulare a comportamentului dinamic al casetei de direcție

Acest capitol fundamentează abordarea numerică pentru evaluarea performanțelor structurale ale sistemului de direcție sub solicitări dinamice.

3.1 Definirea modelului virtual al casetei de direcție. Tipuri de solicitări

Metodologia adoptată se bazează pe analiza cu elemente finite FEA (**F**inite **E**lement **A**nalysis) pentru a investiga răspunsul structural al unei casete de direcție standard. Modelul tridimensional, prezentat în **fig. 3.1**, evidențiază corpul principal al carcasei și bridele de fixare. Evaluarea se concentrează pe două categorii majore de solicitări dinamice: vibrații aleatorii și șoc mecanic, ambele fiind esențiale pentru reproducerea condițiilor reale de exploatare auto.

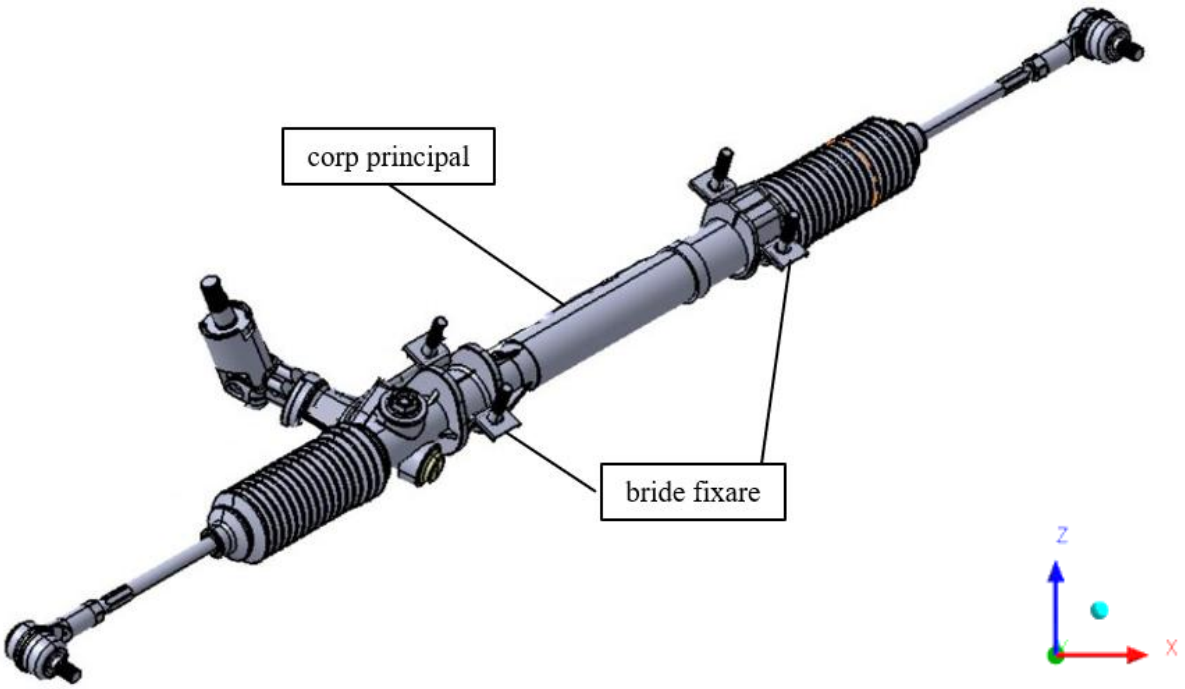


Fig. 3.1 Modelul virtual al ansamblului casetei de direcție folosită în simulare

3.2 Norme și condiții de simulare

Configurarea testelor respectă standardele internaționale IEC (**I**nternational **E**lectrotechnical Commission) [47, 48, 49]. Principalele norme aplicate includ:

- IEC 60068-2-6: pentru vibrații sinusoidale armonice.
- IEC 60068-2-64: pentru vibrații aleatorii în bandă largă.
- IEC 60068-2-81: pentru sinteza spectrului de răspuns la șoc. Pentru simularea șocului, s-a stabilit aplicarea unei accelerații de 50·G pe o durată de 6 [ms].

3.3 Instrumente software pentru analiza comportamentului dinamic

Simulările sunt realizate în mediul Ansys Workbench, care integrează diverse aplicații cheie, precum analiza structurală și dinamica fluidelor sunt prezentate în **fig. 3.2**.

Analiza structurală	• Ansys poate fi utilizat pentru analiza tensiunilor, analiza vibrațiilor și alte simulări structurale pentru a asigura integritatea structurală a proiectelor;
Dinamica fluidelor	• Oferă instrumente pentru simularea fluxului de fluid, transferul de căldură și alte fenomene legate de fluide, ceea ce este valoros în proiectarea de produse eficiente și sigure;
Electromagnetică	• Oferă soluții pentru simularea câmpurilor electromagnetice, a antenelor și a compatibilității electromagnetice (EMC) pentru a proiecta dispozitive și sisteme electronice;
Analiză termică	• Se poate folosi pentru analiza termică, pentru a evalua distribuția temperaturii în cadrul unui proiect, ceea ce este crucial pentru gestionarea căldurii și performanța termică;
Simulări multifizice	• Permite utilizatorilor să efectueze simulări care implică mai multe fenomene fizice, cum ar fi interacțiunea fluid - structură, cuplarea termică-electromagnetică și multe altele;
Optimizare	• Include instrumente pentru optimizare a designului, permițând inginerilor să găsească cei mai buni parametri de proiectare care îndeplinesc criteriile de performanță specificate;
Dinamica explicită	• Acceptă simulări ale evenimentelor dinamice, cum ar fi impactul, testele de impact și alte scenarii cu sarcini tranzitorii;
Fabricare aditivă	• Ansys are capabilități de simulare și optimizare a proceselor de fabricație aditivă, cum ar fi imprimarea 3D;
Simulare de sisteme	• Inginerii pot folosi Ansys pentru a modela și simula sisteme complexe, inclusiv sisteme mecatronice și sisteme de control;
Analiza durabilității și oboselii	• Ajută la evaluarea durabilității pe termen lung a componentelor și structurilor sub sarcini ciclice [50].

Fig. 3.2 Principalele aplicații cheie ale software-ului Ansys

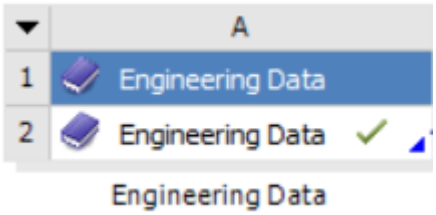


Fig. 3.3 Secțiunea A din cadrul Ansys workbench manager

Prin structura sa bine organizată și natura interactivă, Ansys sprijină explorarea iterativă a soluțiilor și optimizarea design-ului, realizarea unor analize inginerești detaliate și gestionarea proiectelor complexe. Procesul implică utilizarea următoarelor module:

- *Engineering Data*, Secțiunea A, destinată gestionării proprietăților materialelor și creării bibliotecilor personalizate arătate în cadrul **fig. 3.3** și **fig. 3.4**.

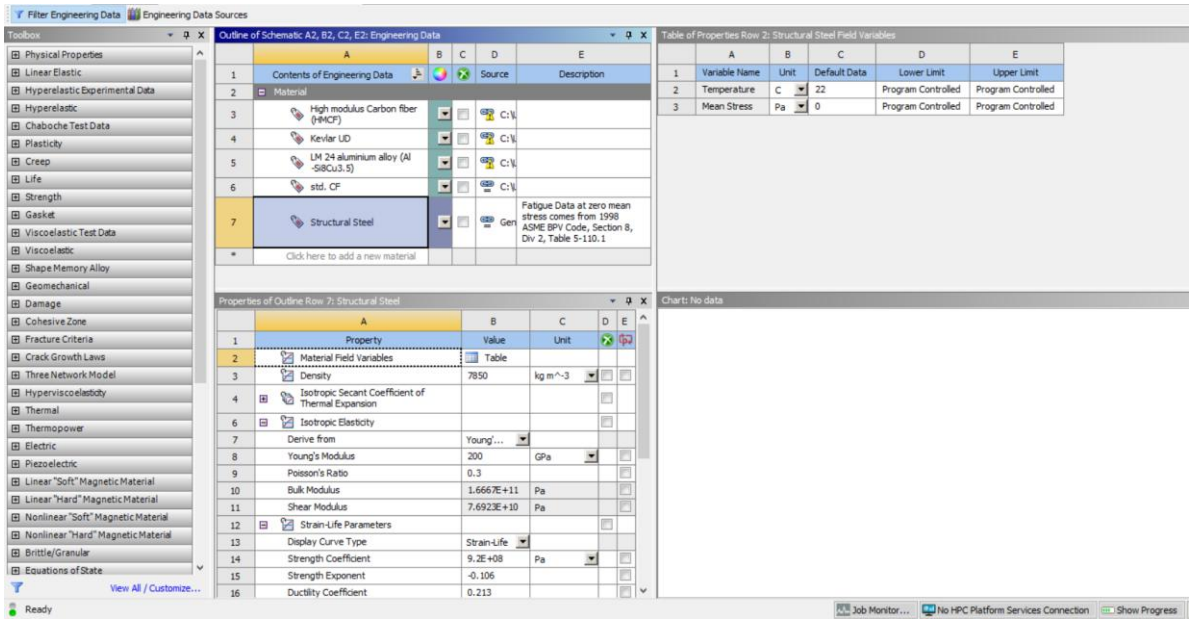


Fig. 3.4 Structura și funcționalitățile cheie din cadrul secțiunii A

- *Geometry,* Modulul D, utilizat pentru importul și manipularea geometriilor CAD (**C**omputer-**A**ided **D**esign), și structura din cadrul modulului prezentate în **fig. 3.5** și **fig. 3.6**.

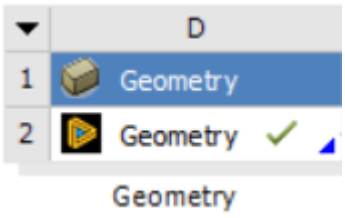


Fig. 3.5 Modulul D din cadrul Ansys workbench manager

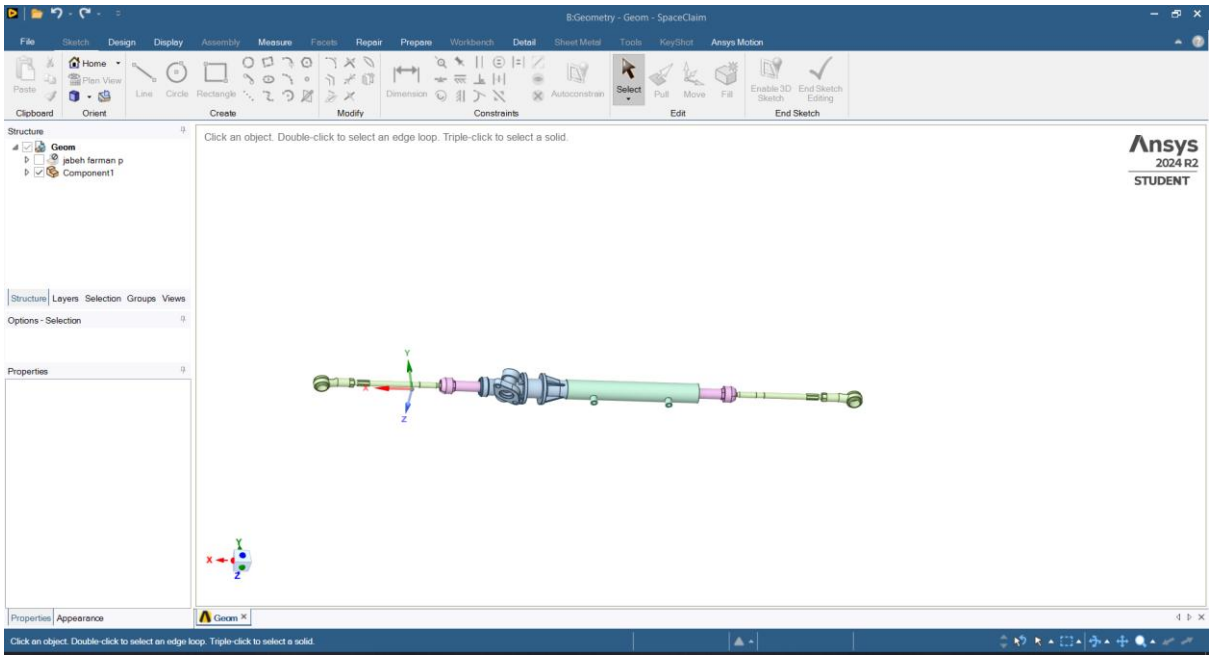


Fig. 3.6 Structura din cadrul modulului *Geometry*

3.4 Tipurile de simulări folosite în cadrul studiului realizat

Cercetarea implementează trei tipuri de simulări strategice, ilustrate în **fig. 3.7**:

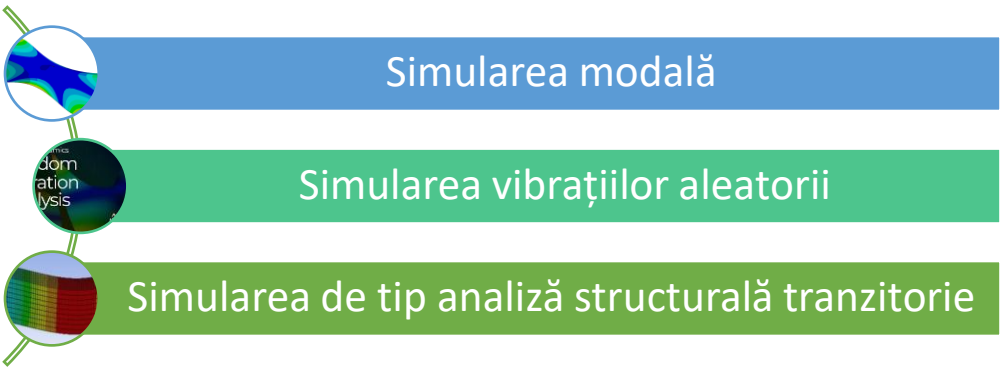


Fig. 3.7 Tipurile de simulări utilizate în cadrul simulării

3.4.1 Simularea modală

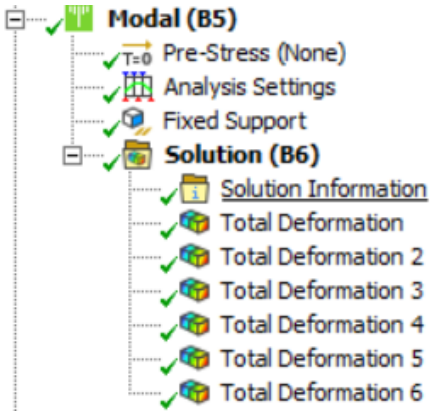


Fig. 3.8 Arborele din cadrul setărilor *Modal*

Configurarea setărilor specifice *Analysis Settings*, *Fixed Support*, este detaliată în **fig. 3.8**. Analiza modală determină frecvențele proprii și formele modale, fiind importantă pentru prevenirea rezonanței. Din punct de vedere matematic, aceasta rezolvă ecuația de mișcare fără amortizare [51, 52]:

$$[M]\cdot\{\ddot{u}\}+[K]\cdot\{u\}=0 \qquad (3.1)$$

unde: $[M]$ este matricea de masă;

$[K]$ este matricea de rigiditate;

$\{\ddot{u}\}$, $\{u\}$ sunt accelerația și deplasarea;

3.4.2 Simularea vibrațiilor aleatorii

Această tehnică evaluează structura sub excitații stocastice prin intermediul densității spectrale de putere PSD (**P**ower **S**pectral **D**ensity), reprezentată în **fig. 3.9**.

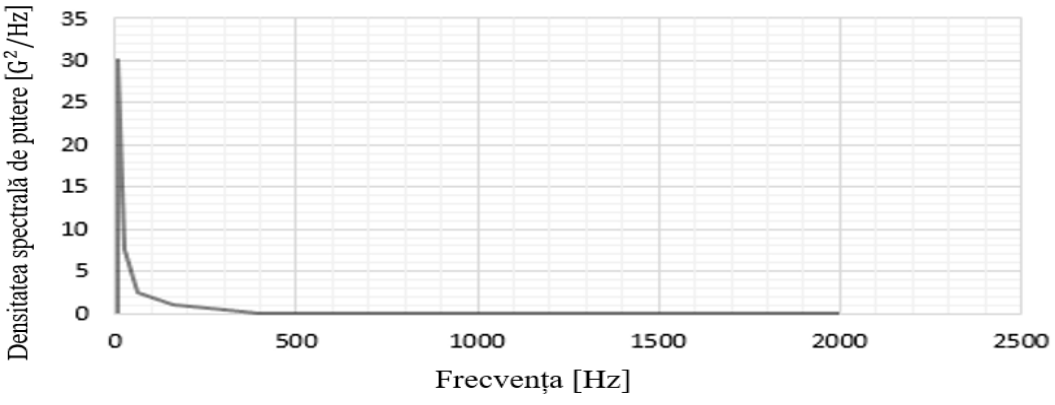


Fig. 3.9 Profil de densitate spectrală de putere

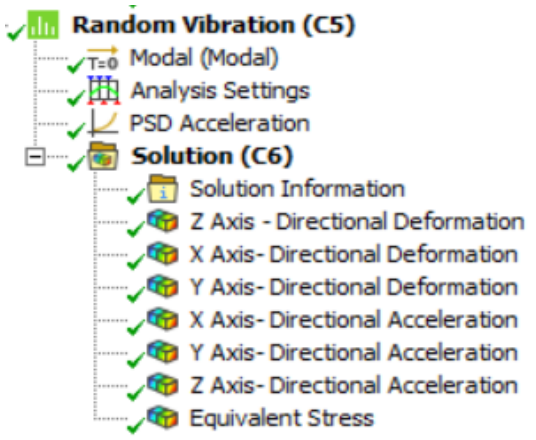


Fig. 3.10 Arborele din cadrul setărilor *Random Vibration*

Arborele setărilor pentru acest modul este prezentat în **fig. 3.10**. Analiza se bazează pe transformata Fourier pentru trecerea din domeniul timp în frecvență [53]:

$$\hat{x}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft}\, dt \tag{3.2}$$

unde: $\hat{x}(f)$ – este transformata Fourier a semnalului;

$x(t)$ – semnalul analizat în domeniul timp [s];

f – frecvența [Hz];

i – constanta imaginară.

3.4.3 Analiză structurală tranzitorie

Simularea tranzitorie TS (**T**ransient **S**tructural) este utilizată pentru modelarea răspunsului la sarcini variabile în timp, precum impactul sau șocul [53, 54]. Profilul accelerației utilizat este redat în **fig. 3.11**, iar configurația parametrilor, pași de timp, condiții inițiale, este vizibilă în **fig. 3.12**.

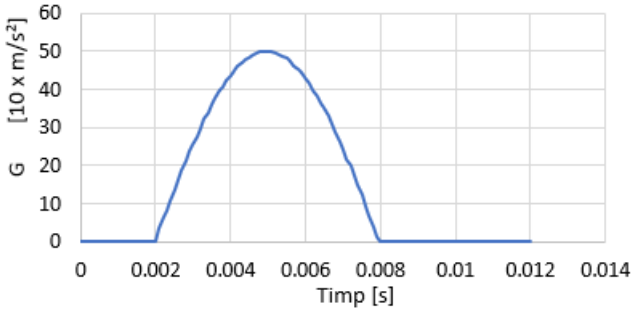


Fig. 3.11 Profilul accelerației folosit pentru simularea la șoc

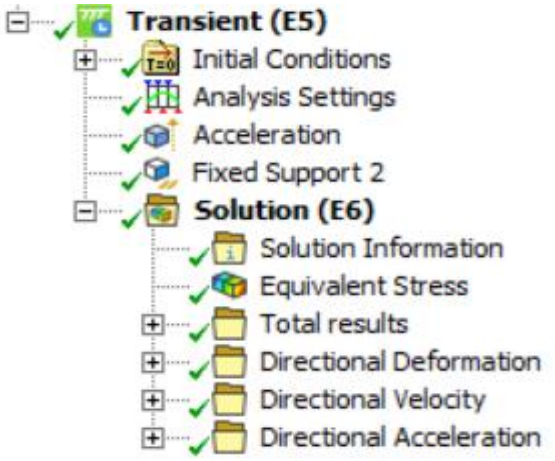


Fig. 3.12 Arborele din cadrul setărilor *Transient*

3.5 Configurarea modelului virtual

Condițiile limită stabilesc zonele de fixare rigidă, prezentate în **fig. 3.13**. Etapele de import și definire a modelului sunt gestionate conform arborelui din **fig. 3.14**. Discretizarea geometrică, *Mesh*, ilustrată în **fig. 3.15**, împarte modelul în 101.390 de noduri și 55.483 de elemente finite pentru a asigura precizia rezultatelor [55, 56].

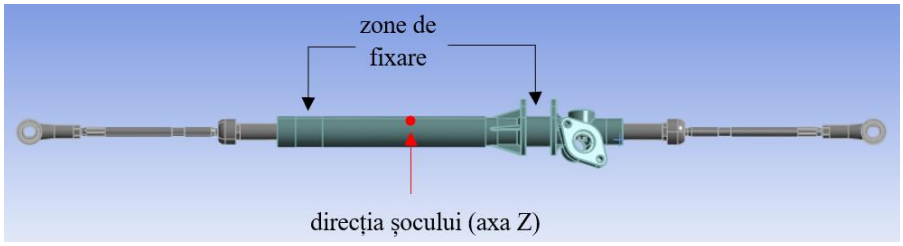


Fig. 3.13 Condițiile limită pentru simulare

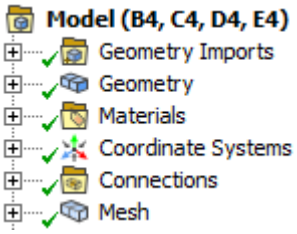


Fig. 3.14 Arborele de definire al modelul

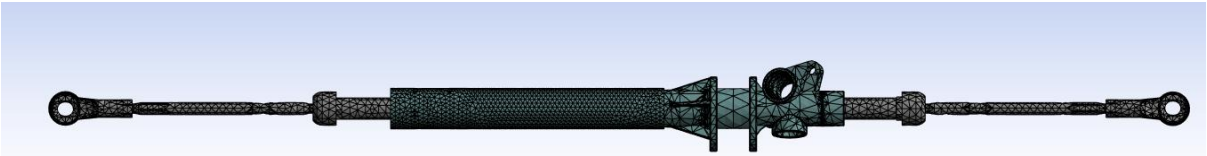


Fig. 3.15 Discretizarea geometrică a modelului virtual

3.6 Concluzii

Capitolul definitivează cadrul metodologic prin integrarea etapelor de simulare în mediul Ansys. O contribuție importantă este stabilirea regulii de denumire a figurilor, astfel prima literă indică axa de aplicare a vibrațiilor, iar a doua literă reprezintă axa parametrului simulat. Această convenție asigură claritatea evaluărilor comparative ce vor urma în capitolele dedicate materialelor compozite.

Capitolul 4

Simulări ale comportării casetei de direcție realizată din aliaj de aluminiu

În cadrul capitolului au fost efectuate analize privind răspunsul structural și dinamic al ansamblului casetei de direcție realizată dintr-un material metalic de referință: aliajul de aluminiu LM24, respectiv $AlSi_8Cu_3$. Investigarea vizează identificarea performanțelor acestui material, utilizat în mod curent în industria auto, sub influența vibrațiilor aleatorii și a șocurilor mecanice, condiții generate de starea căii de rulare și parametrii cinematici de deplasare.

4.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii

Metodologia de lucru a implicat aplicarea solicitărilor de tip PSD (**P**ower **S**pectral **D**ensity) pe cele trei axe principale de coordonate X, Y și Z, asigurând astfel o evaluare realistă a comportamentului tridimensional al structurii [57, 58, 59]. Un aspect fundamental al analizei îl reprezintă faptul că, deși excitația este aplicată pe o singură axă, geometria complexă a casetei determină răspunsuri dinamice, accelerații și deformații, pe toate cele trei direcții de referință. Figurile sunt denumite în conformitate cu regula stabilită în capitolul anterior, iar în continuare sunt prezentate rezultatele corespunzătoare valorilor maxime înregistrate.

Cele mai ridicate valori ale accelerațiilor au fost înregistrate în urma aplicării vibrațiilor pe direcția axei Z, după cum se observă în **fig. 4.1**, evidențiind o valoare maximă de 413,45 [m/s²].

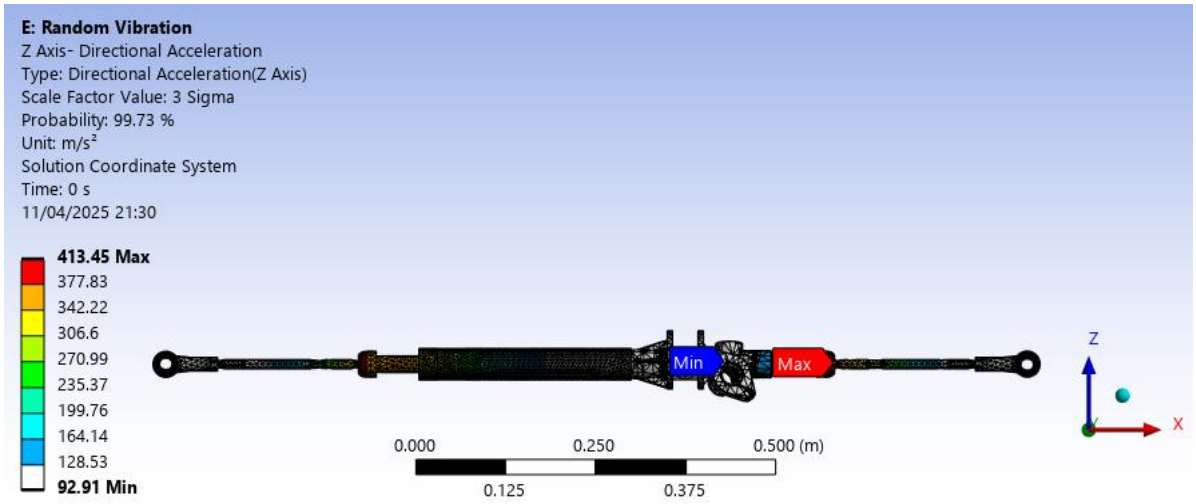


Fig. 4.1 Accelerațiile ZZ datorate vibrațiilor aleatorii- LM24

Această valoare de vârf este localizată în apropierea zonei de prindere a bieletei la cremalieră, indicând o zonă de intensitate ridicată a solicitărilor dinamice.

Valorile cele mai pronunțate ale deformațiilor au fost identificate în cazul solicitărilor pe axa Y. Astfel, la aplicarea vibrațiilor pe axa Y, s-a condus la o deformație maximă de 0,79 [mm], prezentată în **fig. 4.2**.

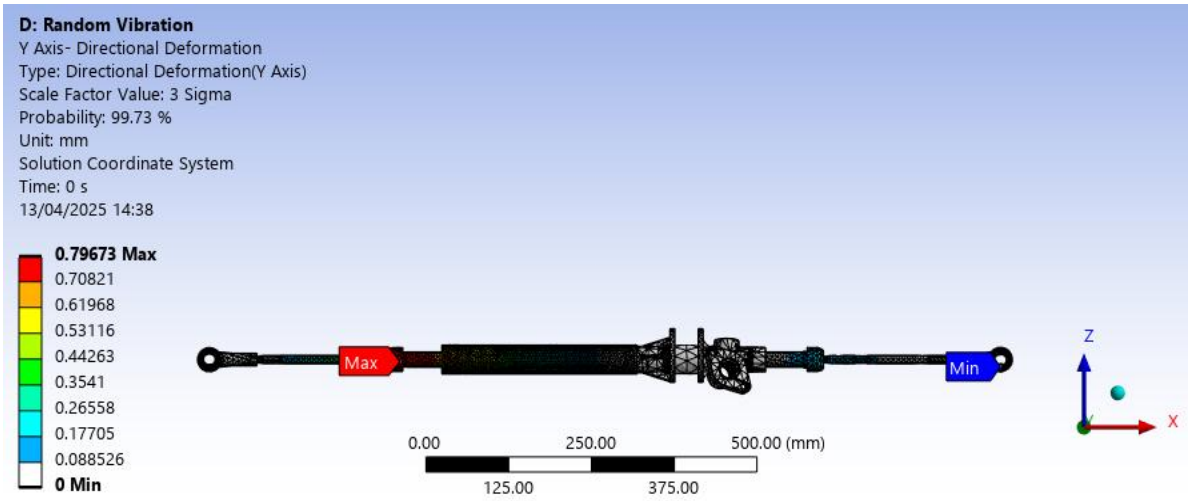


Fig. 4.2 Deformațiile YY datorate vibrațiilor aleatorii- LM24

Valoarea maximă a deformației, cuantificată la 0,79 [mm], este situată în zona de îmbinare a bieletei de direcție cu cremaliera. Această localizare sugerează o acumulare semnificativă a solicitărilor mecanice, indicând puncte critice potențiale, care necesită o analiză detaliată și, posibil, ajustări în proiectarea sau optimizarea structurii pentru a asigura fiabilitatea și durabilitatea acesteia în condiții operaționale.

Pe de altă parte, valorile tensiunilor echivalente obținute în urma simulărilor, la nivelul carcasei confecționate din materialul de referință LM24 sunt prezentate în **fig. 4.3**.

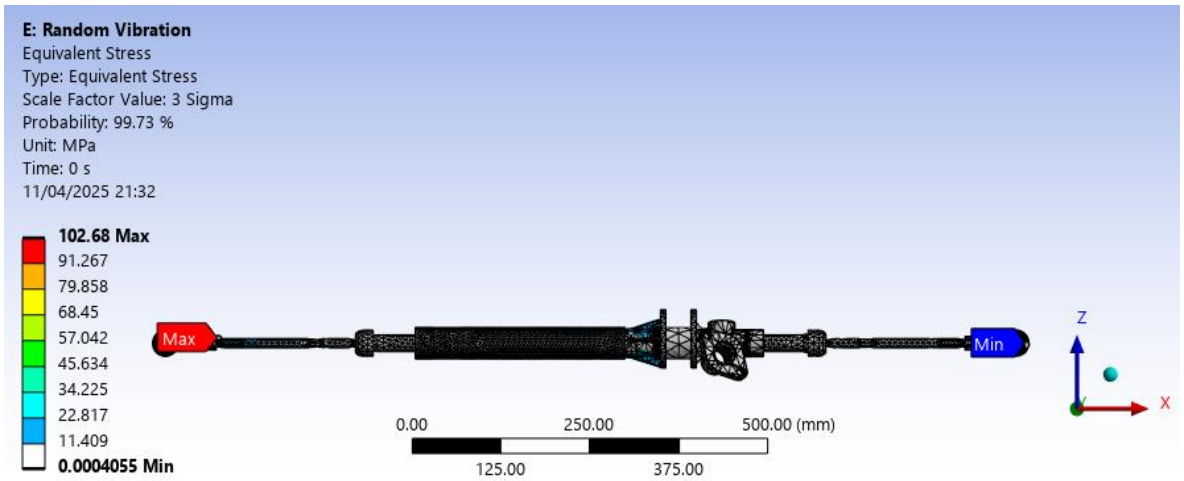


Fig. 4.3 Tensiuni echivalente obținute prin simularea vibrațiilor aleatorii pe axa Z- LM24

Rezultatele simulării arată o tensiune maximă de 102,68 [MPa], localizată la nivelul îmbinării dintre pivot și bieleta de direcție. Această regiune de contact se confruntă cu cele mai mari solicitări mecanice, ceea ce sugerează o potențială concentrare a tensiunilor în cadrul ansamblului casetei de direcție și implicit asupra componentelor sistemului de direcție, cu riscuri asociate cu uzură prematură sau cu cedarea materialului.

4.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc

Această secțiune a capitolului abordează comportamentul tranzitoriu al casetei supuse unor sarcini dinamice de scurtă durată, similare impactului cu corpuri exterioare sau denivelări majore. Analiza structurală tranzitorie a evidențiat următoarele rezultate.

Tensiunile echivalente, prezentate în **fig. 4.4**, ating la impact o valoare maximă de 287,29 [MPa].

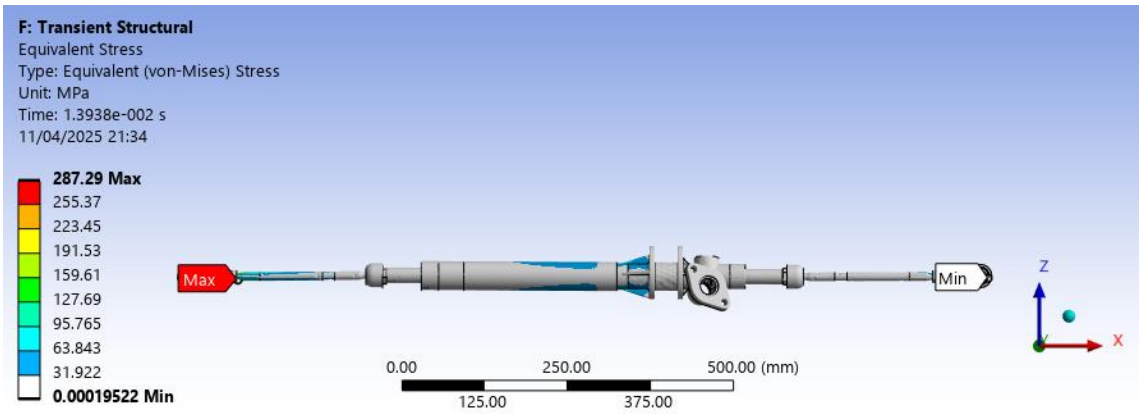


Fig. 4.4 Tensiuni echivalente- LM24

Această valoare de vârf este localizată la îmbinarea filetată a pivotului cu bieleta de direcție. Deși ridicată, această valoare a tensiunii nu depășește limita de rupere a materialului bieletei, oțel aliat, care este de cel puțin patru ori mai mare.

Deformația totală în regim de șoc, ilustrată în **fig. 4.5**, atinge un maxim cuantificat la 2,14 [mm].

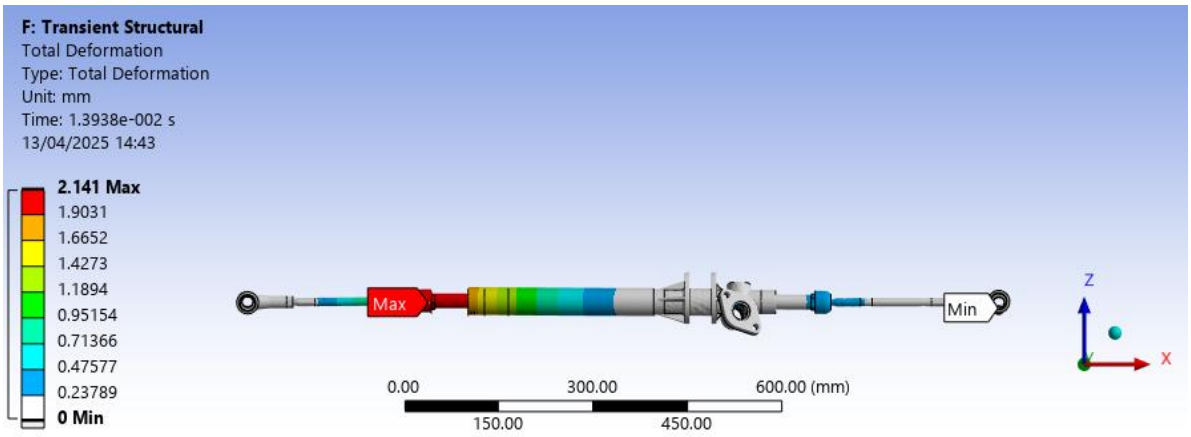


Fig. 4.5 Deformații totale- LM24

Localizarea acesteia la nivelul îmbinării dintre cremalieră și bieletă indică o zonă critică ce poate influența negativ alinierea sistemului și stabilitatea direcțională în urma unui impact sever.

4.3 Concluzii

Cercetările efectuate au condus la formularea următoarelor concluzii fundamentale privind utilizarea aliajului de aluminiu LM24 în construcția casetei de direcție:

- răspunsul structural al ansamblului este puternic dependent de direcția de aplicare a vibrațiilor, cele mai mari amplitudini fiind înregistrate pe axele Y și Z;
- cele mai ridicate valori ale accelerațiilor, deformațiilor și tensiunilor au fost localizate sistematic în zona articulațiilor sferice ale bieletelor și la nivelul îmbinărilor filetate;
- analiza pe axele X, Y și Z a demonstrat că structura casetei de direcție prezintă rigidități diferite în funcție de direcția solicitărilor, comportamentul cel mai stabil fiind observat pe axa Z;
- deși aliajul LM24 oferă o prelucrabilitate bună și o masă redusă, valorile tensiunilor în regim de șoc, de 287,29 [MPa] și deformațiile locale semnificative, respectiv 2,14 [mm] justifică necesitatea explorării unor materiale avansate, precum compozitele, pentru a îmbunătăți capacitatea de amortizare și rigiditatea specifică.

Aceste rezultate constituie baza de referință pentru analizele comparative din capitolele următoare, dedicate materialelor pe bază de fibre de carbon și aramidă, oferind un termen de comparație clar pentru optimizarea structurală a componentelor sistemului de direcție.

Capitolul 5

Simulări ale comportării casetei de direcție realizată din fibre de carbon

Prezentul capitol este dedicat investigării prin simulare numerică a răspunsului structural și dinamic al unei casete de direcție realizată din materiale compozite avansate, respectiv fibre de carbon de tip LM (**L**ow **M**odulus) și HM (**H**igh **M**odulus). Demersul științific urmărește evaluarea comparativă a acestor soluții constructive în raport cu materialele metalice convenționale, utilizând aceleași metodologii de testare la vibrații aleatorii și șoc mecanic, stabilite anterior.

5.1 Caseta de direcție realizată din fibre de carbon LM

În prima parte a capitolului se analizează comportamentul ansamblului casetei confecționate din fibre de carbon cu modul de elasticitate scăzut LM. Studiul implică o evaluare detaliată a dinamicii sistemului pe cele trei axe de coordonate X, Y, Z pentru a identifica zonele de maximă solicitare sub excitații stocastice [60, 61].

5.1.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii

Analiza la vibrații aleatorii a evidențiat faptul că răspunsul structural al compozitului LM este puternic influențat de direcția de aplicare a sarcinii, prezentând variații semnificative ale accelerațiilor și deformațiilor [60, 61].

Cele mai ridicate valori ale accelerațiilor au fost înregistrate în urma aplicării vibrațiilor pe direcția axei Z. Conform **fig. 5.1**, s-a obținut o valoare de vârf de 401,14 [m/s²], localizată la nivelul îmbinării bieletei de direcție cu ansamblul cremalierei.

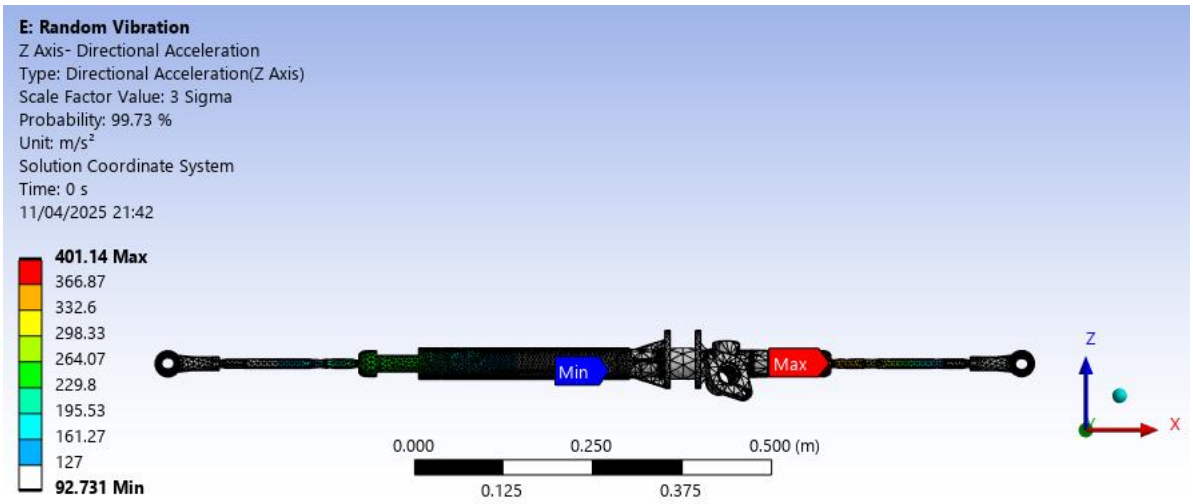


Fig. 5.1 Accelerațiile ZZ datorate vibrațiilor aleatorii- fibre de carbon LM

Această amplitudine ridicată indică o zonă de intensitate ridicată a solicitărilor dinamice.

Valorile cele mai pronunțate ale deformațiilor au fost identificate în cazul solicitărilor pe axa Z. Astfel, la aplicarea vibrațiilor pe axa Z, s-a înregistrat o deformație maximă de 0,29 [mm], evidențiată în cadrul **fig. 5.2**, localizată în zona de mijloc a sectorului lung al carcasei, semnalând posibile riscuri de modificare a jocurilor funcționale sau de gripaj al cremalierei.

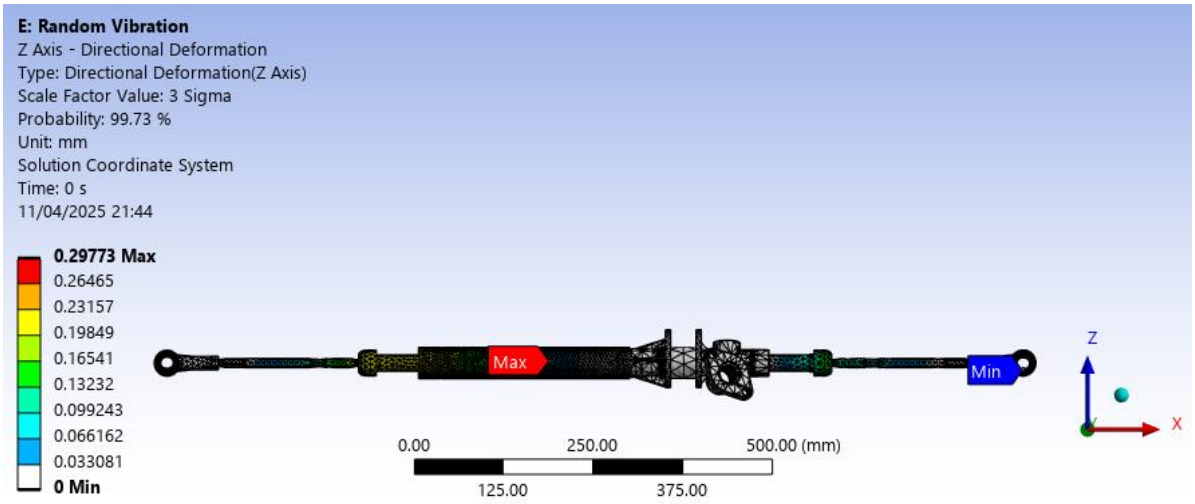


Fig. 5.2 Deformațiile ZZ datorate vibrațiilor aleatorii- fibre de carbon LM

Cele mai mari tensiuni echivalente au fost generate de vibrațiile pe direcția Z, atingând un maxim de 60,61 [MPa], conform **fig. 5.3**.

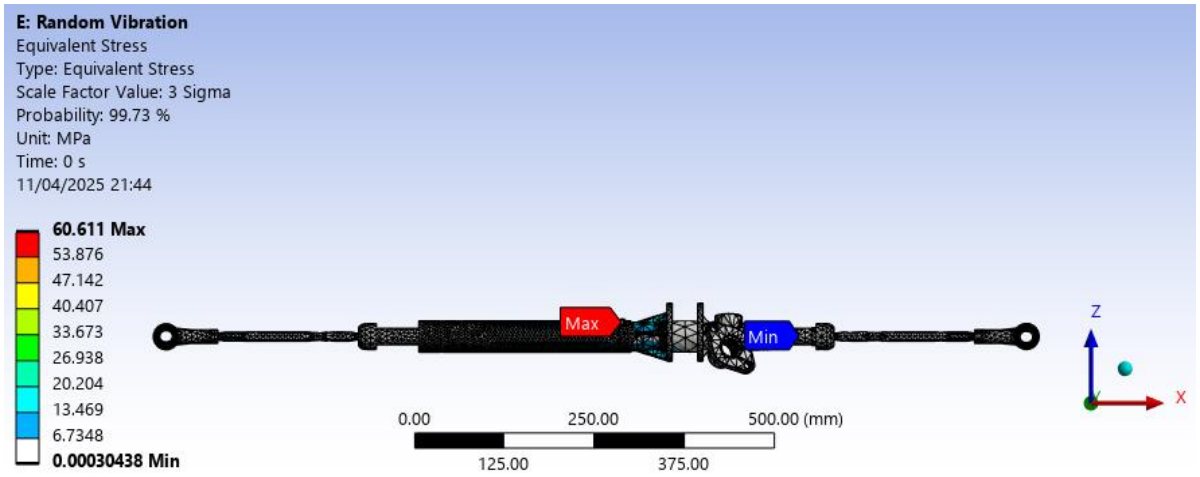


Fig. 5.3 Tensiuni echivalente obținute prin simularea vibrațiilor aleatorii pe axa Z- fibre de carbon LM

Această tensiune maximă este concentrată la nivelul ranforsării umerilor din zona de prindere a casetei, reprezentând punctul cu cea mai mare acumulare de energie elastică sub regim vibratoriu aleatoriu.

5.1.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc

Evaluarea comportamentului în regim tranzitoriu, generat de impact, pentru materialul LM, a relevat următoarele rezultate critice.

Analiza prezentată în **fig. 5.4** indică o valoare maximă a tensiunii de 118,19 [MPa].

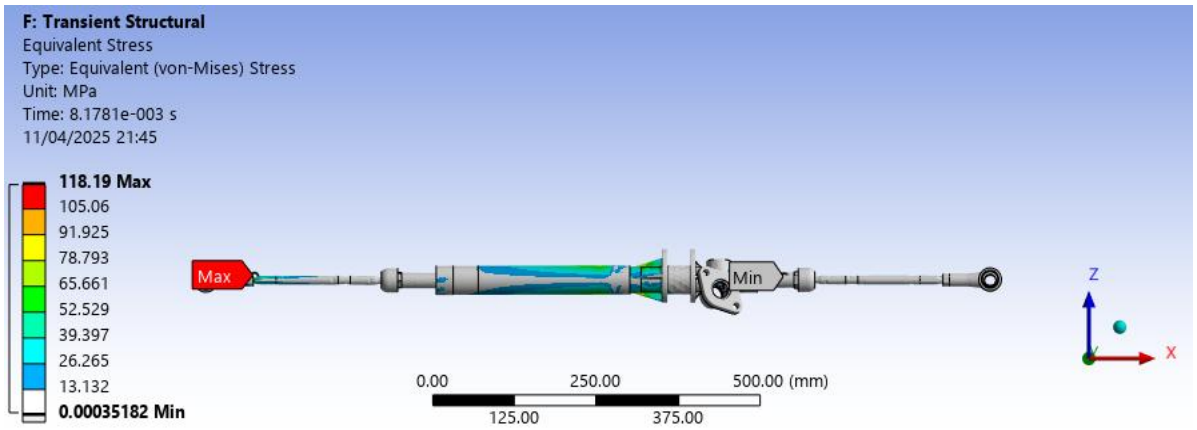


Fig. 5.4 Tensiuni echivalente- fibre de carbon LM

Aceasta este localizată la îmbinarea filetată dintre pivot și bieletă, zonă identificată ca fiind vulnerabilă din punct de vedere al rezistenței structurale la solicitări bruște.

Conform **fig. 5.5**, valoarea maximă a deformației sub șoc a fost de 1,01 [mm], manifestându-se în zona centrală a sectorului lung al corpului casetei.

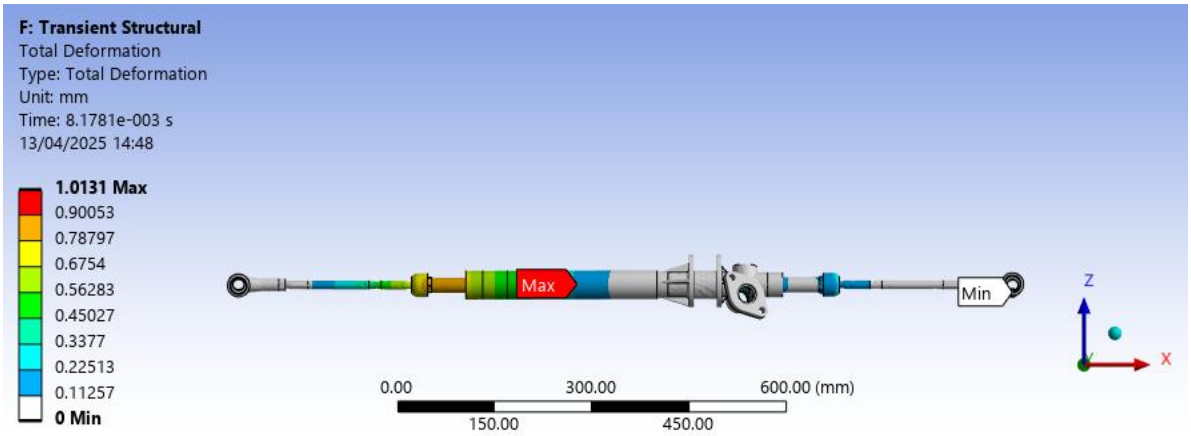


Fig. 5.5 Deformații totale- fibre de carbon LM

O astfel de acumulare poate compromite alinierea componentelor interconectate.

5.2 Caseta de direcție realizată din fibre de carbon HM

A doua secțiune a capitolului investighează utilizarea fibrelor de carbon cu modul de elasticitate ridicat HM, material care oferă o rigiditate superioară și o rezistență mai uniformă sub solicitări dinamice complexe.

5.2.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii

Similar analizei precedente, au fost identificate valorile de vârf pentru accelerații, deformații și tensiuni sub acțiunea profilelor PSD. În cazul fibrelor HM, valoarea maximă a accelerației a fost înregistrată la aplicarea vibrațiilor pe direcția axei Y, atingând 380,46 [m/s²], prezentată în **fig. 5.6**.

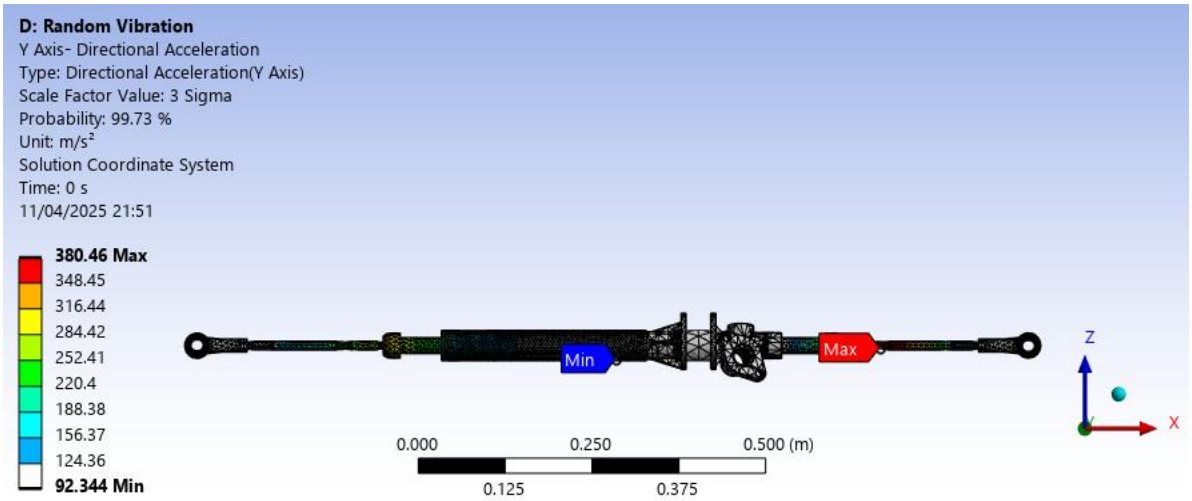


Fig. 5.6 Accelerațiile YY datorate vibrațiilor aleatorii- fibre de carbon HM

Utilizarea fibrelor HM a condus la o reducere a deformațiilor maxime, confirmând rigiditatea superioară a materialului. Din **fig. 5.7** reiese distribuția deformațiilor pe axa Y, determinate de vibrațiile aleatorii aplicate pe direcția axei Y, valoarea maximă a deformației, cuantificată la 0,21 [mm], fiind situată în zona centrală a casetei de direcție.

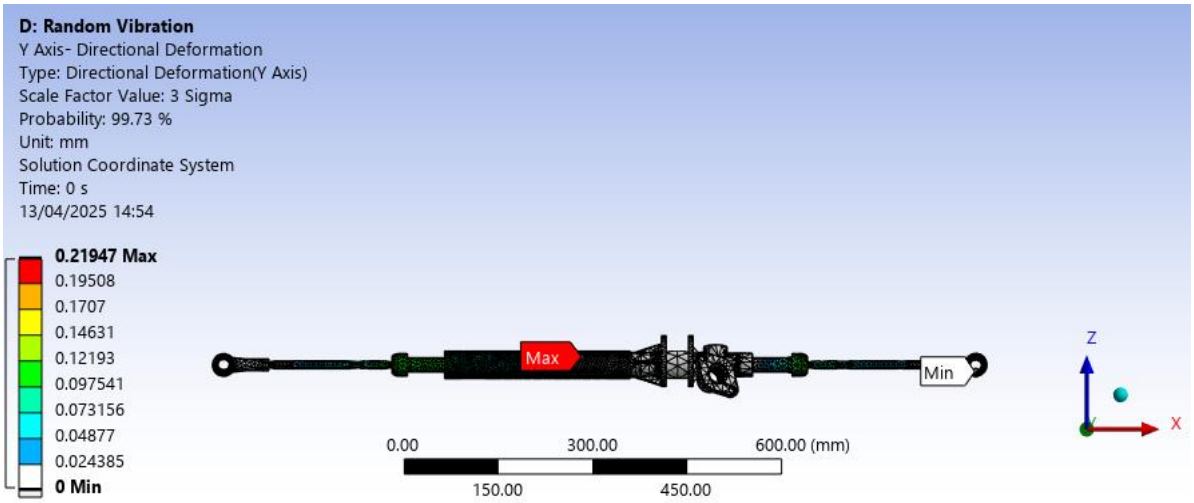


Fig. 5.7 Deformațiile YY datorate vibrațiilor aleatorii- fibre de carbon HM

Tensiunile echivalente cu valoarea cea mai ridicată au fost de 54,74 [MPa] conform **fig. 5.8**, obținut din solicitarea pe axa Z.

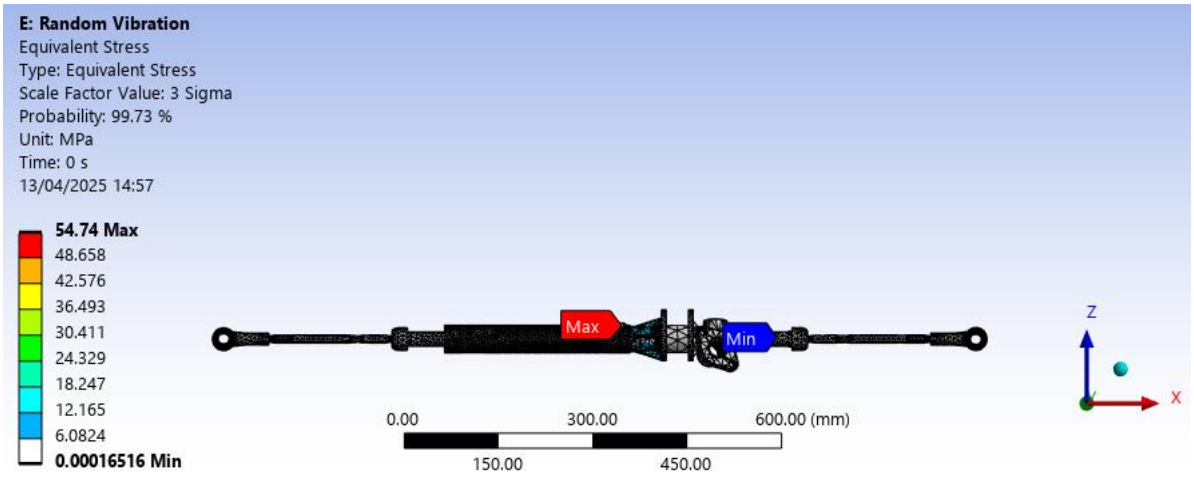


Fig. 5.8 Tensiuni echivalente obținute prin simularea vibrațiilor aleatorii pe axa Z- fibre de carbon HM

Tensiunea este localizată la nivelul ranforsărilor umerilor de ghidare ai zonei de prindere, indicând o distribuție mai eficientă a sarcinilor, comparativ cu varianta LM.

5.2.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc

Răspunsul la impact al casetei din fibre de carbon HM evidențiază performanțe structurale îmbunătățite.

Conform **fig. 5.9**, valoarea maximă a tensiunii echivalente este de 99,75 [MPa].

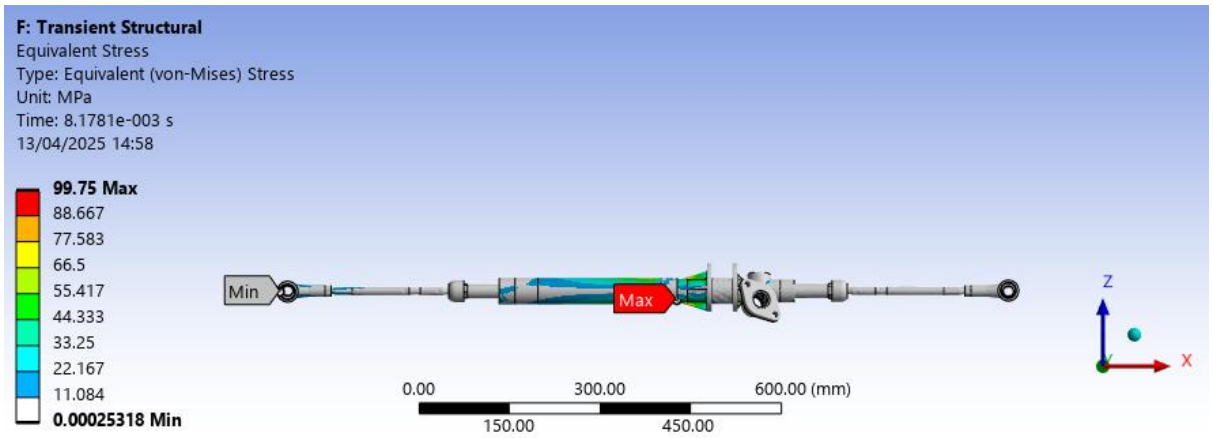


Fig. 5.9 Tensiuni echivalente- fibre de carbon HM

Aceasta rămâne localizată în zona ranforsărilor umerilor de ghidare.

Analiza din **fig. 5.10** indică o deformație totală de 0,82 [mm] în zona centrală a corpului casetei.

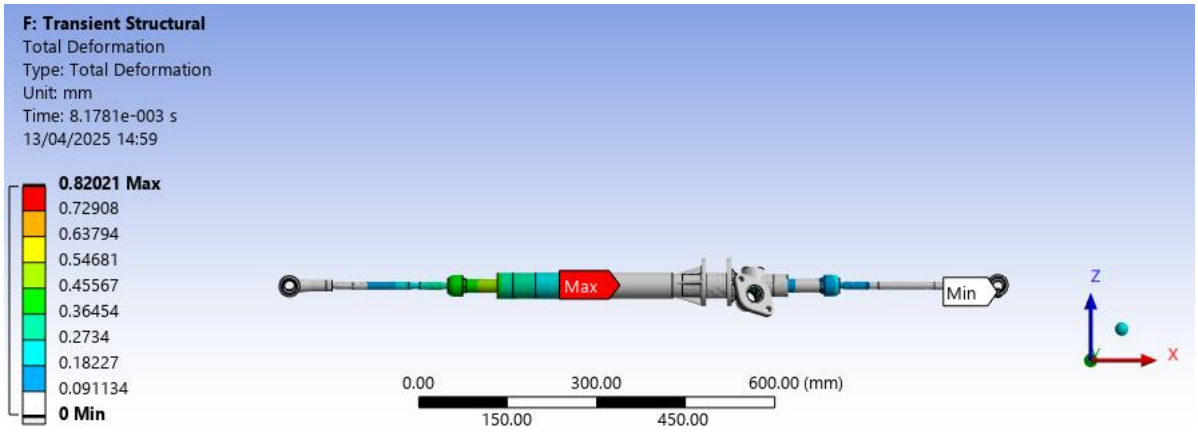


Fig. 5.10 Deformații totale- fibre de carbon HM

Această valoare inferioară, de sub 1 [mm] demonstrează stabilitatea dimensională superioară a fibrelor HM în condiții de impact.

5.3 Concluzii

Cercetările prezentate permit formularea unor concluzii fundamentale privind utilizarea fibrelor de carbon în construcția sistemelor de direcție:

- fibrele de carbon HM prezintă performanțe superioare celor LM, oferind o reducere a deformațiilor maxime de la 0,29 [mm] la 0,21 [mm] în regim de vibrații și o limitare a deformației la șoc la 0,82 [mm];
- s-a observat o diminuare semnificativă a tensiunilor maxime sub șoc, de la 287,29 [MPa] aliaj de aluminiu la 118,19 [MPa] fibre de carbon LM și ulterior la 99,75 [MPa] fibre de carbon HM;
- indiferent de tipul de fibră utilizat, zonele cele mai expuse rămân îmbinările filetate ale bieletelor și regiunile de prindere (ranforsările umerilor), necesitând o atenție deosebită în procesul de optimizare geometrică;
- materialele compozite pe bază de carbon demonstrează o capacitate superioară de gestionare a solicitărilor dinamice, asigurând o rigiditate ridicată concomitent cu o masă redusă, aspect esențial pentru performanța autovehiculelor moderne.

Aceste rezultate validează potențialul materialelor compozite de a înlocui aliajele de aluminiu în zonele critice ale casetei de direcție, oferind baza pentru dezvoltarea geometriei hibride ce va fi tratată în capitolele ulterioare.

Capitolul 6

Simulări ale comportării casetei de direcție realizată din Kevlar 49 - fibre de aramidă

Prezentul capitol este dedicat investigării prin simulare numerică a răspunsului structural și dinamic al ansamblului casetei de direcție, în varianta constructivă în care carcasa este realizată din materialul compozit Kevlar 49 - fibre de aramidă. Obiectivul central al cercetării este evaluarea performanțelor acestui material avansat în raport cu solicitările dinamice specifice exploatării autovehiculelor, respectiv vibrațiile aleatorii și șocurile mecanice. Studiul urmărește identificarea zonelor de concentrare a eforturilor și a modului în care proprietățile specifice ale aramidelor influențează integritatea ansamblului.

6.1 Simulări ale comportării casetei de direcție la vibrații aleatorii

Investigația comportamentului dinamic sub acțiunea vibrațiilor aleatorii a fost realizată prin aplicarea profilelor de densitate spectrală de putere PSD pe cele trei axe ortogonale de referință X, Y și Z, asigurându-se astfel o viziune completă asupra dinamicii sistemului [42, 43, 61]. Metodologia de analiză respectă convenția de denumire stabilită la finalul ***Capitolului 3***, unde prima literă indică axa de aplicare a vibrațiilor, iar a doua literă reprezintă axa pe care se simulează parametrul respectiv.

Cea mai ridicată valoare a accelerației a fost înregistrată la aplicarea vibrațiilor pe direcția axei Z. Conform **fig. 6.1**, s-a obținut o valoare de 415,99 [m/s²].

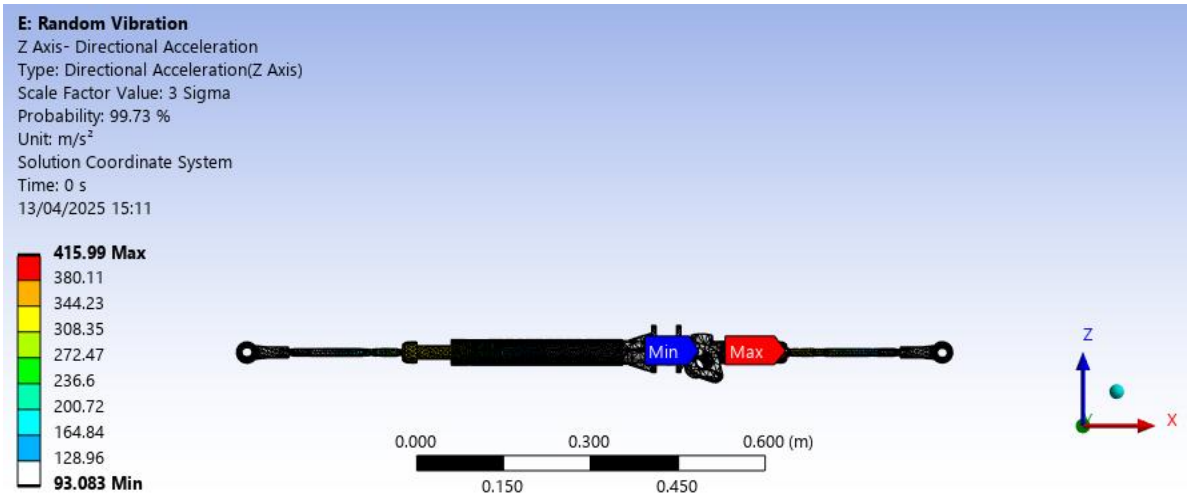


Fig. 6.1 Accelerațiile ZZ datorate vibrațiilor aleatorii- Kevlar 49

Această amplitudine maximă este localizată sistematic în apropierea îmbinării dintre bieletă și cremalieră, zonă identificată ca fiind expusă unor solicitări dinamice de intensitate ridicată din cauza interacțiunilor complexe dintre forțele aplicate și geometria componentelor.

Conform rezultatelor prezentate în **fig. 6.2**, cea mai mare deformație a fost cuantificată la 0,48 [mm], în urma aplicării vibrațiilor pe axa Y.

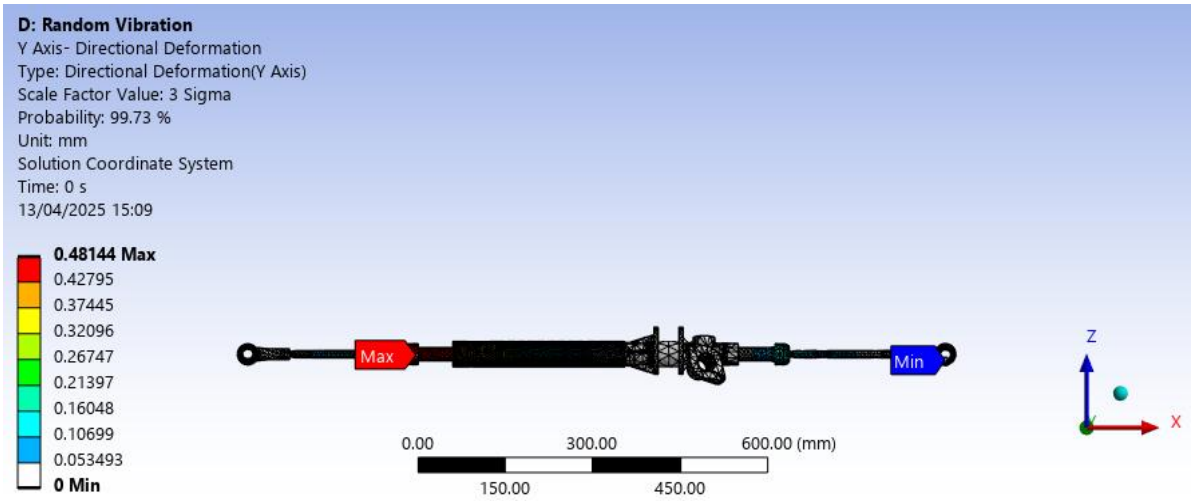


Fig. 6.2 Deformațiile YY datorate vibrațiilor aleatorii- Kevlar 49

Deformația este situată în zona de îmbinare a bieletei de direcție cu cremaliera. Această localizare sugerează o acumulare importantă a solicitărilor mecanice, semnalând un punct critic care ar putea necesita ajustări în procesul de optimizare structurală pentru a asigura fiabilitatea în condiții operaționale.

Solicitarea pe direcția axei Z a generat tensiuni echivalente de până la 65,09 [MPa], conform distribuției ilustrate în **fig. 6.3**.

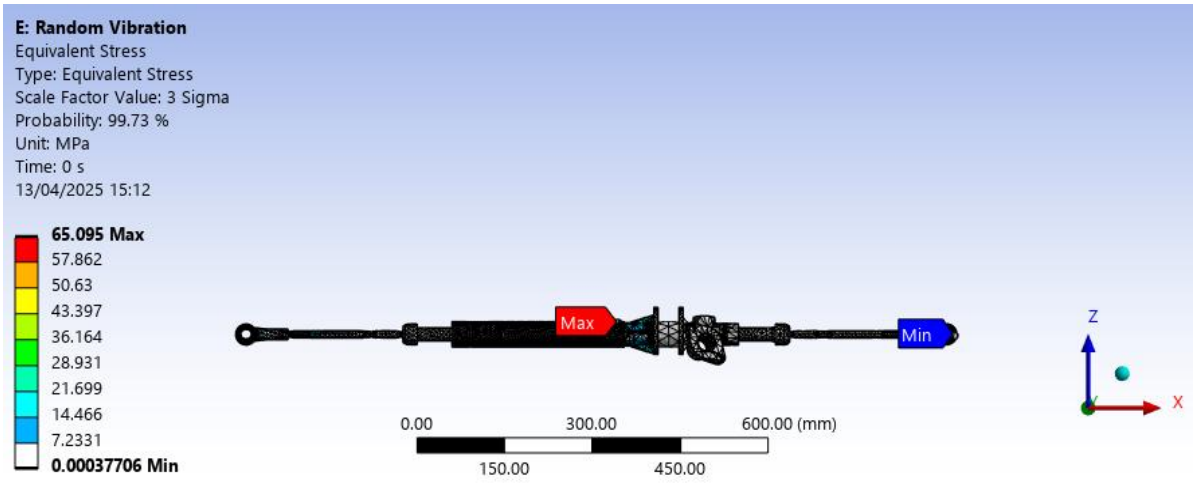


Fig. 6.3 Tensiuni echivalente obținute prin simularea vibrațiilor aleatorii pe axa Z- Kevlar 49

Tensiunea maximă este concentrată la nivelul ranforsărilor umerilor de centrare ai zonei de prindere a casetei. Această regiune se confruntă cu cele mai intense solicitări mecanice, ceea ce indică un risc local de uzură prematură sau oboseală structurală în absența unor măsuri de control al vibrațiilor.

6.2 Simulări ale comportării casetei de direcție la șoc

Evaluarea comportamentului la impact pentru varianta constructivă din Kevlar 49 a relevat răspunsuri mecanice importante, specifice capacității aramidelor de a absorbi și disipa energia cinetică. Rezultatele critice extrase din simularea șocului aplicate la 50·G pe o durată de 6 [ms] sunt sintetizate în continuare.

Analiza impactului, prezentată în **fig. 6.4**, a evidențiat o tensiune echivalentă maximă de 195,9 [MPa].

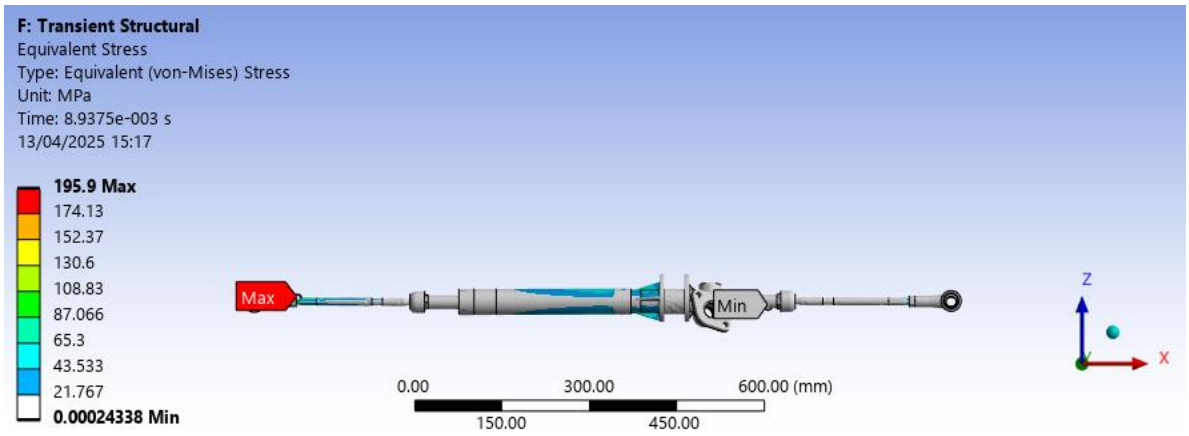


Fig. 6.4 Tensiuni echivalente- Kevlar 49

Această valoare este localizată la îmbinarea filetată a pivotului cu bieleta de direcție. Deși reprezintă o zonă de risc structural, s-a menționat că tensiunea nu depășește rezistența la rupere a materialului oțel aliat din care este confecționată bieleta, însă identifică un punct sensibil pentru integritatea pe termen lung a ansamblului.

Conform distribuției redate în **fig. 6.5**, valoarea maximă a deformației sub impact a fost de 1,4099 [mm].

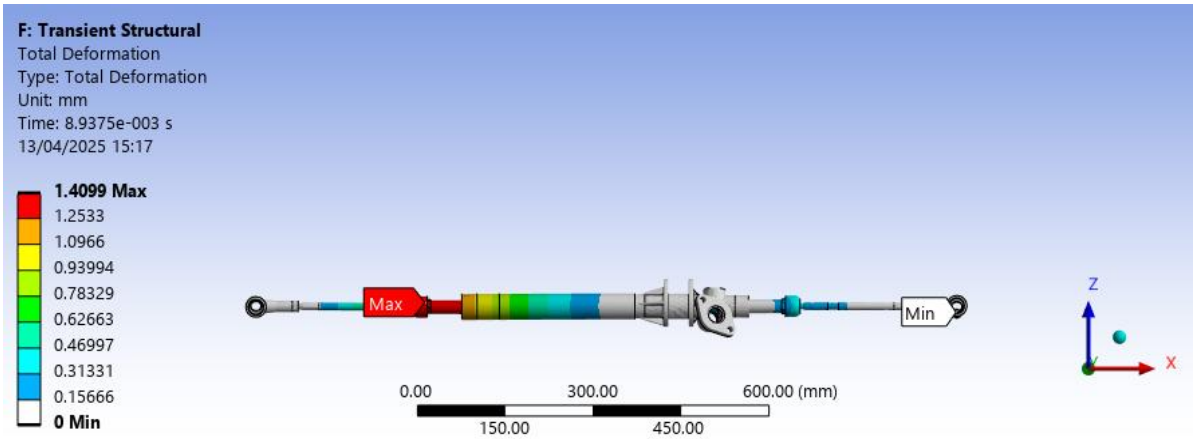


Fig. 6.5 Deformații totale- Kevlar 49

Această deformație se manifestă la nivelul îmbinării dintre cremalieră și bieletă. Se subliniază faptul că o deformație de această amplitudine într-o zonă critică poate influența negativ alinierea și stabilitatea componentelor interconectate în urma unui impact sever.

6.3 Concluzii

Cercetările efectuate asupra casetei de direcție realizată din materialul compozit Kevlar 49 - fibre de aramidă au condus la formularea următoarelor concluzii fundamentale:

- simulările au evidențiat o distribuție a tensiunilor mai uniformă în cadrul componentelor din Kevlar comparativ cu aliajul de aluminiu, datorită proprietăților anizotrope și arhitecturii fibrelor care permit o redistribuire eficientă a energiei mecanice;
- cele mai ridicate solicitări au fost identificate sistematic pe axele transversale Y și Z, cu maxime de 415,99 [m/s²] pentru accelerație și 0,48 [mm] pentru deformație. Aceste date indică o stabilitate globală bună, dar și o sensibilitate locală la solicitări direcționale complexe;
- în regim de impact, materialul demonstrează o reziliență superioară, menținând integritatea structurală în ciuda deformației locale de 1,4 [mm]. Tensiunile maxime de 195,9 [MPa] rămân sub limitele critice de curgere, confirmând capacitatea de absorbție energetică a aramidelor;
- zonele articulațiilor sferice ale bieletelor și îmbinările filetate rămân regiunile cele mai expuse concentrărilor de eforturi dinamice, necesitând monitorizare în procesul de proiectare pentru a preveni degradarea prematură;
- rezultatele confirmă faptul că materialul Kevlar 49 reprezintă o alternativă viabilă la materialele metalice tradiționale, oferind un raport optim între rezistență și greutate, esențial pentru îmbunătățirea performanței dinamice a sistemelor de direcție moderne.

Aceste date constituie suportul pentru analiza comparativă din capitolul următor, unde performanțele Kevlar 49 vor fi raportate la restul materialelor studiate, aliaj LM24 și fibre de carbon, în vederea stabilirii soluției constructive optime.

Capitolul 7

Rezultatele comparative ale simulărilor comportării casetei de direcție realizată din materiale cu caracteristici mecanice distincte

Prezentul capitol realizează o sinteză și o evaluare comparativă a performanțelor structurale pentru patru variante constructive ale carcasei casetei de direcție, diferențiate prin materialul utilizat: aliajul de aluminiu LM24, fibrele de carbon de tip LM (**L**ow **M**odulus), fibrele de carbon de tip HM (**H**igh **M**odulus) și Kevlar 49 - fibre de aramidă. Analiza este structurată pe baza unui sistem de referință tridimensional, axele X, Y și Z, urmărind identificarea răspunsului dinamic optim sub acțiunea vibrațiilor aleatorii și a șocului mecanic.

7.1 Analiza comportamentului casetei de direcție la accelerațiile datorate vibraţiilor aleatorii

Investigația debutează cu analiza modului în care energia vibratorie, aplicată conform standardelor internaționale precum IEC 60068, se traduce în accelerații locale la nivelul structurii [47]. Metodologia respectă regula de denumire stabilită în ***Capitolul 3***, unde prima literă indică direcția excitației, iar a doua literă reprezintă axa de măsurare a parametrului.

Cea mai ridicată valoare a accelerației a fost înregistrată la aplicarea vibrațiilor pe direcția axei Z. Conform **fig. 7.1**, s-a obținut o valoare de 415,99 [m/s²].

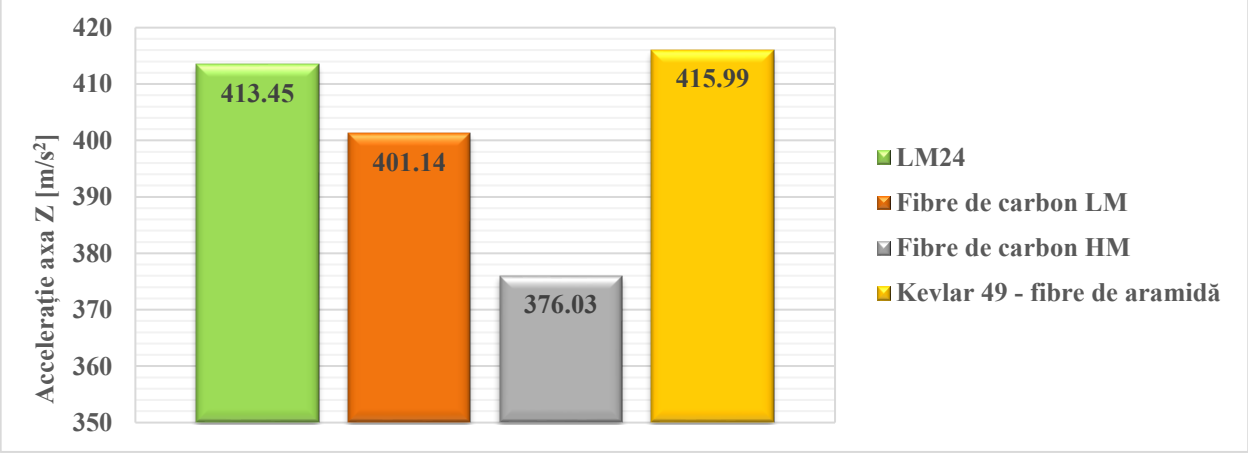


Fig. 7.1 Accelerațiile maxime ZZ datorate vibrațiilor aleatorii

Ansamblul casetei de direcție cu carcasa realizată din Kevlar 49 prezintă o accelerație mai mare, asociată unei rigidități moderate și unei capacități mai mari de deformare elastică. Aceste caracteristici o fac potrivită pentru situațiile în care este necesară atenuarea vibrațiilor și asigurarea stabilității în timp.

Valoarea cea mai ridicată a tensiunii echivalente la aplicarea vibrațiilor a fost înregistrată tot pe direcția axei Z, prezentată în **fig. 7.2**, atingând 102,68 [MPa] în cazul casetei cu carcasa realizată din aliaj LM24.

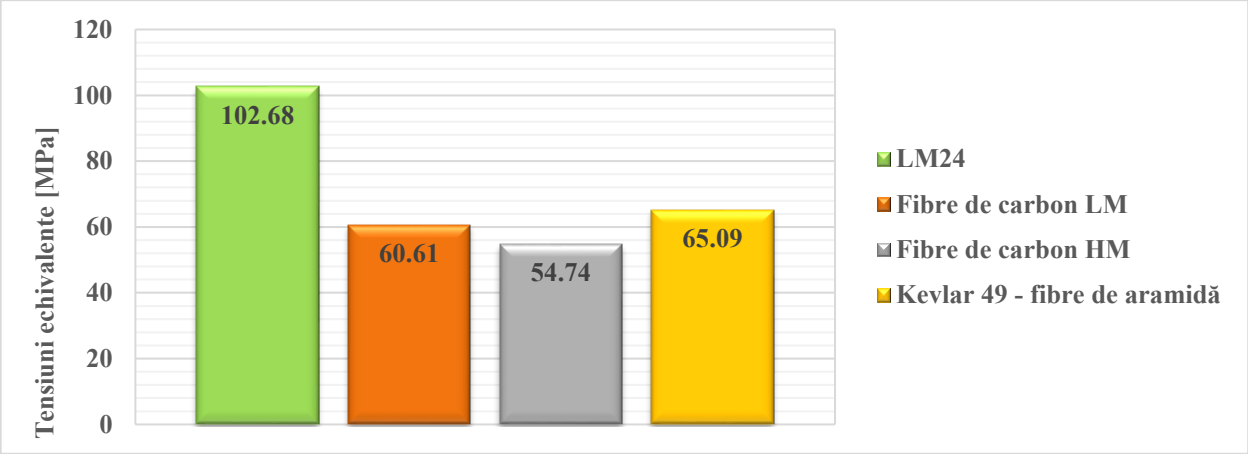


Fig. 7.2 Tensiuni echivalente- aplicarea vibrațiilor pe axa Z

Se observă un contrast structural față de fibrele de carbon HM, care excelează în rezistența direcțională și greutatea redusă, prezentând un nivel semnificativ mai redus al tensiunilor echivalente, de 54,74 [MPa] față de 102,68 [MPa], influențat de caracterul anizotrop al materialului și de orientarea fibrelor.

7.2 Analiza comportamentului casetei de direcție la deformațiile datorate vibrațiilor aleatorii

Stabilitatea geometrică a componentelor este esențială pentru menținerea jocurilor funcționale și a preciziei sistemului de direcție. Această secțiune investighează deformațiile maxime elastice generate de solicitările PSD, evidențiind gradul de rigiditate al fiecărei soluții materiale.

Sinteza datelor prezentate demonstrează că direcția transversală, axa Y, este cea mai critică din punctul de vedere al stabilității formei. Valoarea maximă a deformației, conform **fig. 7.3** a fost identificată la aliajul LM24, atingând 0,79 [mm].

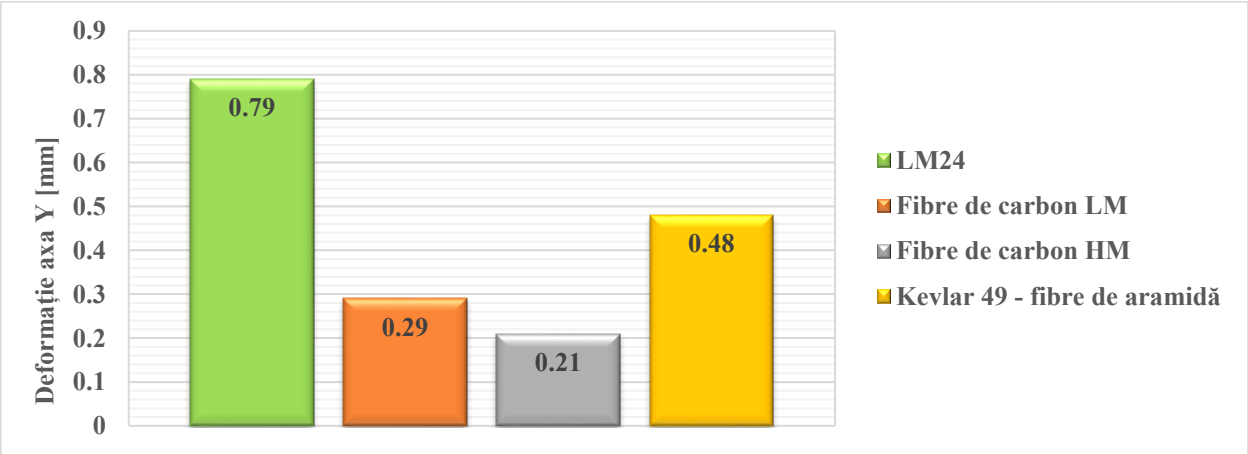


Fig. 7.3 Deformațiile maxime YY datorate vibrațiilor aleatorii

Această deformație ridicată este caracteristică microstructurii metalice eterogene a aluminiului, care permite o adaptare prin deformare sub sarcini variabile. În contrast, varianta din

fibre de carbon HM oferă o stabilitate structurală superioară, limitând deformația maximă la doar 0,21 [mm] sub aceleași condiții de testare, ceea ce reprezintă o reducere de peste trei ori a riscului de pierdere a alinierii componentelor interconectate.

7.3 Analiza comportamentului casetei de direcție la șoc

Analiza structurală din cadrul simulării la șoc, reprezintă etapa critică pentru evaluarea limitei de rezistență a materialelor la impactul cu obstacole exterioare. Condițiile de simulare 50·G pe o durată de 6 [ms] au generat răspunsuri, centralizate în această secțiune.

7.3.1 Rezultatele privind tensiunile echivalente

Diagrama centralizatoare din **fig. 7.4** evidențiază diferențe mecanice fundamentale între soluția metalică tradițională și variantele compozite.

Astfel, valoarea maximă a tensiunii a fost înregistrată pentru aliajul LM24, atingând 287,29 [MPa].

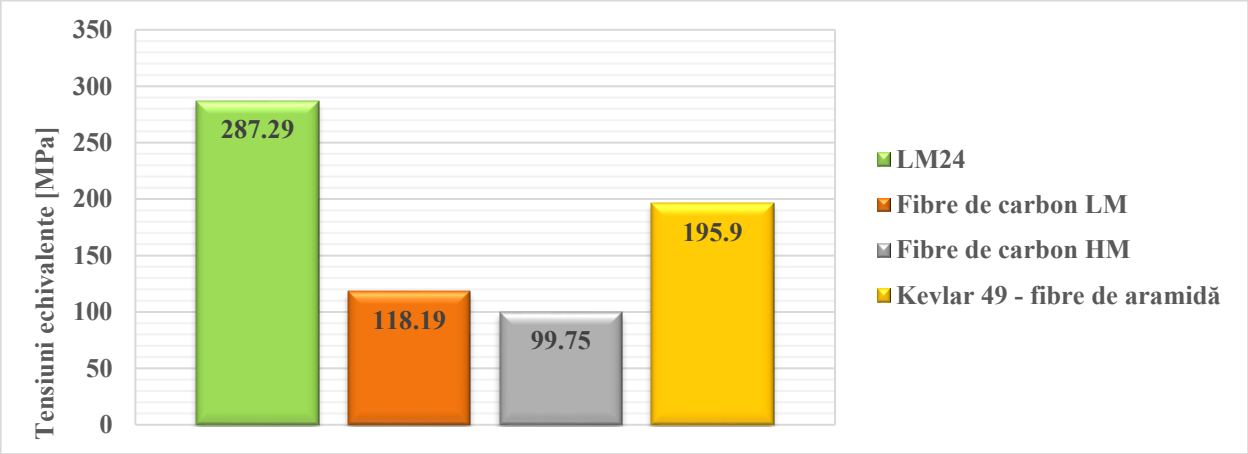


Fig. 7.4 Tensiuni echivalente maxime generate de șoc

Această tensiune se concentrează sistematic la îmbinarea filetată a pivotului cu bieleta de direcție, indicând un risc ridicat de cedare locală în condiții de impact sever. Utilizarea fibrelor de carbon HM a condus la o reducere substanțială a efortului unitar maxim, la 99,75 [MPa], demonstrând o distribuție mult mai uniformă a sarcinilor și un comportament flexibil care previne acumulările periculoase de energie elastică.

7.3.2 Rezultate privind deformația totală

Eșalonarea valorilor deformației sub acțiunea șocului mecanic, redată în **fig. 7.5**, confirmă superioritatea compozitului HM în menținerea integrității geometrice.

Deformația maximă este înregistrată pentru carcasa realizată din aliaj LM24, cu o valoare critică de 2,14 [mm]. O astfel de deformare extinsă constituie un dezavantaj funcțional, putând compromite siguranța direcției după un impact puternic.

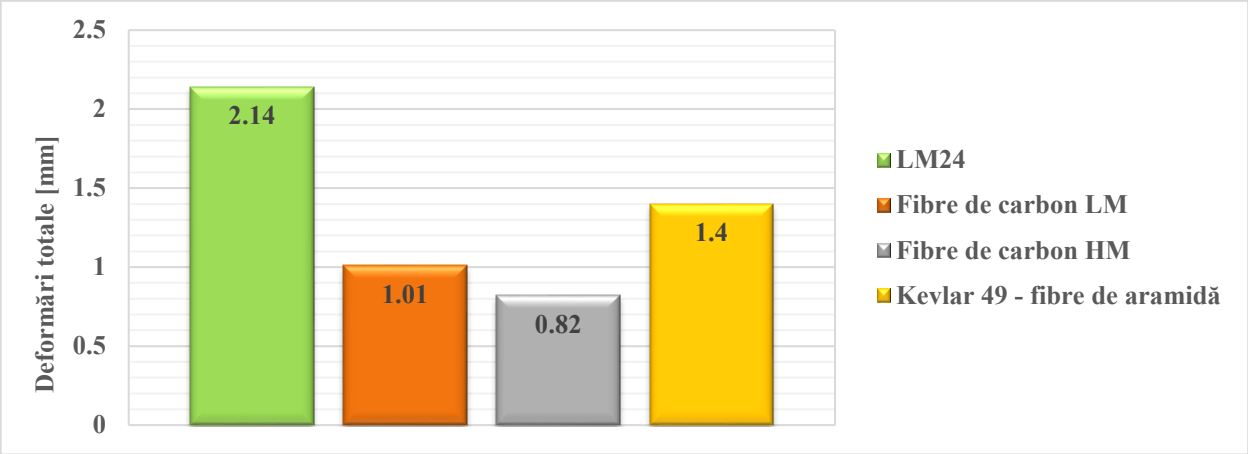


Fig. 7.5 Deformațiile totale maxime generate de șoc

Cele mai reduse valori au fost obținute pentru fibrele de carbon HM, cu o deformație totală de numai 0,82 [mm], în timp ce materialul Kevlar 49 s-a situat la o valoare intermediară de 1,4 [mm], reflectând un compromis echilibrat între rigiditate și reziliență.

7.4 Concluzii

Rezultatele comparative prezentate permit formularea următoarelor concluzii fundamentale privind comportamentul materialelor studiate:

- aliajul de aluminiu LM24, deși oferă prelucrabilitate bună, prezintă cele mai mari riscuri sub solicitări dinamice, înregistrând tensiuni de 287,29 [MPa] și deformații critice de 2,14 [mm] la șoc, valori ce periclitează integritatea sistemului;
- materialul constituit din fibre de carbon HM se confirmă ca fiind soluția optimă pentru aplicații unde rigiditatea specifică este critică, asigurând cele mai reduse deformații sub vibrații, de 0,21 [mm] și la șoc, de 0,82 [mm];
- fibrele de aramidă demonstrează o capacitate excelentă de absorbție a energiei mecanice, menținând tensiuni moderate chiar și la accelerații locale ridicate, de 415,99 [m/s²], ceea ce le recomandă pentru zonele expuse la impact;
- analiza comparativă a demonstrat că nici o soluție mono - material nu satisface simultan toate criteriile de performanță; identificarea zonelor critice și a valorilor maxime din acest capitol justifică dezvoltarea unei geometrii hibride prezentate în continuare, care să combine avantajele metalului cu rezistența dinamică a Kevlarului.

Capitolul 8

Analiza comportamentului casetei de direcție cu geometrie hibridă

Prezentul capitol este dedicat fundamentării, modelării și analizării unei soluții constructive inovatoare pentru carcasa casetei de direcție, dezvoltată pe baza rezultatelor comparative obținute în etapele anterioare ale cercetării. Având în vedere limitările identificate la materialele metalice tradiționale, respectiv aliajul LM24 dar și avantajele specifice materialelor compozite, și anume rigiditate specifică și capacitate de amortizare, autorul propune o geometrie de tip hibrid. Această abordare urmărește optimizarea raportului dintre performanța dinamică și costurile de producție, integrând avantaje structurale ale ambelor clase de materiale.

8.1 Simulări ale comportării casetei de direcție cu geometrie hibridă la vibrații aleatorii

Punctul de plecare al acestei secțiuni îl reprezintă necesitatea îmbunătățirii răspunsului structural în zonele critice de prindere ale casetei, acolo unde analizele din ***Capitolul 4*** au evidențiat valori ridicate ale accelerațiilor de 413 [m/s²] și tensiunilor de 103 [MPa]. Soluția propusă constă în integrarea unor inele din Kevlar 49 în zonele de prindere pe șasiu ale carcasei realizate din aliaj de aluminiu LM24.

După cum se observă în **fig. 8.1**, modelul virtual al casetei hibride păstrează corpul principal din aluminiu, dar include două inele de Kevlar 49, cu scopul de a spori rigiditatea locală și capacitatea de amortizare a vibrațiilor transmise de la calea de rulare.

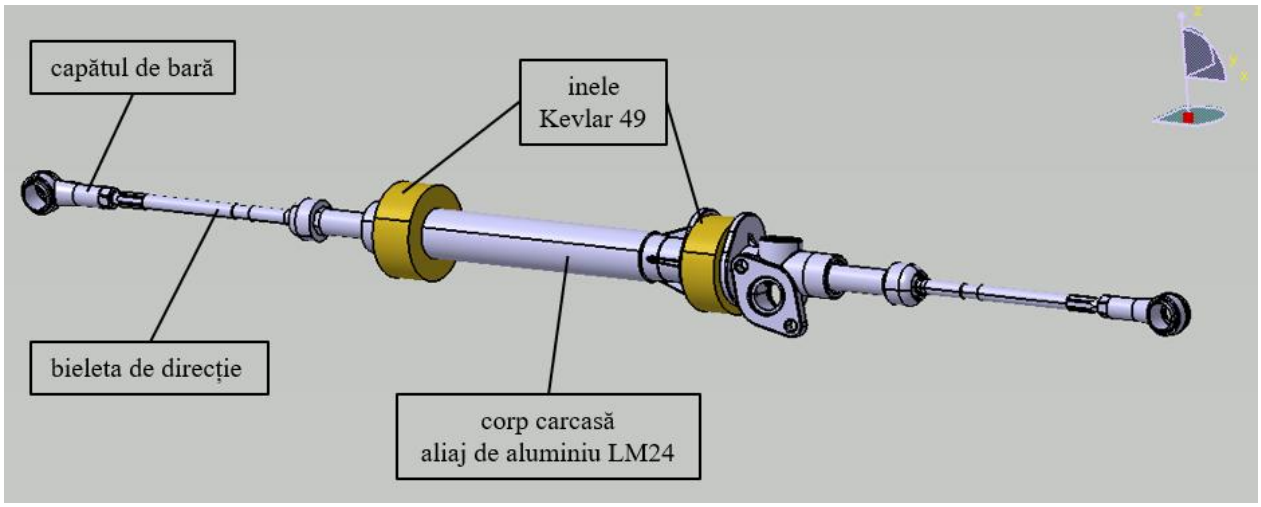


Fig. 8.1 Modelul virtual al casetei de direcție cu geometrie hibridă

Metodologia de simulare în mediul Ansys Workbench respectă standardele internaționale. Evaluarea a presupus aplicarea profilului PSD pe axele X, Y și Z, iar analiza rezultatelor s-a concentrat pe identificarea eficienței inelelor de Kevlar în reducerea eforturilor și deformațiilor [62, 63].

Analiza comparativă a celor trei direcții de solicitare relevă faptul că valorile de vârf sunt atinse în regimul de vibrații pe axa verticală. Valoarea maximă a fost înregistrată pentru accelerația de pe axa Z, atingând 398 [m/s²] conform **fig. 8.2**.

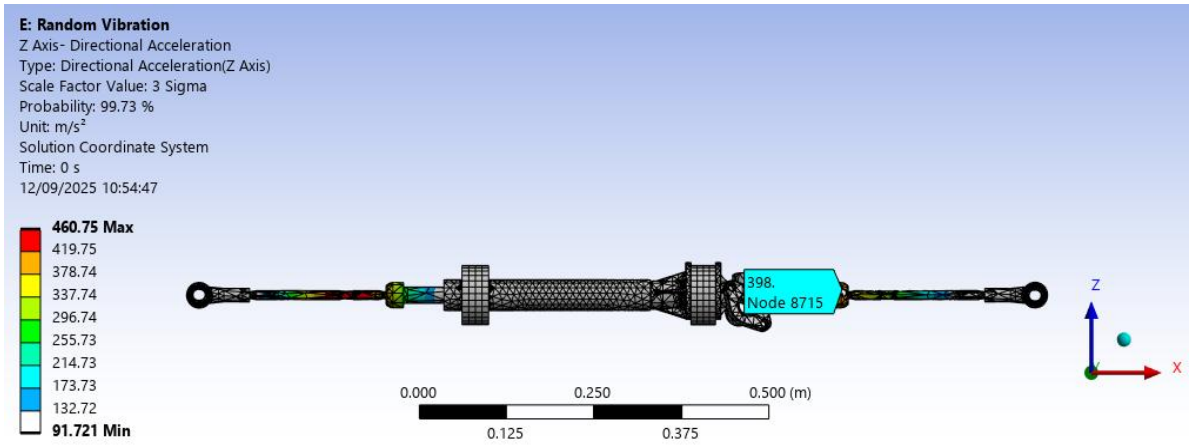


Fig. 8.2 Accelerațiile ZZ datorate vibrațiilor aleatorii

Această valoare, localizată la nivelul îmbinării bieletei de direcție cu cremaliera, reprezintă o reducere față de variantele anterioare, indicând o propagare mai controlată a forțelor dinamice prin ansamblu.

Stabilitatea geometrică a soluției hibride este confirmată de valorile foarte scăzute ale deformațiilor elastice. Maximul global sub vibrații aleatorii a fost identificat pe direcția verticală din **fig. 8.3**, cu o valoare de $4{,}29 \cdot 10^{-2}$ [mm].

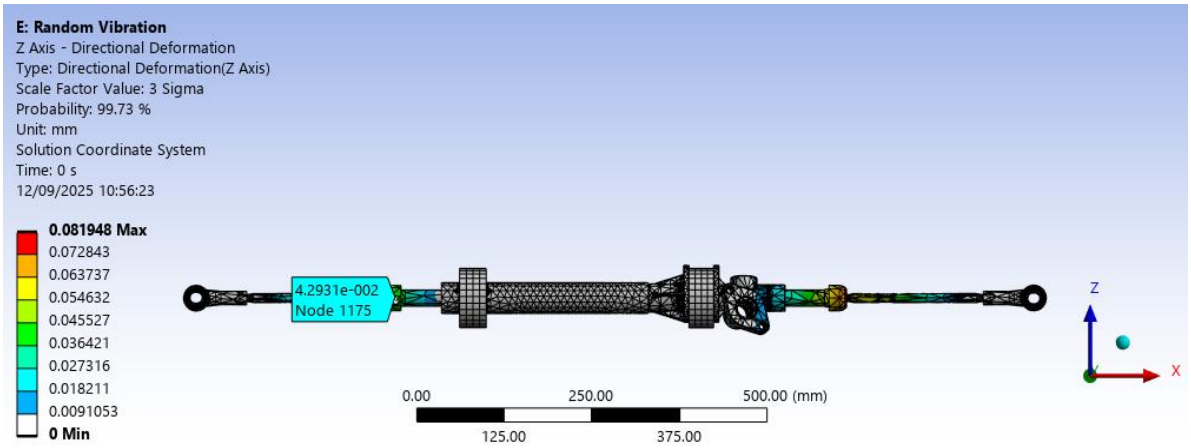


Fig. 8.3 Deformațiile ZZ datorate vibrațiilor aleatorii

Așa cum reiese din ***Capitolul 7***, această valoare este considerabil mai mică decât cea de 0,79 [mm] înregistrată pentru caseta standard din aluminiu, demonstrând că inserția inelelor de Kevlar contribuie decisiv la menținerea jocurilor funcționale.

Distribuția eforturilor unitare sub regim de vibrații aleatorii a scos în evidență un comportament mult mai echilibrat al structurii hibride. Vârful de tensiune a fost identificat în cadrul solicitării pe axa Y din cadrul **fig. 8.4**, atingând valoarea de 16,55 [MPa].

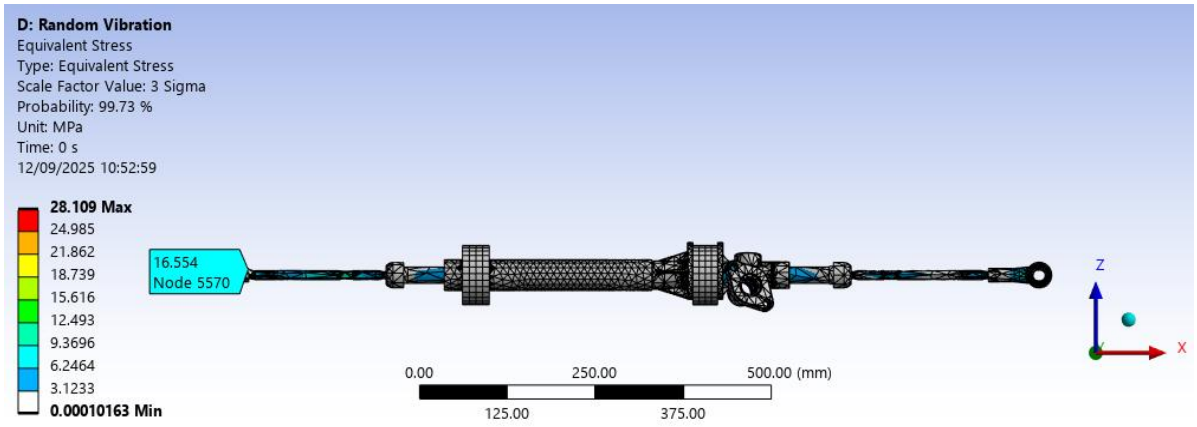


Fig. 8.4 Tensiuni echivalente obținute prin simularea vibrațiilor aleatorii pe axa Y

Datele detaliate din simularea pe axa Y indică acest maxim localizat la îmbinarea capătului de bară cu bieleta, valoare care rămâne oricum mult inferioară limitelor de curgere ale materialelor utilizate.

S-a concluzionat că introducerea inelelor de Kevlar permite o disipare mai eficientă a energiei mecanice și o distribuție mai uniformă a solicitărilor în întreaga structură a carcasei, reducând riscul de oboseală a materialului.

8.2 Simulări ale comportării casetei direcție cu geometrie hibridă la șoc

Evaluarea comportamentului tranzitoriu pentru noua geometrie hibridă reprezintă etapa esențială pentru validarea rezistenței structurale la solicitări extreme. Rezultatele obținute prin simulare indică o îmbunătățire radicală a performanței față de modelul din aliaj de aluminiu analizat în ***Capitolul 4***.

Distribuția tensiunilor, ilustrată în **fig. 8.5**, relevă o valoare maximă de numai 1,13 [MPa].

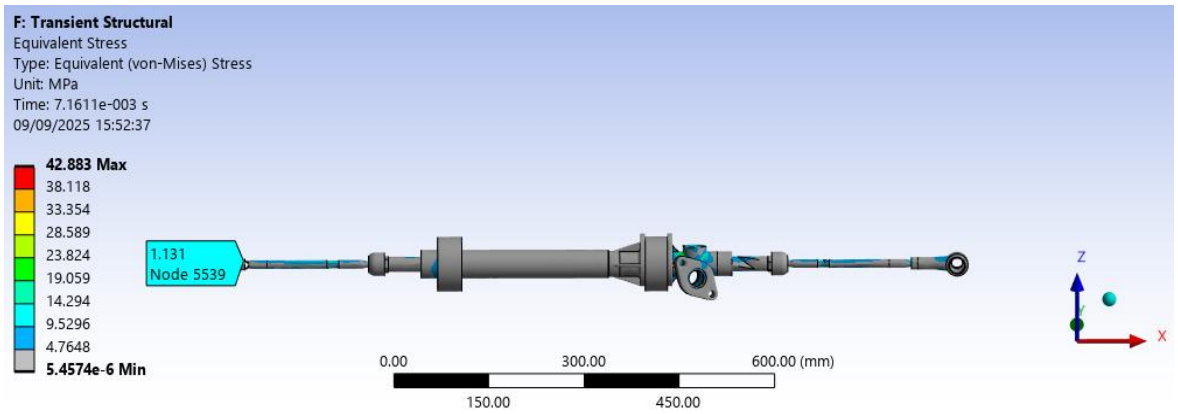


Fig. 8.5 Tensiuni echivalente datorate vibrațiilor echivalente

Această tensiune se localizează la îmbinarea filetată dintre bieleta de direcție și pivot, indicând regiunea cea mai expusă la efectele dinamice generate de impact. Este de remarcat faptul că această

valoare este cu mult mai redusă decât în cazul casetei standard din aliaj de aluminiu, confirmând capacitatea inelelor de Kevlar de a absorbi unda de șoc și de a proteja integritatea carcasei metalice.

Răspunsul structural în termeni de deplasări elastice este prezentat în **fig. 8.6**, unde se înregistrează o valoare maximă de 0,307 [mm]. Localizarea acesteia pe capătul carcasei demonstrează că ansamblul își păstrează stabilitatea dimensională chiar și în condiții de impact sever, asigurând siguranța circulației automobilului prin evitarea perturbărilor majore în funcționarea sistemului de direcție.

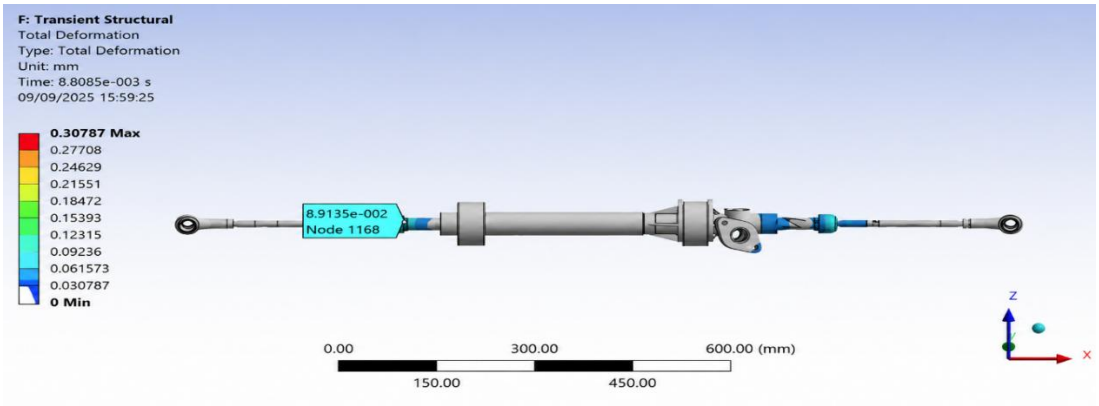


Fig. 8.6 Deformațiile totale

8.3 Analiza experimentală a comportării casetei de direcție cu geometrie hibridă la condiții funcționale de tip climatic

În cadrul demersului științific prezentat în acest capitol, după fundamentarea teoretică și numerică a soluției hibride, se abordează etapa validării experimentale. Această secțiune este dedicată investigării comportamentului real al ansamblului casetei de direcție hibride sub influența factorilor de mediu, urmărind integritatea îmbinărilor metal - compozit și rezistența la degradare în condiții climatice severe.

8.3.1 Modelul fizic funcțional al casetei de direcție cu geometrie hibridă

Trecerea de la faza de proiectare virtuală la cea experimentală s-a realizat prin materializarea conceptului într-un model fizic funcțional, prezentat în **fig. 8.7**. Acesta reprezintă suportul material necesar pentru testările în condiții de laborator și permite evaluarea interacțiunii complexe dintre componentele metalice realizate din aliaj de aluminiu LM24 și elementele de ranforsare din material compozit.

Pentru construcția acestui model, materialul compozit Kevlar 49 a fost utilizat sub formă de bandă, aplicată prin înfășurare în zonele de prindere identificate anterior ca fiind critice din punct de vedere structural. Metodologia de asamblare a presupus o pregătire riguroasă a suprafețelor de contact pentru a asigura o aderență optimă între metal și compozit. Fixarea benzilor de Kevlar s-a realizat prin utilizarea unei rășini epoxidice de înaltă performanță, ansamblul fiind ulterior supus unui proces de uscare controlată până la obținerea unei îmbinări stabile și a unui corp unitar.

Existența acestui model fizic, vizibil în detaliu în **fig. 8.7**, este esențială pentru a verifica dacă performanțele estimate prin simularea numerică se mențin și în prezența factorilor perturbatori reali, precum fluctuațiile termice și mediile corozive.



Fig. 8.7 Modelul fizic funcțional al casetei de direcție cu geometrie hibridă

8.3.2 Metodologia de cercetare experimentală. Standul realizat. Rezultate

Componentele sistemului de direcție sunt expuse în mod constant unor regimuri de exploatare agresive, care includ nu doar solicitări mecanice, ci și agenți chimici și climatici precum apă, umiditate, particule abrazive, săruri de deszăpezire [64, 65]. Acești factori pot declanșa procese de coroziune la nivelul carcasei și al îmbinărilor, ducând la creșterea frecărilor și la modificarea jocurilor funcționale, aspecte ce periclitează siguranța activă a automobilului .

Pentru a reproduce aceste condiții, autorul a conceput și realizat o instalație experimentală dedicată, a cărei schemă bloc este ilustrată în **fig. 8.8**.

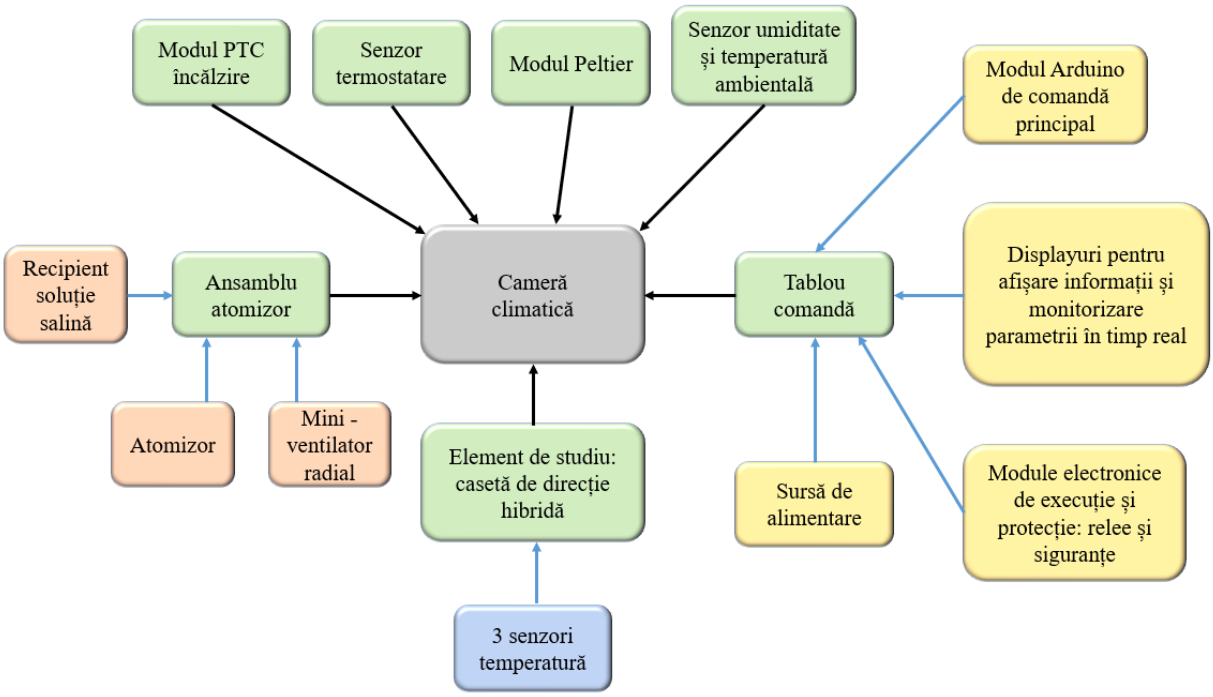
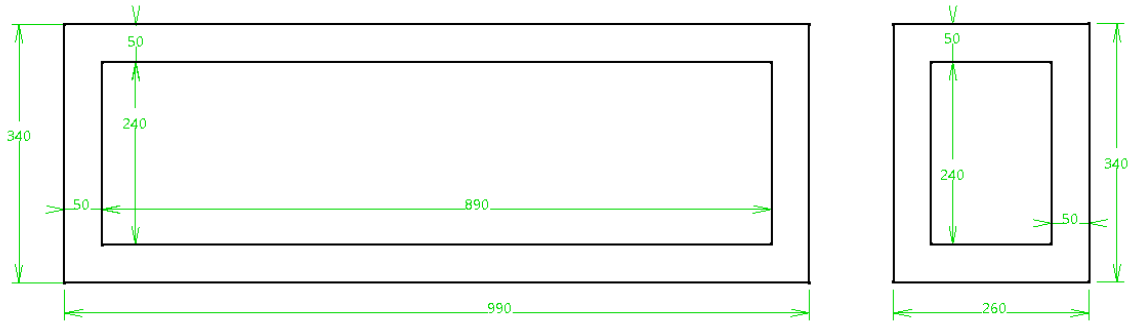


Fig. 8.8 Schema bloc a instalației experimentale

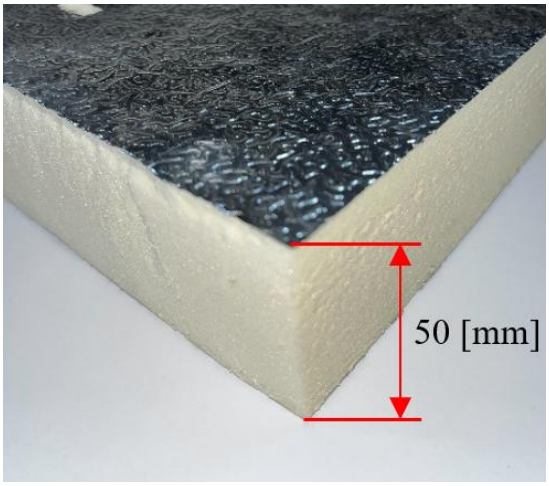
Standul integrează module de încălzire, răcire, umidificare și monitorizare, toate fiind gestionate de o unitate centrală de control. Piesa centrală a standului este camera climatică, prezentată în detaliu în **fig. 8.9 a**, **b**, **c**.



a)



b)



c)

Fig. 8.9 a, **b**, **c** Cameră climatică
a) schema cameră climatică; **b)** cameră climatică; **c)** detaliu pereți cameră climatică;

Aceasta are dimensiuni interne de 890x160x240 [mm] și un volum util de 0,04 [m³]. Pereții incintei sunt realizați din panouri de tip sandwich cu spumă termoizolantă de 50 [mm] grosime, placați la interior cu foi de aluminiu, conform **fig. 8.9 c**, oferind o rezistență termică de până la 240°C. Configurația finală a instalației instrumentate este redată în **fig. 8.10**.



Fig. 8.10 Instalația experimentală

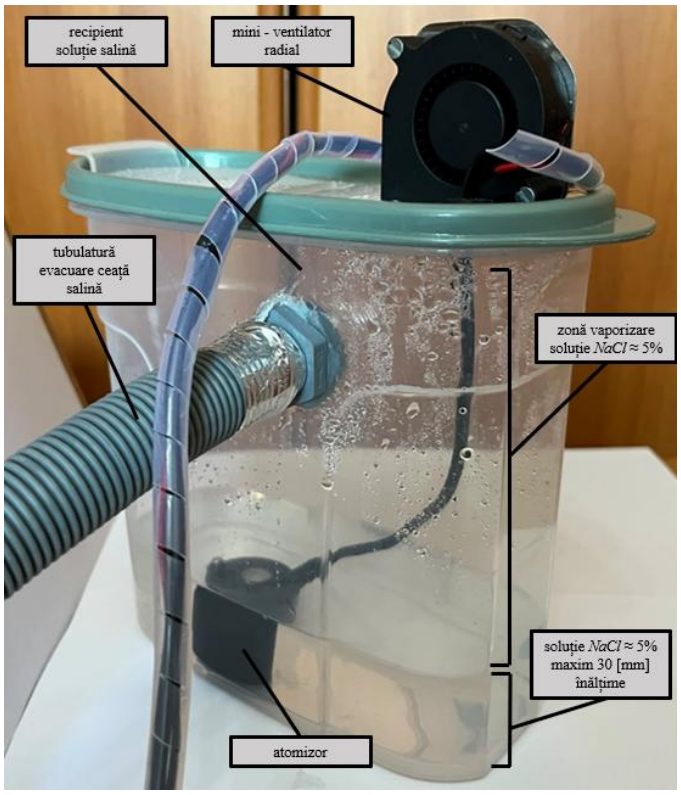
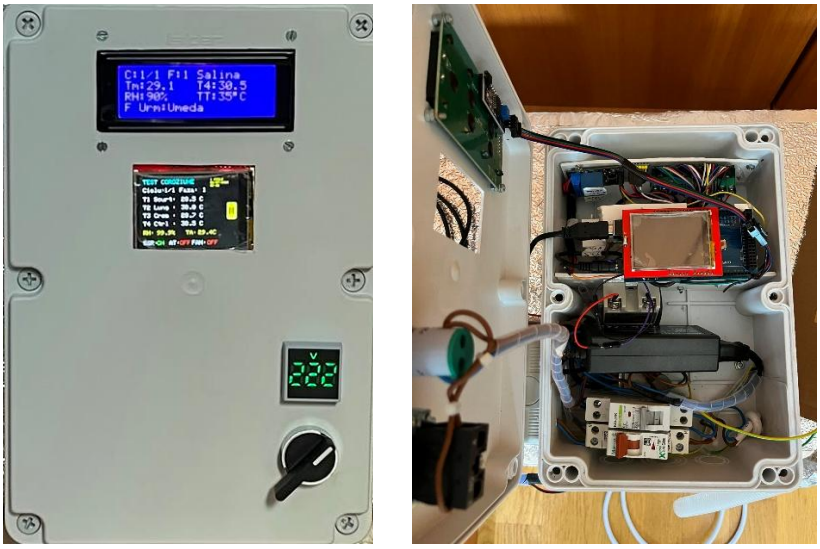


Fig. 8.11 Ansamblul atomizor

Pentru generarea ceții saline și a umidității, s-a utilizat un ansamblu atomizor, prezentat în **fig. 8.11**, capabil să vaporizeze o soluție de *NaCl* cu o concentrație de aproximativ 5%.

Sistemul electronic de comandă este integrat într-un tablou central, prezentat în **fig. 8.12 a**, **b**, bazat pe placa de dezvoltare Arduino Mega 2560, din cadrul **fig. 8.13**.



a) **b)**

Fig. 8.12 a, **b** Tabloul de comandă al camerei climatice
a) panoul frontal exterior; **b)** componentele electronice

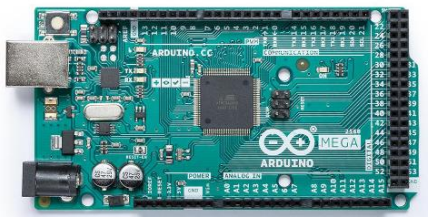
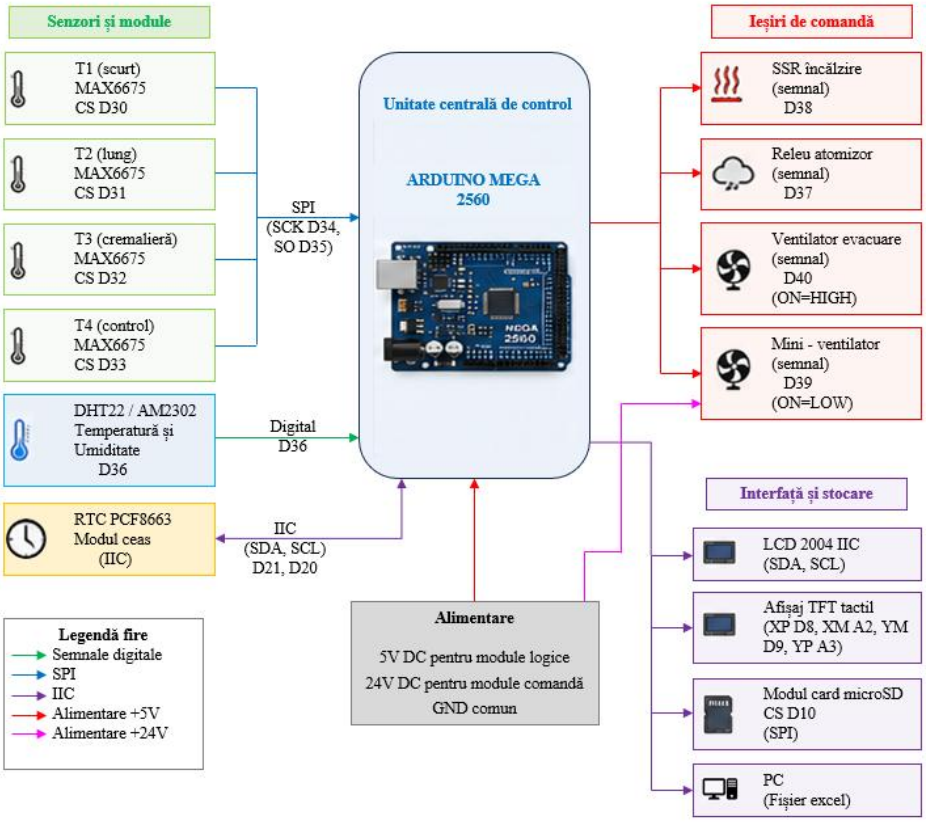
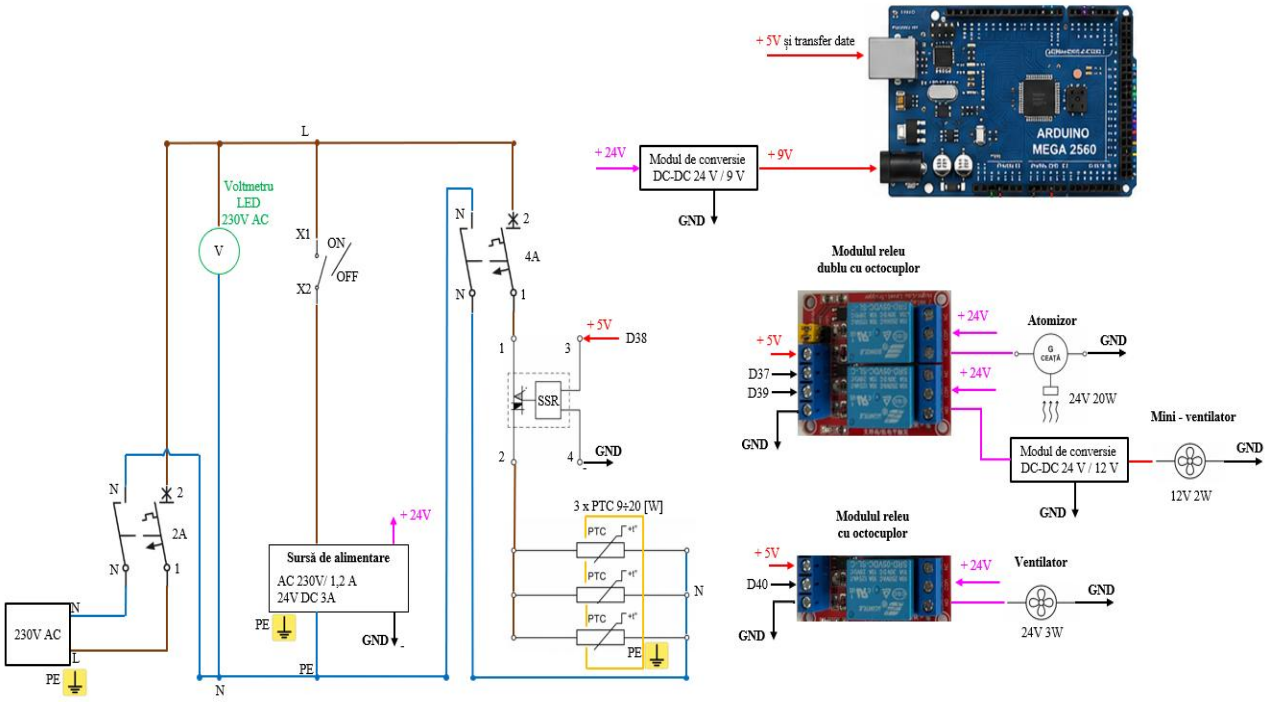


Fig. 8.13 Placa electronică Arduino Mega 2560 [66]

Schemele electrice și de alimentare sunt evidențiate în **fig. 8.14 a**, **b**, incluzând protecții prin disjunctoare și surse de alimentare stabilizate de 24V și 5V, prezentate în **fig. 8.15**.

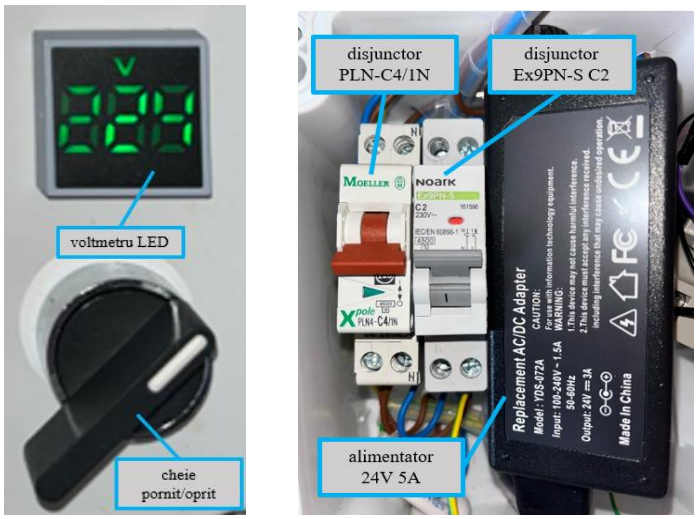


a)



b)

Fig. 8.14 a, **b** Schemă electrică stand experimental
a) schema bloc a tabloului de comandă; **b)** schema electrică de alimentare



a) **b)**

Fig. 8.15 a, **b** Elementele de alimentare, comandă și protecție ale instalației
a) elemente de comandă; **b)** componente electrice

Monitorizarea mediului intern s-a realizat prin intermediul a patru termocuple de tip K conectate la convertizoare MAX6675, prezentate în **fig. 8.16**, a unui modul AM2302/DHT22 pentru umiditate și temperatură ambientală, ilustrat în **fig. 8.17**.



a) **b)**

Fig. 8.16 a, **b** Configurația punctului de măsură
a) senzor termocuplu tip K; **b)** convertor MAX6675 [67]



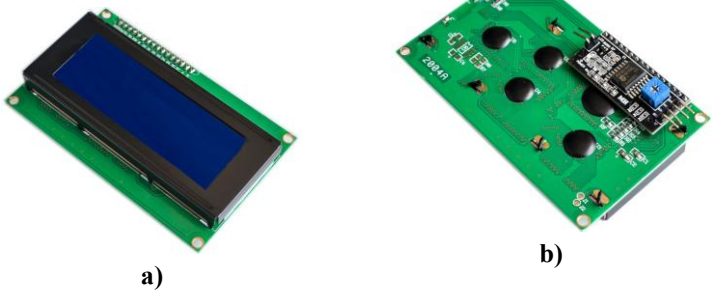
Fig. 8.17 Modulul AM2302/DHT22 [68]

Un modul de ceas în timp real (RTC) PCF8563 pentru gestionarea precisă a duratelor de testare este ilustrat în **fig. 8.18**.



Fig. 8.18 Modulul de ceas PCF8563 [69]

Afișarea datelor se face pe un ecran LCD 2004 cu interfață IIC, ilustrat în **fig. 8.19** și pe un afișaj TFT tactil de 2,4", prezentat în **fig. 8.20**, acesta din urmă fiind dotat și cu un slot microSD pentru stocarea automată a istoricului experimental.



a) **b)**

Fig. 8.19 a, **b** Afișajul LCD 2004 (HD44780) și interfața IIC (PCF8574) [70]
a) afișajul LCD 2004; **b)** interfața IIC

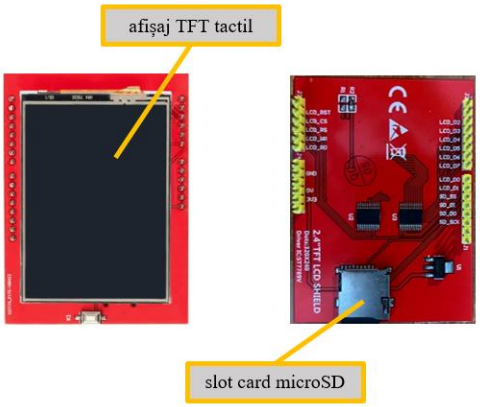
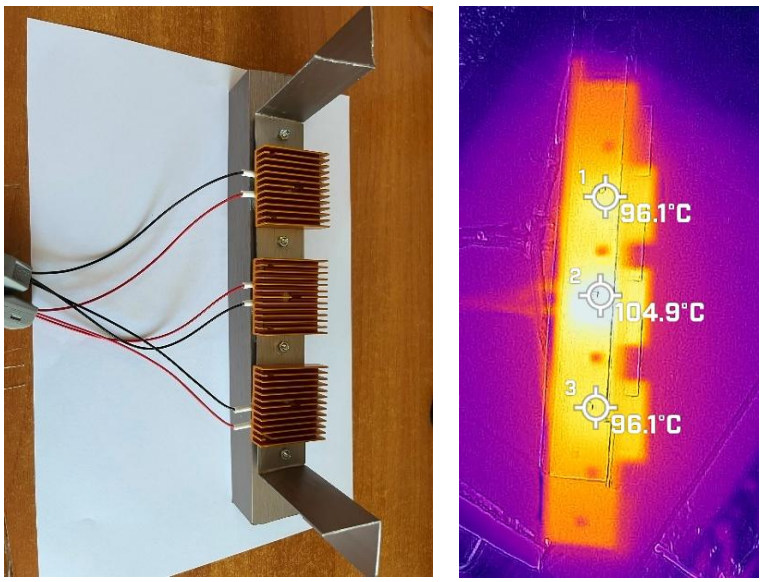


Fig. 8.20 Modul cu afișaj TFT tactil de 2,4" ST7789V [71]

Menținerea temperaturii este asigurată de trei elemente de încălzire de tip PTC, prezentate în **fig. 8.21**, controlate prin releul static SSR-25DA din **fig. 8.22**.



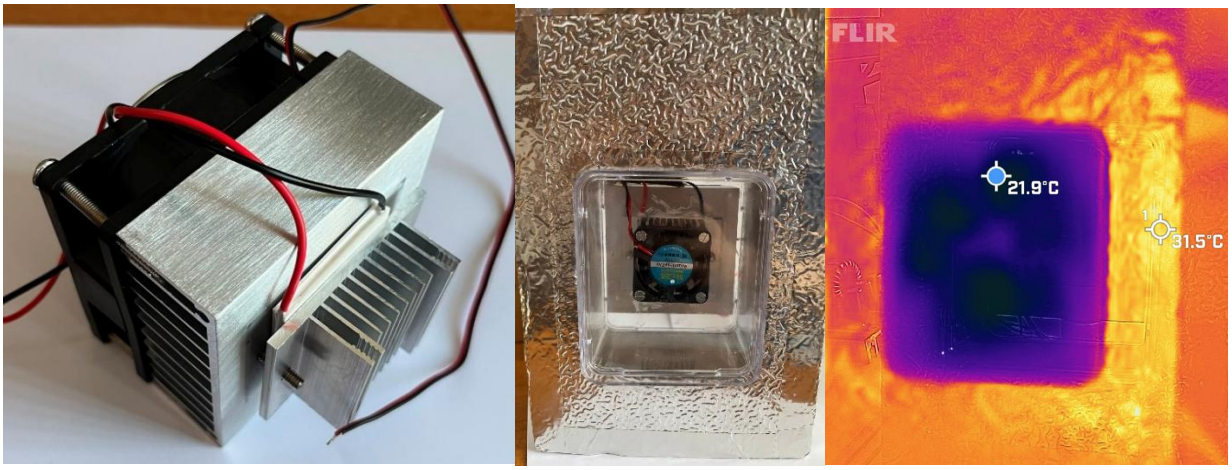
a) **b)**

Fig. 8.21 a, **b** Element de încălzire PTC 220V/ 8-20W
a) ansamblu 3 elemente încălzire PTC; **b)** elemente încălzire - funcționare în timp real



Fig. 8.22 Releul static SSR-25DA [72]

Răcirea și controlul sub temperatura ambientală sunt realizate de un modul termoelectric Peltier de 60W, din **fig. 8.23**, asistat de ventilatoare axiale.



a) **b)** **c)**

Fig. 8.23 a, **b**, **c** Ansamblul modulului termoelectric Peltier
a) sistem răcire pentru modul Peltier prevăzut cu două ventilatoare axiale;
b) poziționarea ansamblului Peltier în cadrul standului; **c)** funcționare în timp real al ansamblului modulului



Fig. 8.24 Mini - ventilator radial [75]

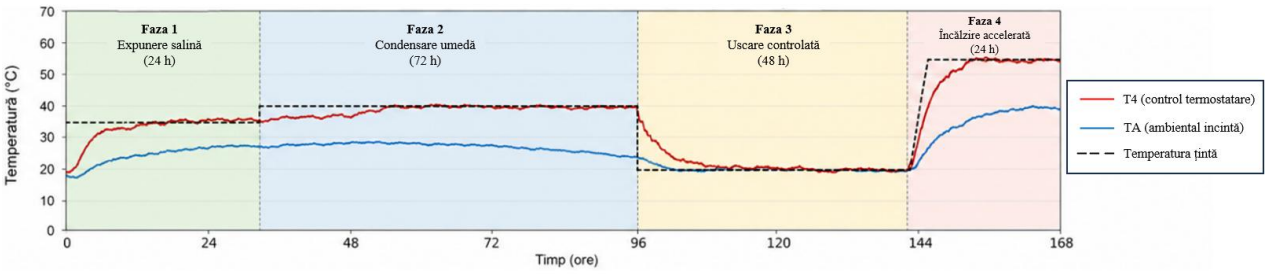
Un mini - ventilator radial, ilustrat în **fig. 8.24** asigură omogenizarea atmosferei în interiorul camerei.

Cercetarea a urmat principiile standardelor EN ISO 9227 și ASTM B117 pentru coroziune accelerată [73, 74]. S-a adoptat un ciclu experimental extins, compus din patru etape identice de câte 168 ore (7 zile) fiecare, rezultând o durată totală de 672 ore (28 zile) [65].

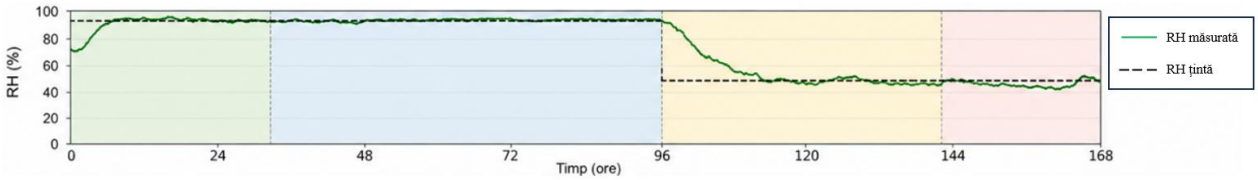
Fiecare etapă a fost programată să parcurgă patru faze distincte:

- **Faza 1- Expunere salină**: Expunere la ceață salină timp de 24 ore (Țintă: 35°C, 90% RH).
- **Faza 2- Condensare umedă**: Condensare umedă timp de 72 ore (Țintă: 40°C, 90% RH).
- **Faza 3- Uscare controlată**: Uscare controlată timp de 48 ore (Țintă: 20°C, 50% RH).
- **Faza 4- Încălzire accelerată**: Încălzire accelerată timp de 24 ore (Țintă: 60°C, 50% RH).

Evoluția parametrilor monitorizați T4 și RH în raport cu valorile țintă pe parcursul unui ciclu este reprezentată grafic în **fig. 8.25 a**, **b**.



a)



b)

Fig. 8.25 a, **b** Evoluția temperaturilor și a umidității relative din interiorul camerei climatice
a) evoluția temperaturilor T4 și TA față de țintă; **b)** evoluția umidității relative față de țintă

Tab. 8.1 Parametrii inițiali

Parametru	**Valoare**
Masă ansamblu	5 [Kg]
Joc cremalieră - carcasă	0.06 [mm]
Temperatura mediului	26°C

Valorile inițiale de referință, masa de 5 [kg] și jocul de 0,06 [mm], sunt prezentate în **tab. 8.1**.

Gradul de coroziune PC (**P**itting **C**orrosion) a fost evaluat periodic prin analogie cu scala ISO 4628, care variază de la PC0- fără urme la PC5- coroziune foarte severă, conform **tab. 8.2**.

Rezultatele inspecțiilor vizuale la finalul fiecărei etape sunt grupate în **fig. 8.26**, iar evoluția grafică a degradării este redată în **fig. 8.27**.

Tab. 8.2 Grade coroziune

Grad	**Descriere**
PC0	fără urme de coroziune
PC1	urme izolate
PC2	coroziune redusă
PC3	coroziune moderată
PC4	coroziune severă
PC5	coroziune foarte severă

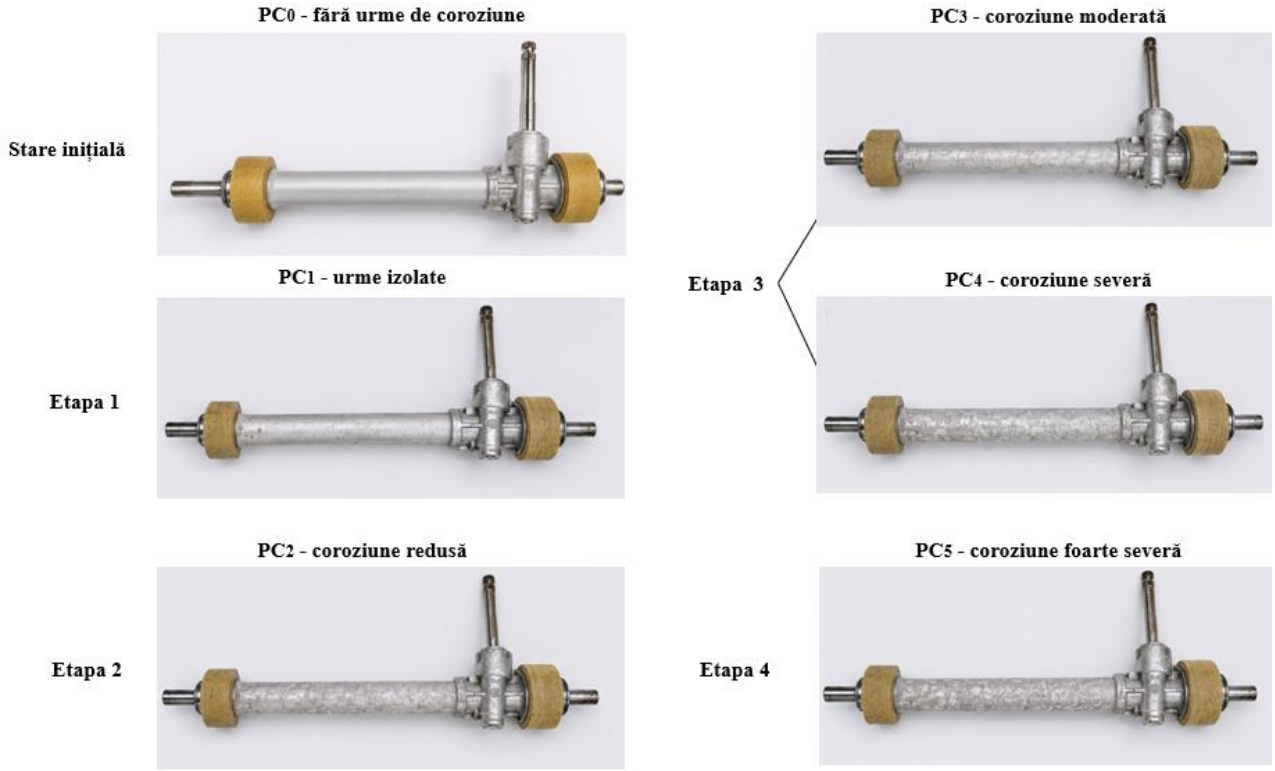


Fig. 8.26 Rezultate grade coroziune

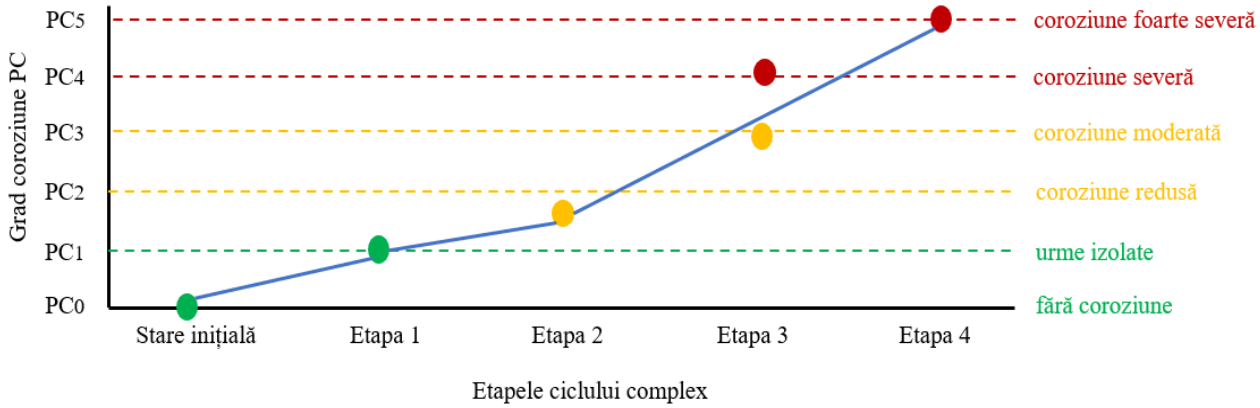


Fig. 8.27 Evoluția gradelor de coroziune PC

Analiza acestor date evidențiază următoarele:

- după prima etapă, suprafața a atins gradul PC1 - urme izolate, evoluând liniar către PC5 la finalul celor 28 de zile, stadiu caracterizat prin degradare severă și pierdere de material la nivelul carcasei;
- componentele din oțel carbon au prezentat semne de degradare timpurie, în timp ce carcasa din aluminiu a beneficiat de protecția naturală a stratului de oxid, deși s-au observat fenomene de coroziune galvanică în zonele de contact metal - metal;
- inelele de ranforsare din Kevlar 49 nu au prezentat modificări de aspect, exfolieri sau delaminări la interfața cu aluminiul. Stabilitatea dimensională a ansamblului s-a menținut ridicată, confirmând compatibilitatea tehnologică a soluției propuse de autor.

În concluzie, studiul experimental demonstrează că, deși mediul coroziv afectează componentele metalice, zona hibridă Kevlar - Aluminiu rămâne integră structural, validând potențialul utilizării materialelor compozite pentru creșterea durabilității sistemelor de direcție în condiții extreme de exploatare.

8.4 Concluzii

Concluziile bazate pe analiza comportamentului casetei de direcție cu geometrie hibridă, sunt sintetizate după cum urmează:

- rezultatele obținute în primele două secțiuni ale capitolului validează ipoteza cercetării privind eficiența geometriei hibride. Simulările realizate în mediul Ansys au demonstrat o îmbunătățire semnificativă a rigidității și stabilității dinamice. Valorile maxime ale accelerațiilor de 398 [m/s²] și deformațiilor de $4{,}29 \cdot 10^{-2}$ [mm] în regim de vibrații, coroborate cu tensiunile extrem de reduse la șoc 1,13 [MPa], indică o capacitate superioară de amortizare și o distribuție uniformă a solicitărilor mecanice;
- această soluție nu numai că reduce riscul de oboseală structurală, dar oferă și o rezistență sporită la impact, constituind o bază solidă pentru experimentele climatice ce vor urma în restul capitolului. Din punct de vedere academic, capitolul demonstrează că optimizarea topologică prin hibridizare metal - compozit reprezintă o direcție viabilă pentru evoluția componentelor de siguranță activă în industria auto;

- trecerea de la modelul virtual la cel fizic funcțional, realizat prin înfășurarea benzilor de Kevlar cu rășină epoxidică pe carcasa din aluminiu, a permis verificarea soluției în condiții reale de laborator;
- deși componentele metalice, oțel carbon și aluminiu, au prezentat grade de coroziune progresivă până la PC5 pe parcursul celor 672 de ore de testare, zona hibridă Kevlar - Aluminiu a rămas integră structural;
- inelele de ranforsare din Kevlar nu au prezentat exfolieri, delaminări sau fisuri la interfața cu metalul, demonstrând o compatibilitate tehnologică ridicată a soluției hibride în medii corozive severe ceață salină, umiditate, fluctuații termice.
- rezultatele experimentale validează utilizarea Kevlarului 49 ca material de ranforsare pentru creșterea durabilității sistemelor de direcție, oferind un model constructiv ce poate fi extins la alte aplicații din industria auto.

Capitolul 9

Concluzii finale. Contribuții personale. Oportunități viitoare de dezvoltare a cercetărilor

9.1 Concluzii finale

Prin abordarea integrată adoptată în această lucrare, s-a demonstrat că performanța și fiabilitatea sistemului de direcție depind de o interacțiune complexă între soluțiile constructive și mediul de exploatare. Principalele concluzii ale lucrării evidențiază superioritatea materialelor compozite și a soluțiilor constructive hibride în optimizarea sistemelor de direcție:

- s-a demonstrat că performanța direcției depinde critic de corelarea dintre geometria sistemului, rigiditatea componentelor și capacitatea de a prelua solicitările de pe drum; degradarea infrastructurii rutiere amplifică vibrațiile și șocurile mecanice, influențând semnificativ integritatea casetei de direcție;
- analiza aliajului de aluminiu LM24 a scos în evidență niveluri ridicate de tensiune și deformații în regimuri dinamice severe, fiind susceptibil la oboseală structurală în zonele de legătură;
- utilizarea fibrelor de carbon LM a condus la o reducere a accelerațiilor pe direcția verticală (Z), cu aproximativ 67%, față de configurația din aluminiu;
- fibrele de carbon HM s-au remarcat prin rigiditatea lor ridicată, asigurând o reducere a tensiunilor la șoc de 65,3% și a deformațiilor cu 61,7%, comparativ cu aluminiul LM24;
- materialul Kevlar 49 oferă cel mai echilibrat comportament dinamic, având o capacitate superioară de absorbție a energiei și reducând tensiunile în regim de șoc mecanic, cu aproximativ 32%, față de soluția standard;
- una dintre cele mai importante contribuții originale este configurația hibridă propusă: carcasă de aluminiu cu ranforsări locale din Kevlar 49 în zonele de prindere; această configurație a condus la o reducere aproape completă a deformațiilor pe direcția Y, de asemenea, tensiunile echivalente pe axa Z fiind reduse drastic la doar 1,31 [MPa], față de 102,68 [MPa] la aluminiu;
- se menționează că pentru toate variantele constructive analizate, tensiunile echivalente evidențiate s-au situat sub limitele specifice ale materialelor adoptate;
- rezultatele confirmă că integrarea materialelor compozite avansate în proiectarea sistemelor de direcție contribuie decisiv la reducerea masei, îmbunătățirea amortizării vibrațiilor și creșterea durabilității globale a ansamblului.

9.2 Contribuții personale

În cadrul acestei teze, s-au adus o serie de contribuții originale care vizează atât planul teoretic, cât și cel aplicativ - experimental:

- s-a realizat o analiză documentară extinsă a sistemelor de direcție pentru identificarea tendințelor actuale și a sistematizat informațiile referitoare la influența geometriei direcției

asupra comportamentului dinamic; de asemenea, au fost identificați factorii funcționali majori, starea drumului, viteza, clima, care afectează caseta de direcție;

- a fost dezvoltată și implementată o metodologie unitară de analiză numerică bazată pe metoda elementelor finite în mediul Ansys Workbench; realismul analizelor a fost asigurat prin implementarea standardelor internaționale IEC 60068 pentru simularea vibrațiilor și a șocurilor;
- lucrarea include o evaluare detaliată între materialul de referință, aliaj de aluminiu LM24 și materiale compozite avansate, fibre de carbon LM și HM, Kevlar 49; această analiză a permis identificarea direcțiilor critice de solicitare și a modului în care proprietățile materialelor influențează distribuția tensiunilor;
- o contribuție majoră o reprezintă dezvoltarea unei soluții optimizate pentru carcasa casetei de direcție, bazată pe o geometrie hibridă ce utilizează ranforsări locale sub formă de inele din Kevlar 49; această soluție asigură un compromis între performanța mecanică, durabilitate și eficiență economică;
- s-a realizat un model fizic funcțional al casetei hibride și s-a dezvoltat o metodologie experimentală pentru evaluarea influenței factorilor climatici;
- cercetarea a integrat analizele numerice cu rezultatele experimentale într-o abordare unitară, creând o bază de date și concluzii ce constituie un punct de plecare pentru studii viitoare în domeniu.

9.3 Oportunități viitoare de dezvoltare a cercetărilor

Direcțiile strategice în care studiul poate fi extins, pornind de la modelul conceptual validat în teză, care subliniază interdependența critică dintre material, geometrie și condițiile de solicitare, sunt următoarele:

- extinderea simulărilor numerice pentru a evalua modul în care caseta de direcție hibridă rezistă la solicitări ciclice pe termen lung, oferind o estimare a duratei de viață operaționale sub regimuri de stres variabil;
- utilizarea algoritmilor de calcul pentru a rafina geometria carcasei, eliminând materialul din zonele mai puțin solicitate și crescând densitatea fibrelor compozite exact în punctele de efort maxim identificate în simulări, pentru a atinge un raport rezistență / masă și mai eficient;
- aplicarea metodologiei de ranforsare locală cu materiale de tip Kevlar 49 sau fibre de carbon la alte componente structurale ale șasiului, cum ar fi brațele de suspensie sau punțile, care sunt supuse unor regimuri similare de vibrații și coroziune;
- realizarea unor teste fizice pe standuri dinamice de vibrații și șocuri mecanice pentru a corela direct rezultatele numerice de tip PSD (**P**ower **S**pectral **D**ensity) cu răspunsul structural real al prototipului fizic.

În ansamblu, teza demonstrează potențialul tehnologic ridicat al materialelor compozite avansate în creșterea siguranței și durabilității sistemelor de direcție moderne, oferind soluții concrete și validate pentru industria auto.

Bibliografie selectivă (75/120 referințe)

1. Bosch. Bosch Automotive Handbook. 10th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2018.
2. Heisler H. Advanced Vehicle Technology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2002.
3. Fischer R, Gscheidle R, Gscheidle T. Modern Automotive Technology: Fundamentals, Service, Diagnostics. 2nd ed. Paderborn: Mediaprint Solutions GmbH; 2014.
4. Dixon JC, Tyres, Suspension and Handling. 2nd ed. Warrendale (PA): SAE International; 1996.
5. Wong JY. Theory of ground vehicles. 4th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2008.
6. NXP Semiconductors. A matter of torque: electric power steering system [Internet]. Eindhoven: NXP Semiconductors; 2009 [accesat 04 martie 2025]. Disponibil la: https://www.nxp.com/docs/en/brochure/MatterofTorque.pdf
7. Annecy Electronique. Electric power steering: training manual [Internet]. Chavanod (France): Annecy Electronique; 2018 [accesat 04 martie 2025]. Disponibil la: https://exxotest.com/content/uploads/2018/01/GU_MT-DAE_EN.pdf
8. Płaczek M, Wróbel A, Baier A. Comparison of vibration damping of standard and PDCPD housing of the electric power steering system. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2017;227:012095. doi:10.1088/1757-899X/227/1/012095.
9. Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd ed. New York: Springer; 2012.
10. Zaremba AT, Liubakka MK, Stuntz RM. Vibration control based on dynamic compensation in an electric power steering system. In: Proceedings of the First International Conference on Control of Oscillations and Chaos; 1997 Jun 26–28; St. Petersburg, Russia. Vol. 3, Piscataway (NJ): IEEE; 1997. p. 21-24.
11. Bianchini E. Active vibration control of automotive steering wheels. SAE Technical Paper 2005-01-2546. Warrendale (PA): SAE International; 2005. doi:10.4271/2005-01-2546.
12. Keller M, Haß C, Seewald A, Bertram T. Ein Regelungskonzept für eine Notausweichassistenz. *VDI-Berichte*. 2013;(2196). Düsseldorf: VDI-Verlag.
13. International Electrotechnical Commission. IEC 60068 series - Environmental testing [Internet], Geneva: International Electrotechnical Commission. [accesat 04 martie 2025]. Disponibil la: https://webstore.iec.ch/searchform&q=60068
14. Unitaru M, Pereș G, Stoicescu A, Poțincu G, Tabacu I. Dinamica autovehiculelor pe roți. București: Editura Didactică și Pedagogică; 1981.
15. Administrația Națională a Drumurilor din România. AND 540: Normativ privind evaluarea stării tehnice a drumurilor publice. București: AND; 2013.

16. World Bank. The highway design and maintenance standards model (HDM-III). Washington (DC): World Bank; 1987.

17. Paterson WD. Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management. Baltimore (MD): Johns Hopkins University Press; 1987.

18. Gillespie TD. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale (PA): SAE International; 1992.

19. Pacejka HB. Tire and Vehicle Dynamics. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012.

20. CivilBlog. 4 must consider characteristics of a pavement surface [Internet]. 2015 [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://civilblog.org/2015/09/07/4-must-consider-characteristics-of-a-pavement-surface/

21. Patel K, Road geometrics [Internet]. SlideShare [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://www.slideshare.net/kushalpatel91/road-geometrics

22. Prodyogi. Cross section of road geometric design [Internet]. 2021 [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://www.prodyogi.com/2021/02/cross-section-of-road-geometric-design.html

23. Pedders Suspension & Brakes. Effect of weight on vehicle dynamics [Internet]. [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://www.pedders.com.au/news/techstop-5-effect-weight-vehicle-dynamics/

24. Kobayashi I, Kuroda J, Uchino D, Ogawa K, Ikeda K, Kato T, et al. Research on yaw moment control system for race cars using drive and brake torques. Vehicles. 2023;5(2):515-534. doi:10.3390/vehicles5020029.

25. International Organization for Standardization. ISO 3888-1:2018: Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre - Part 1: Double lane-change. Geneva: ISO; 2018.

26. Black MD, Rao MD. Evaluation and reduction of steering column vibration of a rear wheel drive sedan. Int J Vehicle Noise Vib. 2004;1(1):67-81. doi:10.1504/IJVNV.2004.004077.

27. Rakosi E, Roșca R, Manolache G. Tehnici și echipamente pentru diagnosticarea autovehiculelor: îndrumar pentru lucrări practice de laborator. Iași: Editura Politehnium; 2005.

28. Chen C, Zhao X, Liu H, Ren G, Liu X. Influence of adverse weather on drivers' perceived risk during car following based on driving simulations. Eur Transp Res Rev. 2019;11(1):1-13. doi:10.1186/s12544-019-0387-2.

29. Crawley EF, de Luis J. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. AIAA Journal. 1987;25(10):1373-1385.

30. Preumont A. Vibration control of active structures: an introduction. 3rd ed. Dordrecht: Springer; 2011.

31. Point S. Recommended tire inflation pressure [Internet]. Point S [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://point-s.ca/en/blog-and-advices/vehicles-recommended-tire-inflation-pressure

32. VF Auto. Common problems with control arm bushings and how to fix them [Internet]. VF Auto; [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://vfauto.com/common-problems-control-arm-bushings-fix/

33. OS Vehicle. Solving the problem of premature tire wear on Pontiac Vibe vehicles: causes, identification and solutions [Internet]. OS Vehicle; [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://www.osvehicle.com/solving-the-problem-of-premature-tire-wear-on-pontiac-vibe-vehicles-causes-identification-and-solutions/

34. Reimpell J, Stoll H, Betzler JW. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*. 2nd ed. Warrendale (PA): SAE International; 2001.

35. Steeringly. Automotive steering rack damage analysis [Internet]. Steeringly; [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://steeringly.com/automotive-steering-rack-damage-analysis/

36. ALNSU. What causes steering rack damage [Internet]. ALNSU Blog, [accesat 10 martie 2025]. Disponibil la: https://alnsu.com/blog-detail/what-causes-steering-rack-damage

37. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Technical service bulletin: Steering system inspection [Internet]. Washington (DC): NHTSA; 2018 [accesat 10 martie 2025]. Document nr.: MC-10137281-9999.pdf. Disponibil la: https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2018/MC-10137281-9999.pdf

38. Subaru of America, Inc. Electronic Power Steering (EPS) Gear Box Assembly Warranty Extension [Internet]. Washington (DC): National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA); 2021 [accesat 11 martie 2025]. Buletin tehnic nr.: 04-27-21R. Document nr.: MC-10199960-0001.pdf. Disponibil la: https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2021/MC-10199960-0001.pdf

39. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Safety recall notice: Steering rack defect [Internet]. Washington (DC): NHTSA; 2011 [accesat 11 martie 2025]. Document nr.: RCONL-11V514-0423.pdf. Disponibil la: https://static.nhtsa.gov/odi/rcl/2011/RCONL-11V514-0423.pdf

40. Kazmi MA, Sunil V, Bhaskar SU. Modeling and analysis of automobile chassis using composite materials. Int Res J Eng Technol (IRJET). 2017;4(8):2039-2044

41. Taca C, Paunescu C. Composite materials. București: MatrixRom; 2012. ISBN: 9789737558440.

42. Mareș M. Structuri din materiale compozite: suport de curs [Internet]. Iași: Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași, Facultatea de Mecanică; 2021 [accesat 12 aprilie 2025]. Disponibil la: https://mec.tuiasi.ro/studenti/informatii-utile/manuale-electronice/

43. Carcea D. Materiale compozite: Fenomene la interfață [Internet]. Iași: Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor; 2015 [accesat 12 aprilie 2025]. Disponibil la: https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/Carcea4-Materiale%20Compozite.%20Fenomene%20la%20interfata.pdf

44. Jones RM. Mechanics of composite materials. Boca Raton: CRC Press; 2014.

45. Engblom JJ. Stress and Failure Analysis of Fiber-Reinforced Composite Structures with Computer-Based Solutions [Internet]. Fairfax (VA): PDH Center; 2020 (accesat 25 iunie 2026). Disponibil la: https://pdhonline.com/courses/m426/m426content.pdf

46. Kaw AK. Mechanics of composite materials. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2005.

47. International Electrotechnical Commission. IEC 60068-2-6:2007: Environmental testing - Part 2-6: Tests - Test Fc: Vibration (sinusoidal). Geneva: IEC; 2007.

48. International Electrotechnical Commission. IEC 60068-2-64:2008: Environmental testing - Part 2-64: Tests - Test Fh: Vibration, broadband random and guidance. Geneva: IEC; 2008.

49. International Electrotechnical Commission. IEC 60068-2-81:2003: Environmental testing - Part 2-81: Tests - Test Ei: Shock – Shock response spectrum synthesis. Geneva: IEC; 2003.

50. Stephens RI, Fatemi A, Stephens RR, Fuchs HO. Metal fatigue in engineering. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2000.

51. Ewins DJ. Modal testing: theory, practice and application. 2nd ed. Baldock: Research Studies Press; 2000.

52. Inman DJ. Engineering vibration. 4th ed. Upper Saddle River (NJ): Pearson; 2014.

53. Newland DE. An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis. 3rd ed. Mineola (NY): Dover Publications; 2005.

54. Bathe KJ. Finite element procedures. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall; 1996.

55. Buzdugan G, Mihăilescu E, Radeș M. Măsurarea vibrațiilor. București: Editura Academiei Republicii Socialiste România; 1979.

56. Ponomariov SD, Biderman VL, Liharev KK, Makușin VM, Malinin NN, Feodosiev VI. Calculul de rezistență în construcția de mașini. București: Editura Tehnică; 1964.

57. Popa S, Hilohi C. Încercarea automobilelor. București: Editura Tehnică; 1964.

58. Rao SS. Mechanical vibrations. 6th ed. Harlow: Pearson; 2017.

59. Harris CM, Piersol AG. Harris' shock and vibration handbook. 6th ed. New York: McGraw-Hill; 2010.

60. Jeoung SK, Ko YK, Kang W, Ha D, Lee H. Structural analysis of steering system components considering the anisotropic material properties of carbon fiber reinforced plastic. SAE Technical Paper. 2013;2013-01-0019. doi:10.4271/2013-01-0019.

61. Mallick PK. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2007.

62. Lee HH. Finite element simulations with ANSYS Workbench 17. Mission (KS): SDC Publications; 2017.

63. Logan DL. A first course in the finite element method. 6th ed. Stamford (CT): Cengage Learning; 2016.

64. International Organization for Standardization. ISO 16701:2015: Corrosion of metals and alloys - Accelerated corrosion test involving humidity cycling and intermittent spraying of a salt solution. Geneva: ISO; 2015.

65. Verband der Automobilindustrie. VDA 621-415: Cyclic Corrosion Test for Automotive Applications. Berlin: VDA; 1982.

66. Arduino Mega 2560 Rev3 [Internet]. Somerville (MA): Arduino; [accesat 09 iunie 2026]. Disponibil la: https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/

67. Analog Devices. MAX6675 cu termocuplu tip K [Internet]. Wilmington (MA): Analog Devices; [accesat 09 iunie 2026]. Disponibil la: https://www.analog.com/en/products/max6675.html#documentation

68. Aosong Electronics. AM2302/DHT22 [Internet]. Guangzhou: Aosong Electronics; [accesat 09 iunie 2026]. Disponibil la: https://www.aosong.com/Products/info.aspx?lcid=27&proid=81

69. Sigmanortec SRL. Modul Ceas RTC PCF8563 I2C 3.3–5V Arduino Raspberry Pi [Internet]. Târgu Jiu: Sigmanortec SRL; [accesat 26 iunie 2026]. Disponibil la: https://sigmanortec.ro/Modul-Ceas-RTC-PCF8563-p192552820

70. Optimus Digital. LCD 2004 cu Backlight Albastru și Interfață I2C [Internet]. București: Optimus Digital; [accesat 09 iunie 2026, ora 22. 08]. Disponibil la: https://www.optimusdigital.ro/ro/optoelectronice-lcd-uri/4769-lcd-2004-cu-backlight-albastru-i-interfaa-i2c.html?search_query=lcd+2004&results=5

71. Optimus Digital. Shield cu display TFT cu touchscreen de 2.4'' ST7789V [Internet]. ucurești: Optimus Digital; [accesat 09 iunie 2026]. Disponibil la: https://www.optimusdigital.ro/ro/optoelectronice-lcd-uri/12489-shield-cu-display-tft-cu-touchscreen-de-24.html

72. Sigmanortec SRL. Releu Solid State SSR-40DA [Internet]. Târgu Jiu: Sigmanortec SRL; [accesat 09 iunie 2026]. Disponibil la: https://sigmanortec.ro/releu-solid-state-ssr-40da-40a

73. International Organization for Standardization. EN ISO 9227:2022: Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests. Geneva: ISO; 2022.

74. ASTM International. ASTM B117-11: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken (PA): ASTM; 2011.

75. Optimus Digital. Turbină 24V [Internet]. București: Optimus Digital; [accesat 09 iunie 2026]. Disponibil la: https://www.optimusdigital.ro/ro/altele/7391-turbina-50x50x15 24v.html?search_query=turbina+&results=4

Listă de lucrări

I. Articole publicate în reviste cotate ISI (Web of Science cu factor de impact)

1. Ciubotar C., Rakosi E., Ulian T.M., Manolache Gh., **Popa A.G.**, Petrovan S., *Theoretical analysis and modeling of a secondary energy system in an electric vehicle*, Revista Ingineria automobilului Nr. 76, (2025), pp. 24-27, București, 2025, FI=0,4/2025.

2. Popovici V., Grigoraș I.R., Rakosi E., Ulian T.M., Manolache Gh., **Popa A.G.**, Petrovan Ș., *A new approach to In-Wheel Motor solution for electric vehicles*, World Electric Vehicle Journal (WEVJ) Vol. 17, Nr. 2, 87, (2026), doi: 10.3390/wevj17020087, MDPI, 2026, FI=3,3/2026.

3. **Popa A.G.**, Petrovan Ș., Rakosi E., Ulian T.M., Manolache Gh., *Evaluation of the mechanical behavior and performance of a new steering rack geometry,* Revista Ingineria automobilului Nr. 79, (2026), pp. 10-14, București, 2026, FI=0,4/2025.

II. Articole publicate în reviste indexate BDI

1. Petrovan Ș., **Popa A.G.**, Spătaru B., Rakosi E., Ulian T.M., Manolache Gh., *Analysis of the behaviour for a steering rack under the influence of the road elements*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 1290, (2023), doi: 10.1088/1757-899X/1290/1/012012, Galați, 2023.

2. Popovici V., Grigoraș I.R., **Popa A.G.**, Rakoși E., *The weight influence of in-wheel motor on macpherson suspension hard points*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași Secția Construcții de Mașini Vol. 71 (75), Nr. 2, (2025), doi: 10.2478/bipcm-2025-0020, Iași, 2025.

3. Grigoraș I.R., Popovici V., Ulian T.M., Manolache Gh., **Popa A.G.**, *Theoretical Study on CO_2 Emission Capture from Vehicle Exhaust Gases,* The 12th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering, ACME 2026 Iași, (2026) - lucrare prezentată, acceptată pentru publicare.

III. Comunicări la conferințe internaționale

1. **Popa A.G.**, Petrovan Ș., Rakosi E., Ulian T.M., Manolache Gh., *Evaluation Of Steering System Performance Under Vibrational And Shock Loads Considering Influential Factors*, International Conference on Energy Systems (ICES-25), ISBN: 978-625-00-6886-1, Istanbul, 2025.

2. Petrovan S., **Popa A.G.**, Rakosi E., Ulian T.M., Manolache Gh., *Modeling and implementation of a rack-and-pinion inerter for suspension energy recovery applications*, International Conference on Energy Systems (ICES-25), ISBN: 978-625-00-6886-1, Istanbul, 2025.



Alexandru-Gabriel Popa

Locul naşterii: Iași | România | **Cetățenie:** română |

Gen: Masculin | **E-mail:** alexpopa959@gmail.com

EXPERIENȚA PROFESIONALĂ

ASISTENT UNIVERSITAR – UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI – 03/11/2025 – În curs – IAȘI, ROMÂNIA

- Coordonez proiecte inginerești care integrează analiza tehnică și elaborarea desenelor de specialitate
- Susțin activități didactice și de laborator, explicând conceptele teoretice și îndrumând studenții în aplicarea practică a acestora
- Îndrum și evaluez studenții în dezvoltarea competențelor tehnice și profesionale

INGINER AUTOVEHICULE RUTIERE – S.C. HAYNESPRO DATA SRL – 15/05/2023 – 26/09/2025 – BCURESTI, ROMÂNIA

- Realizarea documentațiilor tehnice în formatul firmei
- Studierea noilor tehnologii din piața automotive
- Comunicare activă cu clienții
- Parteneriat activ cu restul departamentelor din cadrul companiei

INGINER SERVICE – S.C. ECHIPA DE SERVICE CENTRALE S.R.L. – 03/11/2019 – 30/04/2023 – IASI, ROMÂNIA

- Efectuez mentenanța preventivă și corectivă a echipamentelor termice
- Utilizez documentația tehnică de mentenanță, schemele și desenele tehnice ale diferiților producători
- Particip la organizarea și desfășurarea intervențiilor de mentenanță

EDUCAȚIE ȘI FORMARE PROFESIONALĂ

01/10/2024 – 18/06/2025 Iași, România

CERTIFICAT DE ABSOLVIRE A PROGRAMULUI DE FORMARE PSIHOPEDAGOGICĂ NIVELUL II Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

- Programul de formare: Nivelul II
- Tipul de credite: ECTS- Număr de credite: 35

01/10/2023 – 18/06/2024 Iași, România

CERTIFICAT DE ABSOLVIRE A PROGRAMULUI DE FORMARE PSIHOPEDAGOGICĂ NIVELUL I Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

- Programul de formare: Nivelul I
- Tipul de credite: ECTS- Număr de credite: 35

01/10/2021 – ÎN CURS Iași, România

DOCTORAT Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

- Domeniul de studii: Inginerie Mecanică
- Teza de Doctorat: Studii și cercetări privind comportarea componentelor sistemului de direcție al automobilelor în diverse condiții funcționale

Nivel CEC Nivelul 8 CEC

01/10/2019 – 01/07/2021 Iași, România

DIPLOMĂ DE MASTER Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

- Domeniul de studii: Inginerie Mecanică
- Programul de studii: Mașini termice, frigotehnie și climatizare
- **Media finală / Rezultatul final: 10**
- Tipul de credite: ECTS- Număr de credite: 120
- Lucrarea de dizertație: Pompă de căldură aer-apă (un mod mai eficient de a încălzi apa) machetă

Nivel CEC Nivelul 7 CEC

15/09/2015 – 10/07/2019 Iași, România

DIPLOMĂ DE INGINER Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași

- Domeniul de studii: Ingineria Autovehiculelor
- Programul de studii: Autovehicule Rutiere
- **Media finală / Rezultatul final: 10**
- Tipul de credite: ECTS- Număr de credite: 240
- Lucrarea de diplomă: Stand experimental testare compresoare auto tip Denso

Nivel CEC Nivelul 6 CEC

15/09/2011 – 11/06/2015 Iași, România

DIPLOMĂ DE BACALAUREAT Liceul Teoretic de Informatică "Grigore Moisil" Iași

- Domeniul de studii: Profil Real
- Specializare: matematică-informatică intensiv informatică
- **Media finală / Rezultatul final: 8.28**

Nivel CEC Nivelul 4 CEC

PROIECTE

02/06/2026 – 31/12/2028

IPCEI-AUMOVIO nr.17.PI/I4/C9 - ASSET-IxC, Automotive Systems Smart Energy-Efficient Transducers - Innovation Across Value Chain with Gheorghe Asachi Tehnical University of Iasi

PERMIS DE CONDUCERE

Permis de conducere:AM	27/03/2024 – 27/03/2034
Permis de conducere:B1	27/03/2024 – 27/03/2034
Permis de conducere:B	27/03/2024 – 27/03/2034

COMPETENȚE LINGVISTICE

Limbă(i) maternă(e): **ROMÂNĂ**

Altă limbă (Alte limbi):

	COMPREHENSIUNE		VORBIT		SCRIS
	Comprehensiune orală	Citit	Producerea de mesaje orale	Conversație	
ENGLEZĂ	C1	C1	B2	B2	B2
FRANCEZĂ	A2	A2	A2	A2	A2

Niveluri: A1 și A2 Utilizator de bază B1 și B2 Utilizator independent C1 și C2 Utilizator experimentat

COMPETENȚE

Microsoft Office | AutoCAD | Adaptabilitate | Responsabilitate | Creativitate | Atitudine pozitivă | Lucru în echipă | Atenție la detalii | Organizare | Flexibilitate | Gândire critică | Rezolvarea problemelor | Cooperare | Răbdare

HOBBY-URI ȘI TEME DE INTERES

Sport

Practic ciclismul și drumețiile montane, activități care contribuie la dezvoltarea rezistenței, disciplinei și perseverenței.

